



**HAL**  
open science

# Perception et conception en architecture non-standard

Chiara Silvestri

► **To cite this version:**

Chiara Silvestri. Perception et conception en architecture non-standard. Architecture, aménagement de l'espace. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. Français. NNT : . tel-00858782

**HAL Id: tel-00858782**

**<https://theses.hal.science/tel-00858782>**

Submitted on 6 Sep 2013

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

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

*Université Montpellier II  
Sciences et Techniques du Languedoc*

**THESE**

pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

*Discipline : Mécanique Génie Civil  
Ecole Doctorale : Information Structures et Systèmes*

présentée et soutenue publiquement

par

**Chiara SILVESTRI**

Le 19 juin 2009

Titre :

**PERCEPTION ET CONCEPTION  
EN ARCHITECTURE NON-STANDARD**

*Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale  
des formes complexes*

**JURY**

**Roberto DI MARCO**  
**François FLEURY**  
**Grigore GOGU**  
**René MOTRO**  
**Bernard MAURIN**  
**Patrick PAJON**

Professeur à l'Université IUAV de Venise *Rapporteur*  
Maître Assistant à l'ENSAL de Lyon  
Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée  
Professeur à l'Université Montpellier II  
Maître de Conférences à l'Université Montpellier II  
Maître de Conférences à l'Université Grenoble III

*Examineur*  
*Rapporteur*  
*Directeur de Thèse*  
*Co-directeur de thèse*  
*Rapporteur*



### ***Remerciements***

Je tiens à remercier les personnes grâce auxquelles ce travail a pu être réalisé : tout d'abord mon directeur de thèse, M. René Motro, qui m'a encadré avec pertinence et efficacité tout au long de cette recherche ; également, M. Bernard Maurin, co-encadrant dont l'aide a été précieuse. J'adresse aussi un sincère remerciement à Mme Birgitta Dresp-Langley qui a joué un rôle déterminant dans l'élaboration de ce sujet et la réalisation de la partie expérimentale.

Le Dipartimento di Costruzione dell'Architettura de l'Université IUAV de Venise, tout particulièrement M. Roberto Di Marco et M. Enzo Siviero, m'a permis d'être financée pendant ces recherches. Je les remercie pour leur soutien et l'intérêt qui ont accordé à ce travail.

Je voudrais également adresser mes remerciements au personnel du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, en particulier Mme Reine Bonnet et M. Gilbert Gobbo pour leur aide sur les questions administratives.



p. 1 **Introduction générale**

**Partie I**  
**MODELISATION DE LA PROBLEMATIQUE :**  
**LA CONCEPTION SPATIALE DES FORMES COMPLEXES**

p. 5 **Introduction**

p. 7 **I. 1 L'architecture Non-Standard**

p. 9 I.1/ 1 Recherche d'une définition  
p. 16 I.1/ 2 Caractéristiques émergentes  
p. 23 I.1/ 3 L'avant-garde Non-Standard

p. 27 **I. 2 Le processus de conception en architecture et ingénierie**

p. 29 I.2/ 1 La conception spatiale  
p. 32 I.2/ 2 Conception et résolution de problèmes  
p. 37 I.2/ 3 Conception et outils de représentation

p. 47 **I. 3 Conception et processus cognitifs**

p. 49 I.3/ 1 Apport des sciences cognitives : une approche scientifique des  
processus de conception  
p. 53 I.3/ 2 Les processus perceptifs  
p. 58 I.3/ 3 La mémoire et la résolution de problèmes

p. 63 **I. 4 Modélisation de la problématique**

p. 65 I.4/ 1 Per-ception et con-ception : contribution des sciences cognitives  
p. 71 I.4/ 2 Les processus de conception dans l'architecture Non-Standard  
p. 77 I.4/ 3 Objectifs et méthodologie

p. 81 **Conclusion**

**Partie II**  
**EXPERIMENTATION :**  
**LE TRAITEMENT PERCEPTIF DES FORMES COMPLEXES**

p. 83 **Introduction**

p. 85 **II. 1 Modèles géométriques dans la perception des formes complexes : le cas de la courbure bidimensionnelle**

p. 87 II.1/ 1 Préliminaires  
p. 94 II.1/ 2 Expérience  
p. 97 II.1/ 3 Résultats  
p.125 II.1/ 4 Discussion

p. 129            **II. 2    Formes complexes, apprentissage et outils de représentation**

p. 131            II.1/ 1    *Preliminaires*  
p. 139            II.1/ 2    *Expérience*  
p. 143            II.1/ 3    *Résultats*  
p. 149            II.1/ 4    *Discussion*

p. 155            **Conclusion**

**Partie III**  
**DISCUSSION GENERALE : PERCEPTION ET CONCEPTION DANS LA CONTEMPORAINE ARCHITECTURE NON-STANDARD**

p. 157            **Introduction**

p. 159            **III.1    Structuration perceptive et élaboration mentale des formes complexes**

p. 161            III.1/ 1    *La courbure*  
p. 168            III.1/ 2    *Les formes non régulières*

p. 177            **III.2    Outils de représentation et manipulation des formes complexes**

p. 179            III.2/ 1    *Le dessin et l'élaboration perceptive*  
p. 183            III.2/ 2    *Les outils numériques de représentation*

p. 187            **Conclusion**

p. 189            **Conclusions générales et perspectives**

p. 193            **Bibliographie**

## INTRODUCTION GENERALE

Cette thèse a été élaborée dans le cadre des recherches sur la morphologie structurale des architectures à forme libre conduites au sein de l'équipe *Conception en Structures* du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université Montpellier 2, en collaboration avec l'équipe *Structures Légères pour l'Architecture* de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier. Les thématiques de recherche propres à ces équipes concernent la conception des formes complexes dans l'architecture et l'ingénierie, notamment les formes caractérisées par des surfaces « gauches » (comme les membranes tendues et pneumatiques, et les voiles en béton armé), et les formes des structures spatiales initialement contraintes, composées par des barres et des câbles (spécifiquement les systèmes « en état de tensegrité »). Leur morphologie structurale constitue un aspect fondamental du processus de conception, car la cohérence entre les qualités formelles et mécaniques est nécessaire pour assurer leur existence matérielle.

Les développements technologiques des vingt dernières années, en particulier dans le domaine des outils numériques, ont permis la représentation, la modélisation mécanique, ainsi que la réalisation matérielle de formes de plus en plus complexes. Un ensemble très diversifié de bâtiments caractérisés par des formes courbes, continues ou non, a vu le jour dans différentes parties du monde occidental : de telles expériences ont été regroupées récemment sous la dénomination d'architectures « Non-Standard ». Dans la conception de ce genre d'architectures, la question morphologique est abordée d'une façon spécifique, différente de celle usitée dans les approches de caractère analytique propres à l'architecture classique et moderne lorsqu'elle procède par composition d'éléments extraits d'une typologie morphologique établie.

L'élaboration formelle de l'architecture Non-Standard repose, au niveau théorique, sur les concepts de continuité et de variation et, au niveau matériel, sur les outils numériques de représentation. Mais en fait, ces outils ont dépassé leur fonction initiale (outils de représentation) pour devenir des véritables outils de génération de la forme. Les formes complexes, continues ou courbes sont modélisées dans l'espace virtuel numérique selon des modes opératoires de plus en plus simples pour les utilisateurs, et de plus en plus efficaces dans la production de résultats visualisables sur écran. La capacité de modélisation d'un nombre presque infini de possibilités virtuelles,

offre un potentiel intéressant de suggestions et d'imaginaires de solutions spatiales et constructives innovantes. *Simultanément, l'importance accordée à la capacité imaginative comparée à la capacité constructive nous semble introduire un décalage important entre ce qui est virtuellement possible et ce qui est réalisable. Une approche de la question morphologique cohérente avec les comportements mécaniques et les moyens techniques de construction semble souvent délaissée dans un tel contexte, pour laisser la place à une prépondérance du virtuel.* La cohérence entre les objets de l'espace virtuel et leur existence matérielle dans l'espace physique nous semble s'affaiblir au fur et à mesure que les outils de modélisation numérique deviennent de plus en plus sophistiqués et que les logiques génératrices des formes se font de plus en plus abstraites. *Toute forme de conception repose sur les rapports entre l'espace virtuel des possibles et l'espace physique du réalisable : ce qui fait le lien entre les deux et qui en établit le rapport c'est, évidemment, l'espace mental du concepteur. Ce constat de la présence, dans l'architecture Non-Standard, d'un décalage qui semble s'agrandir entre le monde virtuel des possibles et le monde physique du réalisable, nous a amené à nous questionner sur la position du monde mental du concepteur vis-à-vis de ce décalage.*

Le travail de thèse que nous proposons s'intéresse donc aux modalités selon lesquelles les concepteurs construisent et traitent les représentations mentales des objets en voie de conception, en lien avec leurs caractéristiques géométriques, avec les outils de représentation employés et avec leur propre expertise. Des telles questions se révèlent importantes dans le cas de l'architecture Non-Standard, car celle-ci présente des spécificités de conception qui sont associées à ces sujets : l'élaboration de formes courbes et non régulières, l'utilisation extensive des outils virtuels pendant l'élaboration formelle et la collaboration de plusieurs spécialistes avec des expertises différentes.

*Afin de faire une analyse scientifique de telles questions nous avons décidé de les aborder avec les méthodes issues du domaine des sciences cognitives et en particulier de la psychologie expérimentale.* Un travail interdisciplinaire a été entrepris, avec l'objectif d'explorer des questions formelles et géométriques propres aux domaines de l'ingénierie et de l'architecture à travers des connaissances et des méthodes propres au monde de la psychologie expérimentale. La partie expérimentale a été organisée en deux études indépendantes, ayant pour finalité de mettre en évidence des données significatives sur le traitement cognitif des qualités

spatiales complexes (courbure et haute irrégularité), sur leur lien avec les outils de représentation (par exemple, maquette réelle ou modèle virtuel) et avec l'expertise des acteurs. Une première étude (conduite selon les méthodes de la psychophysique sensorielle) concerne l'élaboration perceptive de la qualité formelle de « courbure ». Une deuxième étude s'occupe de la résolution de problèmes spatiaux complexes en identifiant le rôle des outils de représentation dans cette résolution.

Les questionnements auxquels nous souhaitons proposer des éléments de réponse avec les résultats de nos expériences concernent l'élaboration perceptive sous trois aspects:

- a. l'élaboration perceptive et la construction des représentations mentales des formes complexes (courbes ou à configuration hautement irrégulière) ;
- b. l'élaboration perceptive et la construction des représentations mentales en rapport avec les outils de représentation (en particulier, les maquettes et les modèles numériques) ;
- c. l'élaboration perceptive et la construction des représentations mentales en rapport avec l'expertise des acteurs (expertise géométrique ou familiarité avec les outils numériques de modélisation tridimensionnelle).

La présentation de notre travail dans ce mémoire est organisée en trois parties. Dans une première partie théorique nous présentons certains concepts essentiels dans les domaines de l'architecture Non-Standard, des processus de conception spatiale et des sciences cognitives. Ces préliminaires sont nécessaires pour arriver à une modélisation claire de la problématique que nous nous proposons d'éclairer à travers les travaux expérimentaux. Une deuxième partie décrit les études expérimentales qui ont été réalisées, et présente l'analyse des résultats obtenus. Enfin, dans une troisième partie, nous discutons ces résultats en relation avec la problématique de la conception des formes complexes en architecture et ingénierie.



**Partie I**

**MODELISATION DE LA PROBLEMATIQUE:  
LA CONCEPTION SPATIALE DES FORMES  
COMPLEXES**



## Partie I

# INTRODUCTION

La première partie du mémoire est dédiée à la présentation des préliminaires théoriques nécessaires pour la modélisation de la problématique qui nous intéresse. Cette partie est composée de quatre chapitres : les premiers trois exposent les principales questions soulevées par l'émergence de l'architecture Non-Standard dans les domaines de la critique architecturale, des processus de conception spatiale et des sciences cognitives. Le dernier chapitre propose une modélisation unitaire de la problématique, ainsi qu'un énoncé des objectifs de notre travail et des méthodes qui seront utilisées pour les atteindre.

Le premier chapitre concerne l'*architecture Non-Standard* : il s'agit d'une présentation des caractéristiques émergentes communes aux différentes expériences architecturales qui peuvent être associées à la dénomination d'architecture « Non Standard ». Des formes complexes, des systèmes de production et de construction innovants, et des processus de conception expérimentale, sont à la base d'un ensemble d'expériences architecturales diversifiées, que nous présentons en mettant en évidence des aspects qui les lient, dont les plus importants sont associés à la *morphogenèse*, à la *tectonique* et au *processus* de conception. Nous mettons en évidence les racines historiques de ce phénomène, caractérisé par d'importantes innovations procédurales et technologiques qui vont bien au delà des simples qualités formelles, qui restent quand même la caractéristique la plus évidente en raison de la puissance visuelle des formes complexes.

Le deuxième chapitre décrit les processus de *conception en architecture et ingénierie* : après avoir défini la nature de la conception, nous clarifierons les spécificités de la conception en architecture et ingénierie (conception spatiale déterminée par des nécessités) ; du point de vue cognitif, la conception architecturale est un processus de résolution de problème dans le domaine spatial dans lequel l'élaboration visuelle détient un rôle dominant. On étudie les stratégies visuelles et spatiales de résolution de problèmes qui sont couramment utilisées dans l'architecture, celles spontanées issues des mécanismes visuels (émergence), ainsi que les stratégies géométriques utilisées pour « aider » (organiser et diriger) le processus de résolution. En raison de l'importance des opérations visuelles, les outils de représentation jouent un rôle fondamental dans la conception spatiale, on s'intéresse au rôle du dessin, à celui des maquettes à l'échelle,

pour finir avec les outils virtuels, outils qui sont dominants dans le cas du Non-Standard.

Le troisième chapitre traite précisément les *questions cognitives* qui entrent en jeu dans la conception spatiale : nous expliquons comment la perception détient une place déterminante pendant l'élaboration formelle dans une conception spatiale, nous présentons la construction des représentations mentales et les processus de résolution de problème. On clarifie aussi l'importance des méthodes de la psychologie cognitive pour une étude scientifique des processus de conception.

Le dernier chapitre tisse les liens entre les trois premiers, en proposant un *modèle des processus de conception des architectures Non-Standard du point de vue cognitif*, en relation avec les stratégies d'élaboration formelle choisies mais aussi en relation avec les outils de représentation employés.

I.1

## L'ARCHITECTURE NON-STANDARD



## I.1/1 RECHERCHE D'UNE DEFINITION

Dans le panorama architectural contemporain des pays riches on assiste, depuis une dizaine d'années, à l'apparition d'un ensemble de réalisations hétérogènes par rapport à l'échelle, à la fonction, au clients et indépendantes géographiquement (on en retrouve en Europe, aux Etats-Unis, en Asie, au Moyen Orient) qui présentent certaines caractéristiques communes, dont la plus évidente est sans doute la *complexité formelle*, qui donne à ces œuvres une force visuelle très marquée et un caractère original et innovant.

Afin de parvenir à la mise en évidence des caractéristiques essentielles communes aux différentes expériences des formes complexes dans l'architecture contemporaine nous allons commencer par un bref parcours historique autour des courantes théoriques et des différentes définitions critiques qui ont été proposées pour ce phénomène. On essaiera ensuite d'expliquer quelles racines on peut identifier dans les domaines des sciences et des arts pour ces expériences architecturales, qui ne peuvent pas être réduites à une simple volonté de « délire » formel de la part des architectes, mais que nous retenons au contraire être la réponse « architecturale » (positive ou négative, on ne le sait pas, notre but n'étant pas de porter un jugement) à des changements plus amples dans le monde contemporain.

### 1a. Parcours historique

Le contexte dans lequel on voit naître l'intérêt contemporain vers les formes complexes en architecture est celui des années 90 du XXème siècle. Pendant cette période, le panorama architectural est dominé par le courant postmoderne, focalisé sur une approche formelle, visuelle, scénographique et symbolique (Botta, Meier), mais aussi sur les études urbaines concernant la morphologie urbaine et la typologie (Rossi, Gregotti). Les explorations déconstructivistes (Eisenmann, Ghery) et "high tech" (Foster, Piano) constituent les avant-gardes de la période. Vers la fin des années 90, ces avant-gardes deviennent dominantes (Eisenmann, Hadid, Decq, Liebeskind) [Fig. 2] avec une certaine forme de minimalisme (Ando, Meier). En même temps, on assiste à une révolution fondamentale dans le domaine des processus de travail des architectes avec l'introduction des outils numériques dans la conception architecturale et, de façon plus lente, dans la construction.

Certains concepts issus des expériences déconstructivistes peuvent être vus comme précurseurs de la complexité formelle qui suscitera autant d'intérêt dans les années suivantes. Les approches déconstructivistes vers la géométrie [Fig.2] montrent déjà explicitement une volonté de dépasser les rigidités, le simplisme et la symbolique des formes élémentaires dominantes dans la deuxième moitié du XXème siècle [Fig. 1]. La recherche formelle se tourne vers la *complexité*, qui est interprétée principalement comme contradiction et elle est exprimée par des formes conflictuelles, des angles aigus, des plans « chaotiquement » disposés dans l'espace. On oublie la répétition, la régularité, les symétries, les proportions, l'orthogonalité, mais on travaille encore avec des éléments plans ou linéaires qui sont « déconstruits » et recomposés de façon complexe et irrégulière. Avec la diffusion dans le domaine de l'architecture d'outils numériques qui permettent de modéliser et visualiser des formes complexes, *courbes* et *dynamiques*, on voit apparaître une volonté de dépassement de la conflictualité déconstructiviste dans une unité encore complexe mais continue, fluide, souple. En réaction à la rigidité orthogonale et standardisée du formalisme moderne et postmoderne, dominé par des formes simples et solennelles, on ne cherche plus le conflit d'éléments mais on se tourne plutôt vers une recherche de continuité, de souplesse, de mouvement et d'animation.

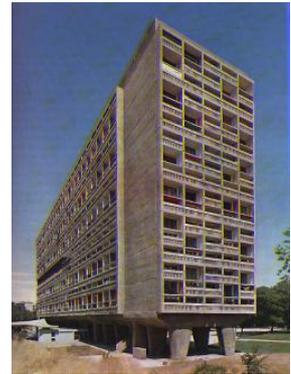


Fig. 1a Le Corbusier, Unité d'Habitation, Marseille (1952)



Fig. 1b T. G. Rietveld, Schroder House, Utrecht (1924)

Fig. 1 Modernisme



Fig. 2a Z. Hadid, Musée Vitra, Weil-Am-Rhein (1994)



Fig. 2b D. Liebeskind, Serpentine Pavilion, London (2001)

Fig. 2 Déconstructivisme

### Architecture Blob

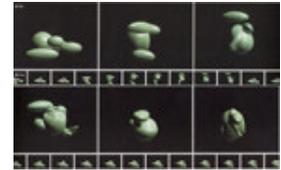
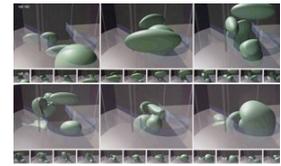
L'un des premiers à donner une formalisation théorique à ces explorations sur l'animation et le fluide est Greg Lynn, qui introduit, dans une série d'articles du début des années 90, les concepts d'*animation*, *inflexion*, *pliage*, et *courbure* dans la théorie architecturale. En particulier, dans l'article du 1993 « Architectural curvilinearity : the folded, the pliant and the supple », [LYN98] ou dans son livre « Animate form », du 1999 [LYN99] il présente une synthèse de son système philosophique. L'architecture est interprétée comme un « système d'organisation dynamique » plutôt que comme un processus de composition formelle ou d'organisation fonctionnelle. Les opérations conceptuelles sur les formes sont de l'ordre de l'*inflexion*<sup>1</sup> et de la *déformation*, en pleine rupture avec la traditionnelle « composition » et la plus récente déconstruction. Dans son article du 1996 « Blobs, or why tectonics is square and topology is groovy » [LYN98] Greg Lynn propose une définition pour l'architecture issue de ces principes : il parle de *blob*, dans le sens de molle, souple, réactive aux conditions de l'environnement, des actions et des forces qui l'entourent. La référence vient du film du 1956 *Blob*, où le blob est, en fait, une substance molle, qui prend la forme de ce qui la contient, qui est donc « in-formée » : *la forme est déterminée par l'information*, les données issues de l'environnement où elle se trouve. L'idée de blob concerne donc la logique relationnelle à la base de l'élaboration architecturale [Fig. 3] et non pas les effets purement formels et esthétiques, qui ne sont concernées que comme conséquence de cette logique générative. Le terme « blob », en raison de sa puissance de suggestion formelle, a été depuis très utilisé pour décrire tout simplement les formes courbes et complexes en architecture dans leur généralité, sans aucune référence aux logiques génératives dont elles sont issues.

Greg Lynn travaille avec les chercheurs du Laboratoire d'Intelligence Artificielle du MIT (le Massachusetts Institute of Technology, une institution de recherche à l'avant-garde pour ce qui concerne les études sur l'Intelligence Artificielle) : les idées de fluidité, d'animation, d'organisation dynamique sont développées en parallèle avec des expérimentations sur la modélisation et la visualisation des géométries complexes, sur la transmission directe des informations virtuelles entre plusieurs collaborateurs, sur la production numérique des composants à travers le « laser-cutting » et la stéréo lithographie [Fig.4]. Dans ce même laboratoire, des logiciels de génération de forme, basés sur des logiques paramétriques, capables de donner origine à des formes complexes en partant de la combinaison d'opérations simples, sont développés pour la conception architecturale. Les réalisations de Greg Lynn se focalisent surtout sur des œuvres à petite échelle, des structures pour exposition qui transforment les espaces de visite en espaces courbes et « fluides ». La dimension du virtuel est présentée comme dominante : vidéos et maquettes des espaces réalisés sont présentées dans les lieux qu'ils représentent.



A ce stade, les explorations des architectes sur les possibilités de génération formelle de *surfaces* ou d'*objets/sculpture* sont encore dominantes : on teste

<sup>1</sup> « L'inflexion, ou la courbure continue, est le modèle mathématique et graphique pour l'imbrication de forces multiples dans le temps. [...] La courbure dans un environnement temporel est la méthode à travers laquelle l'interaction de forces multiples peut être structurée, analysée et exprimée. » [LYN99]



**Fig. 3** Architecture Blob: la forme est générée par l'organisation dynamique des forces du contexte.  
G. Lynn, Henie Onstad, Oslo (1995)



**Fig. 4** Maquette stéréo lithographique (processus à contrôle numérique).  
G. Lynn, Artist Space, New York (1995)

**Fig.5** Espace, forme et mouvement.  
dECOi, ether1, Genève (1996)

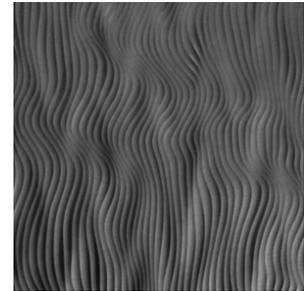
des logiques d'élaboration formelle et des technologies de production qui sont nouvelles et inconnues, donc pour l'instant les réalisations se limitent à la petite échelle.

### Architecture liquide

En France, les bureaux d'architectes *dECOi* et *Objectile* sont parmi les premiers à travailler sur ces concepts, s'appuyant sur une forte composante théorique. B.Cache et son équipe *Objectile* relèvent de la même approche « philosophique »<sup>2</sup> de G.Lynn : dans son livre « Terre meublée » [CAC95], dédié au philosophe français G. Deleuze, B. Cache présente un système théorique complet d'interprétation de l'architecture. L'architecture est le résultat de l'« incorporation de différences », de la « connectivité » et de l'« intégration d'éléments hétérogènes dans un nouveau mélange continu ». La forme est le résultat d'une « logique fluide de poches interconnectées plutôt que de boîtes » : les concepts formels de pliage<sup>3</sup> et inflexion sont centraux. En particulier, « le pli exprime la relation entre l'extérieur (la géographie) et l'intérieur (l'ameublement) de l'architecture » Ce lien entre la géographie, le territoire et l'ameublement, est fondamental car « les meubles constituent l'environnement physique immédiat dans lequel notre corps agit et réagit ». Un tel système théorique introduit « des nouvelles pratiques architecturales ». Le résultat matériel du système philosophique de B.Cache ce sont des sculptures, des meubles, des parois intérieures, produits avec les machines à contrôle numérique [Fig.6].

Les architectes du bureau *dEcoi*, en partant d'une réflexion théorique de nature proche à celle de *Objectile*, s'intéressent aussi à l'architecture comme lieu d'interaction entre l'homme et la technologie, entre la dimension sensorielle humaine et les systèmes sensoriels artificiels (capteurs, activateurs). La forme est matériellement souple parce qu'elle réagit aux mouvements humains, comme dans l'installation *aegis hyposurface* [Fig. 7], un mur constitué de petits carreaux qui sont en fait des capteurs actifs, capables de changer de position en réaction aux mouvements des usagers qui sont à proximité. Dans l'installation *ether I* [Fig.5], *dEcoi* propose un projet de sculpture dans lequel l'image, la surface, l'objet sont ambigus dans leur statut ; la forme est générée à partir de la trace négative d'une série de mouvements de danse et elle est matérialisée par la combinaison complexe de pièces linéaires en aluminium, chacune de forme unique.

En Hollande, dans les années 90 les architectes des bureaux *NOX* et *ONL* travaillent sur l'idée de *fluide* en architecture : ils appellent fluide une architecture qui peut « incorporer les mouvements du corps humain » [NIO95], qui est susceptible d'activer le corps et son système perceptif. M.Novak propose le terme « Liquide » pour définir une architecture qui « connecte en continu réel et virtuel et matière et information » [OOS95]. La réalisation en 1998 du pavillon *Freshwater Saltwater Pavilion* [Fig. 8], conçu par les bureaux *NOX* et *ONL*, est un petit exemple issu de l'élaboration de ces concepts : il s'agit d'un espace complexe, courbe, continu, où les notions de sol, plafond et parois sont tout à fait absentes. Les organes du corps sont sollicités par le conflit entre les stimuli visuels et « proprioceptifs »<sup>4</sup>, c'est-à-dire par le conflit entre la vision et l'équilibre (en particulier dans la partie conçue par *NOX*). En même temps, l'environnement architectural est « actif » dans le sens qu'il est modifié dans les lumières, les sons, la température et l'humidité en réaction aux mouvements du corps (en



**Fig.6** Les formes sont conçues sur la base de logiques génératives et elles sont produites à travers des machines à contrôle numérique.  
*Objectile, panneaux « gouges » COP001*



**Fig.7** Architecture, corps, technologie.  
*dECOi, Aegis hyposurface (1996)*



**Fig. 8** Architecture Liquide  
*NOX, Freshwater pavilion, Neeltje Jans (1998)*

<sup>2</sup> Tant G.Lynn que B. Cache (*Objectile*) ont une formation en architecture aussi bien que en philosophie.

<sup>3</sup> Dans le système philosophique de Cache on retrouve des références déclarées à l'interprétation du concept du « pli » proposé par G. Deleuze dans son ouvrage « *Le Pli. Leibniz et le baroque* » [DEL88]

<sup>4</sup> La proprioception est la perception de l'espace liée à l'équilibre et à la relation avec la force de gravité

particulier dans la partie conçue par ONL). Il s'agit d'une architecture-machine qui dialogue directement avec les sens [OOS03].

Depuis les années 2000 on assiste finalement à l'exploitation du potentiel des technologies de réalisation : après un ensemble de réalisations à petite échelle, les premiers projets à grande échelle issus de la pratique basée sur les idées de complexité, continuité, courbure sont réalisés [Fig.9].

*Architecture à Forme Libre*

En 1997 la construction du Musée Guggenheim à Bilbao (Espagne) [Fig. 9b], conçu par l'architecte F. Gehry comme une sculpture à l'échelle urbaine, marque une étape fondamentale par rapport au rôle de l'impact visuel des formes complexes mais aussi par rapport aux technologies de conception et de réalisation. La puissance visuelle des formes fluides, courbes et brillantes de cette œuvre l'a transformé en une véritable icône visuelle, une image-symbole capable de catalyser autour d'elle le développement économique de la ville de Bilbao dans son ensemble. Au niveau de la conception, la modélisation géométrique des formes complexes est réalisée grâce au logiciel CATIA, jusqu'à ce moment utilisé exclusivement par l'industrie aéronautique et aujourd'hui largement employé dans le milieu de l'architecture à forme complexe.



**Fig. 9** Architecture à Forme Libre

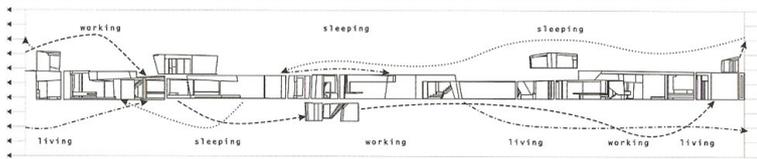


**Fig. 9a** FOA, Terminal portuaire, Yokohama, Japon (2000)

**Fig. 9b** F. Gehry, Musée Guggenheim, Bilbao (1997)

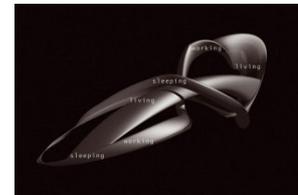
Au niveau de la technologie de réalisation, les surfaces brillantes à courbure hautement variable ont pu être matérialisée grâce à un système issu (lui aussi, de même que les outils de modélisation) de l'industrie aéronautique : des plaques flexibles de titane, habituellement utilisée pour réaliser les surfaces des shuttles spatiaux.

Dans les mêmes années les architectes hollandais du bureau *UN Studio* travaillent sur l'interprétation de la complexité et de la variabilité aux niveaux organisationnel et fonctionnel, par exemple à travers les diagrammes des activités ou des flux de mouvement des usagers [ROD01]. L'architecture est conçue comme réponse aux actions et aux flux des humains et des informations dans le temps [Fig. 11a et b]. Les logiques d'élaboration formelle sont issues de concepts comme le morphing, l'hybridation, la *topologie* [Fig. 11b et c].



**Fig. 10** L'espace est conçu autour de la continuité des activités et des rythmes de vie de ses habitants pendant les 24 heures (11a et b). La continuité morphologique est issue d'un concept topologique : le ruban de Möbius. *UNStudio, Möbius House, Arnhem (1998)*

**Fig. 10a** (gauche)



**Fig. 10b**

Dans la publication « *Move* », en 1999 [BER 99], les architectes de UNStudio présentent une théorisation des concepts d'*hybridation* et de *morphing* : la forme finale d'un objet résulte de la combinaison (ou morphing) des caractéristiques d'autres objets, qui sont hybridées, ou mélangées entre eux, pour donner origine à une nouvelle entité qui présente des caractéristiques totalement nouvelles et pas prévisibles en considérant simplement les éléments de départ.



**Fig. 10c**

Les réalisations de ces années présentent pour la première fois au grand public les résultats des élaborations théoriques du domaine architectural sur la courbure et la complexité formelle et sur le potentiel des outils numériques dans la conception spatiale; ce genre d'architecture est qualifié dans cette période de *Forme Libre* (en anglais *Free Form*). Une telle définition est très efficace pour communiquer directement les composantes visuelles et formelles de cette architecture, mais elle devient évidemment limitée si elle ne concerne que les aspects strictement formels du phénomène. Plus intéressante nous semble l'interprétation de cette liberté de la forme en relation aux habitudes et aux standards, dominants dans les processus de conception de l'architecture moderne. R. Oxman synthétise bien ce point de vue en définissant la Forme Libre comme « libre des a priori formels » [OXM06] : il n'y a pas de règles formelles prédéterminées (normes, typologies, standard, grilles, formes élémentaires, etc.) dans l'élaboration spatiale de l'objet architectural. La forme est un résultat, il n'y a pas de formes qui peuvent être définies en abstrait (comme un cercle ou un carré) : la forme est toujours le résultat d'un processus, qui dépend de plusieurs facteurs spécifiques, donc dans chaque situation particulière elle sera différente.

### Architecture Numérique

L'emploi des outils numériques de modélisation dans la conception a commencé dans les années 70 du XXème siècle au sein de l'industrie aérospatiale et automobile, pour s'élargir ensuite au domaine du design industriel ; dans le milieu architectural, il a fallu attendre jusqu'aux années 80 ou 90 pour que leur utilisation soit généralisée. Au but d'une vingtaine d'années, aujourd'hui les outils numériques ont pris une place fondamentale et nécessaire dans l'architecture et l'ingénierie, principalement dans le domaine de la conception mais aussi dans celui de la réalisation. On se demande donc si la conception spatiale qui se développe à travers l'emploi intensif et presque exclusif des outils numériques de modélisation, représentation et génération constitue un genre de conception spécifique et nouveau ou si il s'agit simplement du processus traditionnel de conception conduit avec des outils différents [fig.11a]. En 1999 le livre de P. Zellner [ZEL99], identifie dans le *paradigme digital*, c'est-à-dire dans la « révolution culturelle et sociale engendrée par les technologies de communication et d'information », la source commune qui est à l'origine et qui réunit les plus importants projets contemporains à Forme Libre. Selon Zellner, les outils numériques sont à l'origine de la conception et de la réalisation d'objets architecturaux originaux et spécifiques, des *formes et espaces* qui sont essentiellement *hybrides*, car ils sont le résultat du mélange entre l'architecture et la technologie. La technologie représente la société, selon Zellner : le Numérique doit donc être au cœur des nouvelles approches à l'architecture.

Et en fait, pendant la conception de l'architecture à Forme Libre, même dans les cas où elle prend son départ de l'imagination formelle directe du concepteur et se développe à travers des maquettes réelles, comme par exemple dans les expériences de l'architecte F.Gehry, le numérique reste toujours fondamental. Dans le cas de Gehry, la première étincelle de la conception est analogique (un croquis, une maquette) mais le passage aux outils numériques est immédiat, dans un processus d'élaboration formelle qui passe des maquettes analogiques aux modèles numériques, aux maquettes découpées par les machines à contrôle numérique sans solution de continuité. En plus, tout le travail d'ingénierie, ainsi que la production des composants nécessaires pour la réalisation matérielle des formes courbes et complexes, sont entièrement basés sur des technologies numériques.

Un autre critique qui, parmi beaucoup d'autres, identifie dans le « digital » la caractéristique propre aux architectures à Forme Libre est B. Kolarevic. En particulier, il fait remarquer que *dans l'architecture à Forme Libre, le médium*



Fig. 11a NOX, Soft Office, (2000-2005)

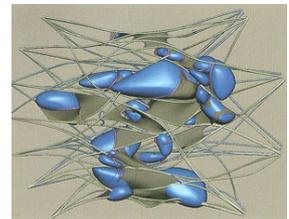


Fig. 11 Architecture Numérique



Fig. 11b dECOi, Paramorph (1999)



*digital n'est pas un simple outil de représentation et visualisation mais un véritable outil de génération des formes.* Kolarevic [KOL03] qualifie cette opération « *digital morphogenesis* », morphogenèse numérique, c'est-à-dire génération formelle numérique [Fig. 11b]. Les architectes du bureau *Objectile* expliquent très clairement le rôle déterminant des outils numériques dans la génération des formes Non Standard, en précisant que « dessiner à partir d'un logiciel associatif<sup>5</sup> transforme le dessin géométrique en une interface de langage de programmation. » [BEA03]

Pour toutes ces raisons, une grande partie de la critique semble considérer la définition *Architecture Digitale* ou *Architecture Numérique* (en anglais *Digital Design*) comme la plus appropriée pour ce phénomène.

### *Architecture paramétrique*

La *Forme Libre* est donc le résultat d'un processus de « morphogenèse numérique », dans lequel un ensemble complexe de *paramètres couplés*<sup>6</sup> interagissent de façon non prédéterminée pour générer une forme qui est la « meilleure » possible en relation aux paramètres choisis et aux lois du couplage. Pour cette raison, une autre définition souvent utilisée est celle de « Architecture Paramétrique », ou « Architecture Performative » [KOL05], car la forme qui est générée à travers le couplage des paramètres est la plus « performante ». Les *paramètres* qui guident l'élaboration formelle sont en fait des *critères de performance*, de nature différente : mécanique (par exemple : la forme doit minimiser les efforts de flexion) fonctionnelle (par exemple : la forme doit contenir le maximum de volume possible dans une certaine surface) thermique (la forme doit minimiser la dispersion de chaleur), parmi beaucoup d'autres. Un exemple de cette approche à la conception architecture est la « tour » du bureau d'architectes *Future Systems*, dont la forme est issue d'une optimisation finalisée à minimiser les sollicitations dues au vents sur la façade et à faire converger les flux d'air vers l'intérieur, où trouve place une turbine éolienne [Fig.12].

Une catégorie particulière dans l'architecture qui peut être définie paramétrique est celle issue des processus dits « évolutifs ». Dans ce cas, la forme est l'étape conclusive d'un parcours d'évolution, issu de l'application d'un ensemble complexe de règles génératrices. La solution finale est la solution qui, au fur et à mesure qu'elle évolue, parvient à être celle qui s'adapte le mieux à un certain environnement donné (« Les solutions [formelles] optimales sont obtenues à travers des petits changements incrémentaux sur plusieurs générations »<sup>7</sup> [KOL03]). Le parallèle avec l'évolution des espèces animales est évidente et les méthodes de prévision et modélisation des phénomènes naturels complexes à travers les algorithmes génétiques sont souvent prises comme modèle.

### *Architecture Non Standard*

En 2004 l'exposition « Architectures Non Standard », au Centre Pompidou de Paris propose une nouvelle définition pour les expériences architecturales que nous avons décrites (Blob, Forme Libre, Digitale, etc.): architecture *Non Standard* [ARC04]. L'origine de ce terme est la mathématique et en particulier l'analyse Non Standard. Cette discipline mathématique (définie de manière rigoureuse par A. Robinson en 1966), est basée sur la théorie des infinitésimales, des entités infiniment petites (tellement petites qu'en existe toujours une plus petite de celle qu'on considère), à travers lesquels est possible gérer mathématiquement le concept de *continuité*. L'architecture des formes libres numériques est donc une architecture Non Standard car le

<sup>5</sup> Les logiciels associatifs permettent de coupler (voir note 6) des propriétés et des paramètres de nature différente (géométrique, fonctionnelle, esthétique, etc.) pour pouvoir générer des formes à travers l'action sur les paramètres et leurs associations.

<sup>6</sup> Les paramètres couplés sont des variables associées qui interagissent entre eux dans la détermination du résultat final (par exemple, dans la fonction qui résulte de deux variables couplées).

<sup>7</sup> « Optimum solutions are obtained by small incremental changes over several generations » [KOL 03]



Fig. 12a Maquette

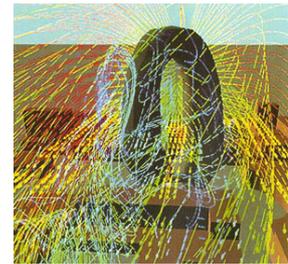


Fig. 12b Analyse des flux du vent autour du bâtiment à travers un logiciel de modélisation numérique de la dynamique des fluides.

Fig. 12 Architecture Paramétrique *Future System, Projet ZED, London (1995)*

Fig. 13 Architectures Non Standard



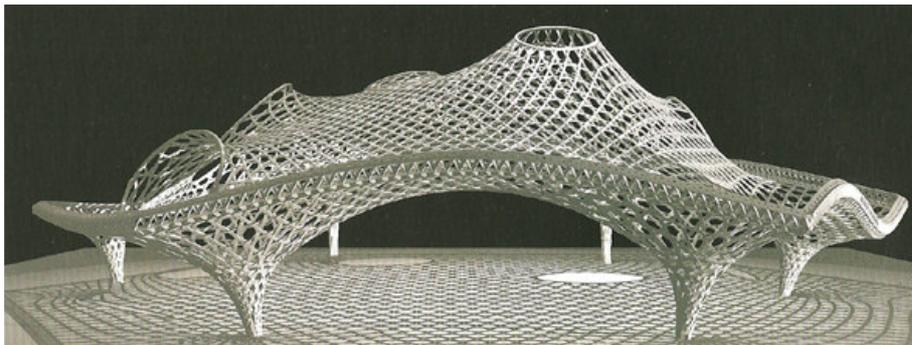
Fig. 13a Coop Himmelblau, *BMW Welt, Munich (2007)*

concept de continuité est présent et déterminant tant au niveau de l'approche théorique (génération formelle, organisation fonctionnelle, etc.) que dans la pratique de la discipline (continuité, ou unité, dans le domaine du langage, de l'échange des informations).

Le concept de Non Standard exprime aussi une volonté innovante par rapport aux logiques normatives et répétitives de l'architecture moderne, tant dans la conception que dans la production. L'architecture moderne, à partir de Le Corbusier, a adapté ses modes de conception à la réalisation « industrielle<sup>8</sup> » : la standardisation, la typologie, les normes formelles codifiées sont fondatrices du processus créatif. Les architectures Non Standard veulent explorer les possibilités des « alternatives à la logique de la répétition » [OXM06], qui sont possibles avec les techniques productives contemporaines et qui permettent, par exemple, la personnalisation des composants ou la création de pièces à forme complexe. Comme l'explique très efficacement B.Cache [BEA03] : « A partir du moment où l'on calcule beaucoup plus vite, où l'on conçoit et transmet à la production beaucoup plus vite des modèles tous différents les uns des autres, il est possible d'envisager une architecture Non Standard. » Le concept de *variation* est fondamental : il ne peut pas y avoir de standards formels, car chaque forme est une « singularité », un événement singulier et unique. On cite encore B.Cache : « Des séries d'objets similaires et pourtant tous différents, un peu comme chaque dune dans le désert constitue une variation singulière sur un même thème morphologique [...] » [CAC95].



**Fig. 13b** Z.Hadid, funiculaire, Innsbruck (2008)



**Fig. 13c** S.Ban, Centre Pompidou, Metz, France (en cours de réalisation), maquette de la couverture

Nous avons donc choisi la définition de Non Standard comme celle qui nous semble exprimer le plus efficacement les caractéristiques essentielles des expérimentations contemporaines sur la complexité, la variabilité et la continuité dans l'architecture.

Les années plus récentes (2004-2008) ont vu proliférer les expériences Non Standard, surtout à grande échelle, dans le panorama construit contemporain [Fig.13].

<sup>8</sup> "Industrielle" est ici utilisé en relation avec l'industrie "fordiste" ou "tayloriste" du siècle XXème, organisée sur les principes de la standardisation et du travail en chaîne de montage.

## I.1/2 CARACTERISTIQUE EMERGENTES

Au delà de l'hétérogénéité des expériences architecturales qu'on vient de présenter et que nous avons choisi de ressembler sous la définition de Non Standard, des caractéristiques communes émergent dans les approches à trois questions fondamentales de la pratique architecturale : la *morphologie*, la *tectonique* et le *processus*.

Le concept de *morphologie* relève de la problématique de l'origine des formes, des processus de génération dont elles sont issues et donc des logiques géométriques qui peuvent structurer l'élaboration formelle dans la conception. Dans les projets Non Standard (comme ceux que nous avons décrits dans le chapitre précédent, par exemple) des qualités formelles qu'on retrouve souvent sont la *continuité*, la *courbure* et la *complexité*.

La *question tectonique*, c'est à dire le rapport entre une idée et les moyens techniques de sa matérialisation, est sollicité à des nouvelles déclinaisons par l'architecture Non Standard, qui impose le développement de solutions structurelles et constructives créatives en raison de la complexité formelle. La question de la *tectonique* implique une réflexion plus ample sur le rapport entre le monde mental interne aux concepteurs (*monde de la création*) et le monde physique externe (*monde de la réalisation*).

Enfin, le *processus* même de conception des architectures Non Standard présente des spécificités importantes par rapport aux processus « traditionnels » ou « standard ». Le rôle fondamental des outils numériques de modélisation et représentation et la multidisciplinarité, c'est-à-dire la collaboration de plusieurs spécialistes pendant la conception, ce sont les caractéristiques qui nous semblent le plus significatives.

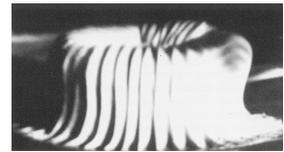
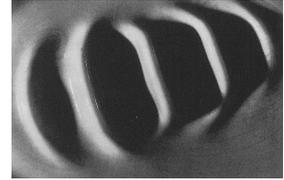
### 2a. Morphologie

On peut définir la *morphologie*<sup>9</sup> comme *l'étude des formes*: ce terme a été forgé au XXIX<sup>ème</sup> siècle par Goethe pour indiquer l'anatomie comparée, c'est-à-dire l'étude des formes vivantes, aussi bien animales que végétales. Le sens original du terme « morphologie » suggère donc une interprétation des formes comme des entités actives, réactives et soumises à des forces. Les résultats formels des tels processus ne sont pas des configurations rigides, linéaires, élémentaires mais des unités fluides, modifiables, souples.

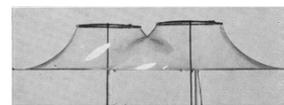
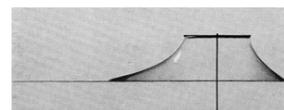
#### Morphogenèse

Comme nous avons expliqué dans le chapitre précédent, l'intérêt du concepteur dans l'architecture Non Standard n'est pas focalisé sur la forme en elle-même, mais sur le processus de *formation* qui est à l'origine de cette forme : la *morphogenèse* (genèse de la forme). *Ce sont les processus morphologiques, les morphogenèses, qui sont réellement originaux et innovants dans l'architecture Non Standard et non pas les simples résultats formels*, qui peuvent être associés à plusieurs expériences précédentes, comme l'organicisme ou le baroque. Le véritable centre d'intérêt des formes complexes dans l'architecture contemporaine réside dans le processus de génération qui est à leur origine [EME04]. Les concepts de morphologie et de morphogenèse sont donc centraux dans l'architecture Non Standard, qui présente comme l'une de ses caractéristiques plus spécifiques l'exploration d'approches continues et « fluides » à l'élaboration formelle pendant la conception.

Le concept de *morphologie* implique l'idée de la forme comme résultat de l'action d'une force sur une matière ou d'une logique sur un système [Fig.14]. L'opération centrale dans la conception architecturale devient donc la *recherche de forme* [KOL03] [Fig.15]: la forme étant par définition le résultat d'un processus spécifique dans chaque contexte, il ne peut pas y avoir des formes définies a-priori (comme un cercle ou un carré, par exemple).



**Fig. 14** Morphogenèses « soniques » : la forme finale est le résultat de l'action des ondes sonores sur une matière fluide.  
H.Jenny, *Sonic Structures* (années 50) [DEL00]



**Fig. 15** Morphogenèse mécanique : la forme minimale des bulles de savon est la configuration optimale (celle qui requière le minimum d'énergie pour rester en place) en relation aux forces mécaniques et à la géométrie des bords.

<sup>9</sup> Le terme morphologie vient du grecque: morpho (forme) et logie (logos, c'est à dire logique)

L'intérêt pour la morphogenèse, basé sur l'approche à la forme comme le résultat visible de l'action des forces, a déjà eu plusieurs interprétations dans des domaines différents, comme par exemple dans la morphologie mécanique de D'Arcy Thompson [DAR61] [Fig. 16] ou dans la recherche de forme pour les structures tendues ou les coques minces. Pour ce qui concerne l'architecture, Greg Lynn a donné une interprétation intéressante de ce concept, en écrivant que « l'espace de la conception est imaginé comme un environnement de force et mouvement et non pas comme un vide neutre »<sup>10</sup> [LYN99].

Dans ce contexte, l'attention du concepteur bascule forcément *de l'objet à l'information* : l'objet « forme » ne compte pas, car la forme n'est que le résultat de la matérialisation d'un champ de forces. Et les « forces » ne sont en fait rien d'autre que des informations, des données : le champ est donc un « champ d'information » (« information field » en anglais) [LYN99]. Il est ce champ qui *in-forme* l'objet architectural, c'est-à-dire qui lui donne sa forme. L'intérêt pour les données, les informations, les logiques relationnelles prédomine donc sur les qualités purement formelles ou spatiales.

Nous allons dans la suite brièvement décrire quelques concepts qu'on peut retrouver dans les logiques génératives qui sont utilisées dans les morphogenèses de l'architecture Non Standard, à partir de la synthèse proposée par B. Kolarevic, dans son ouvrage « Digital architecture : from theory to practice » [KOL03].

### Topologie

L'interprétation de la forme comme le résultat d'un processus, d'une action ou d'un principe est tout à fait innovateur par rapport à l'approche à la conception architecturale dite de *composition*, dans laquelle les formes sont des éléments déjà établis a priori que l'architecte peut simplement combiner. Dans l'architecture Non Standard les logiques génératrices purement formelles comme la symétrie, la modularité, les grilles, sont abandonnées pour aller vers des logiques géométriques d'action sur la forme qu'on peut qualifier de *topologiques*, dans les sens où elles sont focalisées sur la *structure relationnelle à l'origine de la forme et non pas sur la forme en elle-même* [DIC02]. Ce qui compte ce sont les relations organisationnelles entre les données, les qualités formelles effectives sont moins importantes. On peut distinguer deux niveaux différents de spécification entre la topologie et la géométrie euclidienne : la topologie concerne un niveau plus abstrait, car la même configuration topologique peut se manifester en plusieurs configurations géométriques, en plusieurs formes. Ce qui est important, dans les morphogénèses Non Standard est exactement ce niveau abstrait ; la forme géométrique effective qui sera choisie est celle qui s'adapte le mieux aux conditions spécifiques, toujours différentes pour chaque nouveau projet. D'un point de vue formel, la topologie est appelée aussi « la géométrie de la feuille de caoutchouc » [DIC02]. Dans la topologie, en fait, ce qui compte ce sont les relations organisationnelles entre les points, et plusieurs formes peuvent garantir ces relations, alors on peut déformer un objet et garder la même configuration topologique, comme en pliant un objet en gomme [Fig.17b]

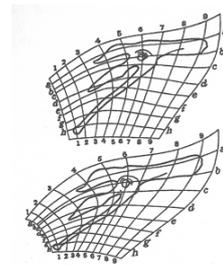


Fig. 16 W. D'Arcy Thompson, *Théorie des transformations, analyse comparée des formes*

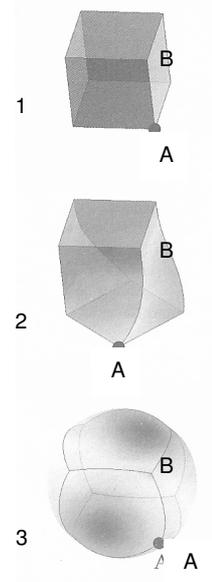
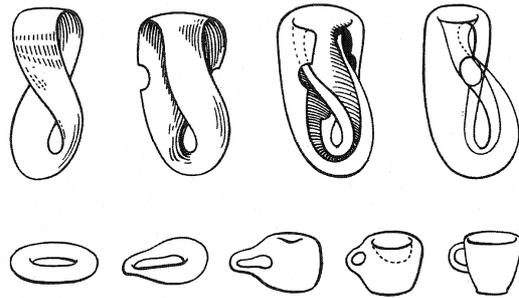


Fig. 17a La topologie étudie les relations entre points et non pas les caractéristiques géométriques de ce qui relie ces points : du point de vue topologique, les Figures 1, 2 et 3 sont équivalentes. [CIA02]

Fig. 17 Topologie

<sup>10</sup> Design space is conceived as an environment of force and motion rather than a neutral vacuum » [LYN 99].



**Fig. 17b** Transformations topologiques ; la topologie est définie aussi « géométrie de la feuille de caoutchouc » car elle permet des déformations complètes des formes si la liaison entre les points est respectée, comme pendant la déformation d'une feuille de caoutchouc. [LYN99]

### Courbure

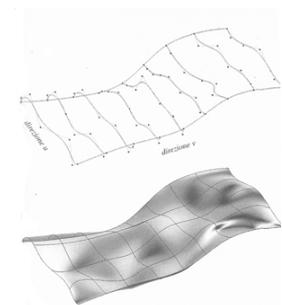
Les formes Non Standard, issues d'une approche « topologique », sont souvent générées par un processus morphogénétique de déformation continue d'une forme imaginé comme élastique et souple. La courbure variable continue est le résultat géométrique et figuratif d'une telle approche. Les formes courbes ont été utilisées en architecture depuis toujours, comme des multiples antécédents le témoignent, à partir des exemples de l'architecture vernaculaire, à travers l'organicisme, jusqu'aux *structures légères* ou aux coques minces. Les similitudes avec les organismes naturels sont souvent citées et elles font référence à des interprétations tant Figuratives que structurelles. Des rapprochements avec le *baroque*, enfin, nous semblent importants car ils vont au-delà de la simple qualité formelle, mais concernent aussi l'approche vers l'architecture comme un événement. On reparlera de la qualité formelle de courbure tout le long de ce mémoire, ce qui nous intéressait ici était de mettre en évidence l'importance, tant conceptuelle que Figurative, qui assume la caractéristique morphologique de courbure dans l'architecture Non Standard. En particulier, la spécificité de la courbure Non Standard est celle d'être complexe et hautement variable [Fig.18].



**Fig. 18** La spécificité de la courbure des architectures Non Standard est d'être complexe et hautement variable.  
F. Gehry, Disney Concert Hall, Los Angeles (2006)

### Géométrie

Au niveau du langage géométrique, les processus morphologiques dans la conception de l'architecture Non Standard nécessitent des géométries qui permettent l'application d'opérations logiques et relationnelles abstraites sur les formes et une gestion simple des changements complexes de configuration, comme par exemple des variations continues de la courbure. Les outils numériques emploient des langages géométriques de modélisation et représentation qui permettent de gérer des formes complexes avec le moins d'information possible [Fig.19]. Par exemple, dans le cas des courbes NURBS, utilisées dans la plupart des logiciels de modélisation, la forme est contrôlée en agissant sur des paramètres qui sont les points de contrôle, les nœuds et leur poids [CIA02]; il n'y a pas de manipulation directe de la forme dans son ensemble, on agit plutôt en modifiant des paramètres locaux (formels ou logiques) pour obtenir des évolutions globales de la forme comme résultat. On discutera des spécificités des outils virtuels le long de ce mémoire ; pour l'instant, ce qui nous semble important de souligner c'est le lien très étroit qui est présente dans les morphogénèses Non Standard entre l'outil numérique, le langage géométrique utilisé (qui est différent de la géométrie descriptive « traditionnelle ») et les stratégies de conception. Il n'est qu'à travers les géométries utilisées par les outils numériques (comme les géométries paramétriques ou les géométries associatives), qu'il est possible de représenter les qualités formelles complexes et variables qui caractérisent les morphogénèses Non Standard.



**Fig. 19** Les outils numériques fonctionnent selon des géométries qui permettent la gestion simple des morphologies complexes, comme les géométries paramétriques. [CIA02]

## 2b. Tectonique

Le concept de *tectonique*, qu'on peut définir avec les mots de K. Frampton comme la « dialectique de l'espace et de la construction » dans une œuvre architecturale [FRA95], est fondamental dans notre vision de l'architecture. Ce concept renvoie en fait à la *nécessité intrinsèque à l'architecture d'exister matériellement* et donc, pour ce qui concerne les processus de conception, au rapport entre les idées et les moyens employés pour leur matérialisation. L'importance de la question tectonique implique une interprétation de l'architecture comme un art matériel : l'architecture nécessite la présence physique de son objet et cette qualité constitue sa spécificité par rapport à d'autres formes d'art. Il n'est que dans leur présence physique, rendue possible par la technologie de construction, que les architectures atteignent leur nature propre : « l'architecture, à l'inverse des beaux-arts, est bien autre chose qu'une représentation » [CHU05].

L'origine de l'utilisation du concept de « tectonique » dans l'architecture se retrouve dans la critique allemande du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ensuite, après presque un siècle d'oubli, dans les années 90 du XX<sup>ème</sup> siècle ce concept est retourné au cœur du débat architectural. En particulier, il a été repris par K. Frampton, dans son ouvrage (paru en 1995) *Studies in Tectonic Culture* [FRA95], où il définit la *tectonique* comme la « poétique de la construction » ou encore comme la « dialectique de l'espace et de la construction ». Frampton précise l'importance, dans la définition du concept d'espace en architecture, des moyens constructifs et structurels qui sont forcément nécessaires pour sa matérialisation, c'est-à-dire pour la présence physique de ce même espace. Depuis, ce concept n'a pas perdu d'importance dans la critique architecturale contemporaine, au contraire il a gagné de plus en plus de popularité. N. Leach, dans son ouvrage du 2004 *Digital Tectonics* (Tectonique digitale) [LEA04], explique la façon dans laquelle la pratique architecturale Non Standard (que lui identifie comme digitale), en raison du nouveau rapport avec les outils numériques et à cause de la complexité formelle de ses œuvres, est en train de donner des nouveaux stimuli pour l'interprétation de la question tectonique. Le Non Standard oblige donc à l'expérimentation de nouvelles idées tectoniques, de nouvelles possibilités d'articulation pour le rapport entre espace et construction, comme l'expliquent, par exemple, les architectes Reiser et Umemoto, en 2006, dans leur publication *Atlas of Novel Tectonics* [REI06]. Le concept de tectonique a fait son apparition même dans le débat architectural français, avec la publication, en 2005, dans la série Archigraphies des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, de l'ouvrage *Le projet Tectonique* [CHU05].

### Matérialité

Du point de vue de la tectonique, c'est-à-dire du rapport entre une idée et les moyens matériels de sa réalisation, l'intérêt du Non Standard réside principalement dans la mise en cause des principes de la construction « industrielle » du XX<sup>ème</sup> siècle, pour proposer une nouvelle interprétation des concepts mêmes de forme, matériel et structure [SPU04]. Le système constructif de masse contemporain (héritage de l'époque « industrielle » du siècle XX<sup>ème</sup>) est basé sur un nombre limité de matériaux (acier, béton, éventuellement bois), sur des composants à forme simple, essentiellement linéaire (en relation des exigences de la production industrielle standardisée) et sur des systèmes structuraux qui dépendent des composants disponibles et des routines de calcul (colonne/poutre, plaques, éventuellement arcs). Dans l'architecture Non Standard l'idée d'un ensemble de composants discrets et linéaires qui forment une configuration structurale tends à être substituée par celle d'une matière continue qui forme une structure intégrale, sans discontinuités, et qui fonctionne selon des gradients, c'est à dite des variations continues (de forme, d'épaisseur ou de la densité du matériel, par exemple). L'intérêt d'une telle approche réside dans le fait que l'efficacité mécanique et l'utilisation minimale des matériaux et de l'énergie sont à la

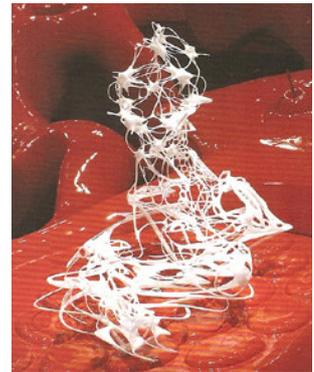


Fig. 20 Xefirotarch, Design Series 4, Sangre (2006)



Fig. 21 A l'échelle de l'objet la production de surfaces continues à courbure variable est possible grâce aux machines à contrôle numérique.  
N. Oxman, Raycounting (2007)

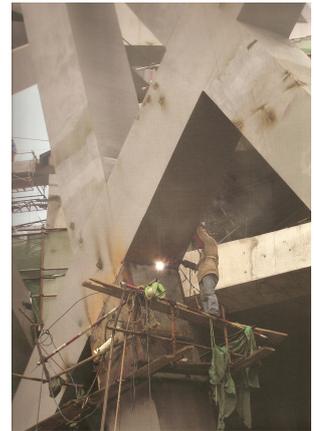
base du choix de la morphologie. Des projets comme ceux de Xefirotarch [Fig.20] (parmi plein d'autres) doivent être observées selon nous de ce point de vue. La réalisation des formes complexes et continues avec des systèmes traditionnels de construction est illogique, extrêmement chère en ressources et matériaux et, au final, inutile ; le but des propositions morphologiques Non Standard est en fait celui de proposer un regard innovateur sur l'essence même des possibilités constructives et non pas simplement sur les qualités spatiales et formelles. Actuellement les moyens techniques de production et de mise en œuvre ne permettent pas encore de réaliser des œuvres d'un tel genre au niveau de masse.

### *Echelle*

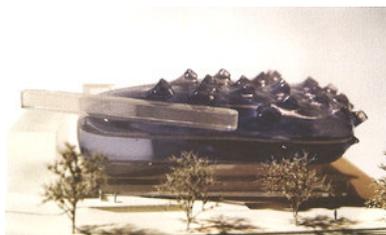
En particulier, le problème de l'échelle de l'architecture [fig.22] émerge clairement quand on fait un parallèle avec le domaine du design industriel. A la petite échelle (objets, sculptures) la matérialisation de surfaces effectivement continues et non uniformes est possible, comme par exemple dans les expérimentations de N. Oxman [Fig. 21]. A l'échelle du bâtiment, des telles techniques sont impossibles, tant pour des raisons technologiques que mécaniques ; cependant les explorations à la petite échelle peuvent sans doute fournir des suggestions utiles pour une éventuelle application à la grande échelle.

### *Dématérialisation*

La conception de l'architecture Non-Standard présente donc un regard potentiellement innovateur sur la question tectonique. En même temps, on y retrouve des fortes tendances à l'abstraction logique et organisationnelle des systèmes de données, mélangée à des fascinations esthétiques et figuratives pour les images numériques. Dans ce contexte, les composantes visuelles et iconiques, dues aux potentialités des outils numériques de modélisation et visualisation, deviennent inévitablement centrales dans le processus de conception, à détriment des questions technologiques et mécaniques. Ce mélange risque d'amener les projets vers des utopies abstraites, vers une « dématérialisation » de l'architecture, dans laquelle la question tectonique n'a aucune place pendant la conception [RAZ08].



**Fig. 22** L'échelle de l'architecture impose des contraintes plus importantes que d'autres formes d'art et d'artisanat.  
Herzog et De Meuron, *Stade Olympique, Pekin (2008)*



**Fig. 23** La continuité conceptuelle est matérialisée dans la maquette à travers la résine de verre, qui peut être moulée dans une forme unitaire. A l'échelle réelle, la même continuité est impossible, il faut faire recours à un agencement complexe d'éléments discrets.  
P.cook et C.Fournier, *Kunsthau, Graz, Autriche (2001)*

### *Continuité et discontinuité*

Les formes complexes issues de logiques abstraites et générées à travers les outils numériques, si d'un côté peuvent induire une dématérialisation de la question architecturale, de l'autre côté elles peuvent amener, paradoxalement, à une redécouverte des questions constructives, car elles obligent à sortir des routines mécaniques et technologiques habituelles.

Par exemple, l'une des questions tectoniques fondamentales dans l'architecture Non Standard, est la gestion du rapport entre la continuité et la discontinuité : la continuité morphologique au niveau conceptuel, liée aux processus morphogénétiques de déformation, doit forcément être matérialisée (pour des raisons pratiques de production et construction) à travers des configurations complexes d'éléments discrets [Fig.23]. La façon dont les éléments constructifs sont matériellement réalisés et agencés entre eux déterminera le degré de continuité dans l'objet fini. La cohérence entre l'idée de projet et l'objet réel construit repose donc sur les moyens matériels de sa réalisation.

## 2c. Processus

Les caractéristiques spécifiques des approches théoriques à la morphologie et à la tectonique dans l'architecture Non Standard ont une influence déterminante sur le développement du processus même de conception [CON00]. Par rapport au processus « traditionnel », les caractéristiques le plus spécifiques que nous avons identifiées sont *l'utilisation extensive des outils numériques* et le fait qu'il s'agit de *processus collaboratifs et multidisciplinaires*.

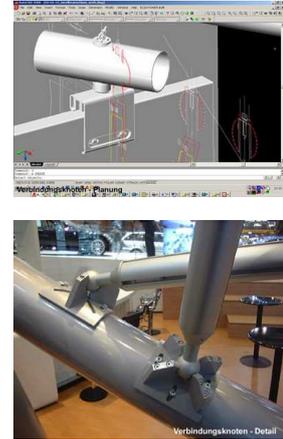
### Les outils numériques

Comme nous avons déjà expliqué, les outils numériques sont centraux dans l'architecture Non Standard, tant dans la conception (représentation et génération) que dans la production (machines à contrôle numérique) [CON02] [VER02]. Ce constat implique qu'il y a un *médium* entre le concepteur et la forme finale, car le concepteur n'agit pas directement sur la forme mais sur une logique structurelle qui est transformée en forme par un système, géré à l'aide des outils informatiques. Nous discuterons plus largement cet aspect dans la suite (chap. I.4 et III). En même temps, les outils numériques permettent une continuité de langage et de transmission des informations entre les différentes phases du processus et entre les différents acteurs qui en participent [ARC04]. Par exemple, l'architecte peut générer un modèle numérique pour élaborer les formes et les espaces et le même modèle peut être utilisé ensuite, par exemple, par l'ingénieur pour concevoir la structure résistante, ainsi que par le producteur pour la réalisation des composants. Les pavillons conçus pour la maison automobile BMW par le bureau d'ingénierie allemand *Bollinger et Grohmann* (en collaboration avec différents architectes) constituent un exemple de l'utilisation des outils numériques pour la modélisation, la représentation et la production [fig.24].

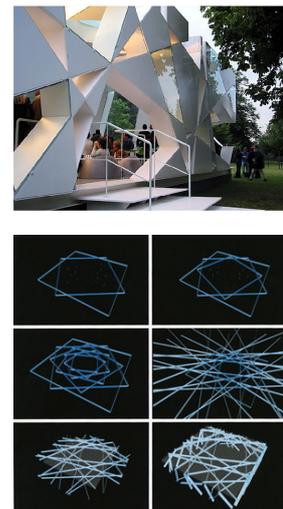
### Multidisciplinarité

L'architecture non Standard, en raison de la complexité formelle et procédurale qui présente, requiert la collaboration de plusieurs spécialistes, experts des différentes disciplines concernées (urbanisme, matériels, mécanique, acoustique, pour parmi les autres) [COL06]. La conception Non Standard est donc un processus collectif et collaboratif, dans lequel le résultat final est issu de la participation de différents acteurs. Un tel système constitue un terrain fertile d'expérimentation pour des collaborations et des imbrications entre disciplines qui occupent actuellement des domaines lointains et parfois antithétiques.

En particulier, la matérialisation des architectures Non Standard passe forcément par une collaboration étroite entre architecte et ingénieur [CAC04]. C'est en fait l'ingénieur (ou, mieux, une équipe d'ingénieurs) qui, dans les pratiques contemporaines, est le médiateur effectif entre les idées formelles et spatiales des architectes et leur matérialisation. Plus en détail, le rapport entre architecture et ingénierie est sollicité par les complexités morphologiques du Non Standard sur deux aspects fondamentaux : en premier lieu, sur les solutions structurelles, car pour faire résister les formes imaginées des solutions structurelles innovantes et créatives sont nécessaires. Deuxièmement, sur les méthodes d'analyse et de vérification mécanique, car les formes libres sortent des standards de calcul traditionnels basé sur les systèmes « colonne et poutre » ou « plaque » : le projet structurel des architectures Non Standard est une véritable conception et non pas une simple vérification mécanique. Les formes complexes rendent donc nécessaire, pour leur réalisation, une stricte collaboration entre architecte et ingénieur depuis le début de la conception, ce qui permet un fertile rapprochement des questions artistiques/esthétiques et de celles scientifiques/ technologiques, des questions appartenant actuellement à des mondes disciplinaires séparés et indépendantes. Un nouveau système de relations entre spécialistes est donc aujourd'hui nécessaire, tant pour ce qui



**Fig. 24** Les outils numériques sont essentiels tant dans la modélisation que dans la production de l'Architecture Non Standard.  
*B. Franken et Bollinger + Grohmann, BMW pavilions, Allemagne (2000)*



**Fig. 25** Conception multidisciplinaire architecture ingénierie.  
*T. Ito + C. Balmond Serpentine Pavilion, London (2002)*

concerne la collaboration effective depuis le début du processus de conception, que pour ce qui concerne les outils de modélisation et représentation qui sont utilisés pendant cette collaboration.



**Fig. 26** Collaboration creative entre architecture et ingénierie dans l'élaboration morphologique.  
*T. Ito + M. Sasaki,*  
*Crematorium, Gifu, Japon*  
*(2006)*

Une approche collaborative entre architecte et ingénieur depuis les premières étapes de la conception a déjà été à l'origine de plusieurs projets Non Standard, dans lesquels la question formelle est développée avec cohérence par rapport aux questions mécaniques ou géométriques [SAS07]. Parmi ces projets, nous voudrions signaler, par exemple, certains œuvres de l'architecte T.Ito, comme le pavillon *Serpentine Pavilion* [Fig.25], conçu avec l'ingénieur C.Balmond [BAL02], ou le *Crematorium de Gifu* [Fig.26], conçu avec l'ingénieur M.Sasaki. De même, le bureau d'ingénierie allemand Bollinger et Grohmann [Fig. 24, 23, 13] a collaboré avec les majeurs architectes du monde pour la réalisation de certains des plus importants projets contemporaines Non Standard.

## I.1/3 L'AVANT-GARDE NON-STANDARD

### 3a. Racines théoriques

Le phénomène de l'architecture Non Standard, en raison de la particularité et de l'excentricité des formes et des matériaux utilisés (apparemment « gratuits » et inutilement coûteux) pourrait être interprété comme un banal « délire formel » de la part des architectes contemporains, qui, en manque d'idées plus pragmatiques et en exploitant les progrès des technologies constructives, essaient d'étonner et émerveiller le public avec des formes jamais vues auparavant. On sait que l'architecture est une forme d'artisanat qui va bien au-delà des pures exigences fonctionnelles pour toucher les domaines de la symbolique, de la représentativité ou même de l'économie et de la politique; on voit clairement que certaines des expériences Non Standard peuvent rentrer dans une dynamique qu'on pourrait appeler d'« iconicité ». Une telle dynamique s'intéresse principalement aux effets visuels et symboliques de l'architecture et néglige au contraire les questions constructives ou technologiques en tant que exclusivement utilitaires, le but exclusif étant celui de construire quelque chose de bizarre qui puisse devenir une « icône », une image symbole (où une sculpture-symbole). Au contraire, nous identifions dans l'architecture Non Standard des expériences bien plus cohérentes et significatives, qui semblent issues de la volonté de « mettre à jour » l'architecture et la construction par rapport aux enjeux scientifiques, technologiques et sociaux de la société contemporaine [BAU00]. Des racines profondes (explicites ou implicites) pour les expérimentations morphologiques et tectoniques de l'architecture Non Standard, sous la forme de métaphores, suggestions et influences, peuvent être en fait retrouvées dans les idées et les théories les plus significatives issues des milieux de la science, de l'art et de la technologie du XXème siècle [ARC04].

#### Espace

En particulier, certains concepts élaborés dans le domaine scientifique pendant le dernier siècle ont modifié en profondeur la *notion d'espace*, ce qui a forcément eu une influence sur la pensée architecture, car *l'espace est la donnée fondamentale de l'architecture*. Même si aujourd'hui l'utilisation du concept d'*espace* dans le domaine architectural semble évidente, il n'est que dans les années 40 du siècle dernier que ce mot a commencé à être employé dans ce contexte [CHO07], sans doute en réaction à l'intérêt suscité dans cette période par les nouvelles découvertes et théories scientifiques autour de ce concept. Dans ce contexte, la question théorique qui nous semble avoir su engendrer le changement le plus radical est la théorie de la relativité d'Albert Einstein. Les influences indirectes (en tant que suggestions ou métaphores) du système de la relativité, en particulier pour ce qui concerne *l'unité du temps et de l'espace* et *la continuité de la matière* semblent avoir une implication directe dans la théorie architecturale Non Standard. L'idée d'un espace absolu et vide, rempli d'objets, est substituée par l'idée d'un espace continu, constituée de « champs » d'intensité différente, variables dans le temps ; le constituant fondamentale de la théorie physique n'est plus un objet matériel inertiel mais un ensemble de « champs » variables [LYN99]. Il est évident comme une telle vision de l'espace doit forcément (plus ou moins directement) amener à un questionnement sur la matérialité architecturale et sur la construction, en ouvrant la voie à des expérimentations sur les espaces et les formes continues et sur des systèmes constructifs différents de l'assemblage d'un ensemble de composants élémentaires discrets. De plus, le champ temporel rentre lui aussi dans cette continuité: le temps n'est pas une entité abstraite, immuable et indépendante, mais il fait partie de la réalité physique unitaire autant que l'espace et les champs de force dont celui-ci est constitué. Cette unité d'espace, matière et temps introduit une nouvelle



Fig.27 La forme comme résultat de l'interférence entre deux champs physiques.  
B. Abbot, *Interference pattern* (1952)



Fig.28 L'œuvre d'art comme « événement », issu du rencontre entre sujet et objet.  
S. Lewitt, *Open cube* (1974)

dimension dans le rapport entre un œuvre d'art et le public ou entre l'architecture et ses usagers : la dimension de l'événement [KW101]. Les objets architecturaux ne sont pas des simples contenants ni des scénographies, mais des éléments actifs, qui interagissent avec les usagers : *l'architecture est un événement*, résultat de l'interaction de l'homme avec les lieux. Le milieu de l'art, à différence de l'architecture (qui est limitée par les nécessités fonctionnelles ainsi que par l'échelle de ses œuvres), a la capacité d'être directement réactif aux changements de la pensée et de la société et peut proposer une interprétation critique de ces changements. Plusieurs expériences artistiques du XXème siècle peuvent être lues comme précurseurs de l'approche théorique qui propose aujourd'hui le Non-Standard dans le milieu architecturale. Dans l'Art minimal [Fig.28], par exemple, le concept d'interaction entre l'œuvre d'art et le public est l'élément fondamental, comme le déclare l'artiste R. Morris, en disant que la « simplicité de forme ne signifie pas nécessairement simplicité de l'expérience » [MAR04].

D'autres recherches pertinentes au milieu scientifique, comme celles en mathématique et en particulier en géométrie [DIC01], ont eu une influence pas négligeable dans le développement des conceptions d'espace qui sont à la base des expériences Non-Standard, non pas en tant que outils directement employables dans la pratique mais en tant que suggestions sur la nature de l'espace. Les *géométries non-euclidiennes*, par exemple, dont l'idée fondamentale est la mise en cause du principe de parallélisme, et donc de linéarité, comme fondamentale dans la description de l'espace, proposent des nouvelles bases théoriques pour le développement des formes architecturales, en fournissant des intuitions sur la nature de l'espace qui amènent à des résultats formels en nette opposition à la simplicité et linéarité des expériences modernes et post-modernes. Dans ce domaine, par exemple, la *topologie*, un système géométrique dont l'objet d'étude sont les relations entre points et non pas les figures, constitue une référence constante pour les modes d'élaboration formelle proposés par le Non Standard (comme nous l'avons décrit dans le paragraphe précédent).

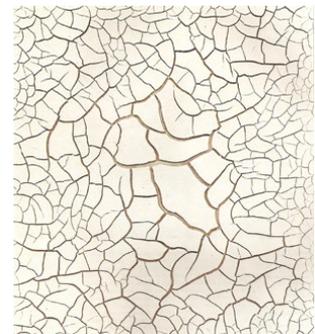
#### Forme et matière

L'espace n'est donc pas une extension de vide à remplir mais une interaction de champs de forces, dont l'être humain fait partie ; la matière n'est rien d'autre qu'un champ plus dense que les autres [LYN99]. La matière perd donc son altérité, typiquement occidentale (déjà à partir de Platon) à la forme : forme et matière ne sont pas deux entités indépendantes qui peuvent exister l'une sans l'autre, mais ils sont deux aspects du même phénomène unitaire. *La forme ne peut pas exister en soi même, abstraite d'un certain matériel dont elle est constitué, car une forme n'est que le résultat de l'interaction entre la matière et les champs de force qui l'entourent et la parcourent.* Une telle approche a été expérimentée dans le milieu des arts bien avant que dans l'architecture, à partir du mouvement des Impressionnistes mais surtout avec l'art Abstraite ou Informelle. Dans l'art on a assisté en fait, pendant le XXème siècle, à une *libération de la forme* des règles symboliques et canonisés. La matière semble plutôt prendre le dessus : la forme n'est traité que comme le résultat d'une action sur la matière. De plus, pendant les années plus récentes, dans le milieu scientifique les théories du chaos ou de l'auto organisation de la matière et de l'énergie suggèrent des logiques d'explication du réel fondamentalement différentes des logiques positivistes et déterministes. Des telles théories constituent des références tant organisationnelles que morphologiques importantes dans toute interprétation de la création formelle comme exploration des organisations complexes et pas prédéterminées. L'auto organisation de la matière, qui est soumise aux actions physiques particulières de chaque situation spécifique donne un résultat formel qui ne peut pas être prédéterminé.

**Fig.30** Réflexions sur la forme et la matière dans l'art du XXème siècle.



**Fig.30a** César, *Expansion n.14* (1970)

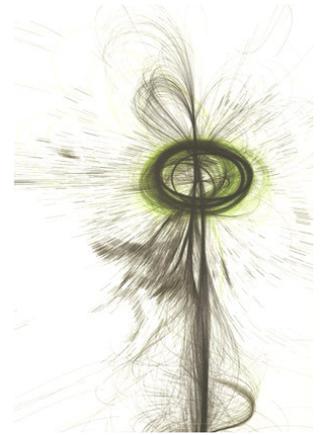


**Fig.30b** A. Burri, *Cretto G1* (1975)

Dans le même esprit, les outils numériques sont aujourd'hui utilisées pour générer des formes, d'une manière similaire que dans les expériences artistiques qu'on vient de décrire, avec la différence que la génération formelle n'est pas issue d'un processus matériel, mais d'un processus virtuel, d'une simulation numérique. Des expérimentations dans le domaine artistique sur la « *créativité numérique* » proposent des œuvres entièrement « conçues » par les machines. Le rôle du concepteur est celui de donner les règles de génération, qui seront couplées entre eux et élaborées pour donner origine à des formes qui ne sont pas prévisibles à partir exclusivement des règles de départ [Fig.31].

### 3b. L'avant-garde Non Standard

Le siècle XXème a été caractérisé par une extrême vitesse de changement, en particulier pour ce qui concerne les moyens techniques : considérons par exemple la production de la « Ford T », qui commence en 1908 (ce qui fait à peine un siècle) et inaugure le système « industriel » de production standardisée en série dans la chaîne de montage, un système qui a vite évolué et qui aujourd'hui est considéré déjà obsolète, par rapport aux moyens techniques (personnalisation des pièces, CAD/CAM, etc.), aux matériaux (plastiques, matériaux composites, etc.) mais aussi aux systèmes de distribution du travail et de la richesse (mondialisation, délocalisation) de la société contemporaine. Par rapport à ces changements, le milieu du bâtiment présente une extrême résilience, une lenteur de réaction vis-à-vis de l'innovation des matériaux et des techniques, comme il est évident à partir, par exemple, du constat qu'on commence à peine aujourd'hui à se conformer massivement aux principes de la préfabrication et de la production standardisée des pièces et des composants dans le milieu de la construction. A l'époque où ces principes étaient à l'avant-garde de la production industrielle, comme dans le cas de la Ford T en début du siècle dernier, le domaine de la construction était encore largement dominé par les pratiques artisanales. Malheureusement nous semblons avoir oublié que la production standardisée des composants ou les systèmes préfabriqués pour la construction, quand ils ont été proposés à telle époque, par exemple, par Le Corbusier (qui prenait la production des voitures comme exemple de l'efficacité à laquelle il fallait s'inspirer en architecture) semblaient quelque chose d'absurde et illogique par rapport au système de construction artisanale de l'époque [LEC23]. Nous avons l'impression d'assister au même phénomène aujourd'hui avec les propositions du Non Standard, qui semblent à premier vue lointaines du système courant de la construction, qui est en fait basée sur une production, des matériaux et des techniques qui sont déjà « obsolètes » par rapport aux plus récents moyens techniques similaires couramment utilisés dans d'autres domaines (industrie automobile ou design industriel, par exemple). Les architectures Non Standard explorent les possibilités d'une adaptation à l'échelle de l'architecture des systèmes productifs, technologiques et organisationnelles contemporaines, qui n'ont pas encore été reçus dans le milieu de la construction de masse. Pour cette raison nous pensons que l'architecture Non Standard présente des caractéristiques d'une *avant-garde*, dans le sens qu'elle est capable de proposer des réflexions, des suggestions et des exemples sur le futur possible de la construction.



**Fig. 31** Formes générées par les mouvements d'un réseau de neurones numériques.  
C. Reas, *Tissues* (2001)



1.2

## LE PROCESSUS DE CONCEPTION EN ARCHITECTURE ET INGENIERIE



## I.2/ 1 LA CONCEPTION SPATIALE

Les processus de conception en architecture et ingénierie constituent un cas particulier de conception, avec des caractéristiques spécifiques par rapport à d'autres typologies, comme par exemple la conception musicale, celle littéraire, ou celle sculpturale, parmi d'autres ; en même temps, évidemment il partage aussi des caractéristiques avec ces autres typologies de conception dans les aspects plus générales. Nous allons commencer notre description avec une définition unitaire de la conception dans son sens plus ample, pour passer ensuite à la mise en évidence des caractéristiques spécifiques des processus de conception en architecture et ingénierie.

### 1a. La conception

On peut définir la *conception* comme « un processus dirigé vers un résultat qui n'existe pas encore » [BOR02] : c'est une action qui correspond à une création originale de quelque chose de nouveau, comme on peut le comprendre si l'on revient au sens premier de la conception "maternelle", où la conception est le commencement d'une nouvelle existence, ou, si l'on se réfère à son sens intellectuel, pour lequel concevoir signifie saisir et maîtriser par l'esprit. La conception concerne donc toute création intellectuelle originale et elle se manifeste dans tous les domaines d'expression humaine. H. Simon [SIM96] a défini la conception en opposition à la science : la science étudie les lois de la nature et son but est d'accroître la connaissance sur la réalité, par contre la conception agit sur les artefacts humains et son but est le contrôle sur cette réalité.

Le processus de conception en anglais est défini par le verbe *design*, qui n'a pas de traduction directe en français. Le verbe *design* définit un processus créatif, qui a pour objectif la modification matérielle de l'état existant, à travers la conception d'un objet physique, qui doit répondre à un ensemble de besoins, en réponse à un ensemble de contraintes. J.C. Jones a donné une définition qui nous semble bien synthétiser la qualité principale du *design*: il s'agit d'un processus qui vise essentiellement à « amorcer un changement dans les artefacts humains »<sup>1</sup> [JON92]. *Design* est aussi un nom, qui désigne le résultat de cette action (le projet) ainsi que l'objet réalisé. En italien le verbe *design* est traduit par *progettazione* et le nom *design* par *progetto*, en français *projet*, ce qui met l'accent sur le fait que la conception est une anticipation opératoire et ce qui nous renvoie ainsi au mot français *dessein* (en espagnol *diseño*, ce qui traduit *design* dans cette langue), qui, lui aussi, exprime principalement dans la conception une volonté d'action. B. Lawson a bien exprimé cette caractéristique fondamentale en écrivant que « les concepteurs sont censés agir »<sup>2</sup>. [LAW97]

### 1b. La conception en architecture et ingénierie

Afin de bien clarifier les spécificités du processus de conception en architecture et ingénierie (et design industriel) par rapport à d'autres formes de conception créative (littéraire, artistique, scientifique, etc.) nous avons identifié certaines caractéristiques qui lui sont propres:

#### Matérialité

En partant directement de la définition de J.C. Jones on identifie la première caractéristique importante de la conception en architecture et ingénierie: son objectif est la conception et le projet d'un ou plusieurs *objets physiques* (artefacts) à réaliser matériellement, grâce à une certaine technologie. Par rapport à la conception artistique, qui implique aussi une réalisation

---

<sup>1</sup> "Initiate change in man-made things" [JON92]

<sup>2</sup> "Designers are expected to act" [LAW97]

technologique et matérielle, l'échelle des œuvres de l'architecture et de l'ingénierie pose des problèmes mécaniques et physiques/technologies très spécifiques et qui revêtent un rôle déterminant dans le processus de conception. On a pleine conscience de l'existence de tout un courant critique qui voit l'aspect matériel de l'architecture comme non déterminant, en considérant le projet réalisé comme une des multiples formes possibles de celui-ci, qui n'a pas plus de « réalité » que, par exemple, sa représentation sous la forme de dessin ou de maquette. Nous partageons plutôt le point de vue que l'architecture n'est telle que dans sa présence physique. La question du rapport entre l'idée, le projet et l'objet réalisé est une des questions fondamentales du débat architectural, que nous n'allons pas développer dans ce chapitre de façon indépendante, mais qui est plutôt une des questions fondamentales que l'on cherche à clarifier avec ce travail de thèse.

### *Besoins et contraintes*

Un processus de conception en architecture et ingénierie est enclenché en réaction à un état de *nécessité*, afin de satisfaire des besoins aussi bien physiques que spirituels (dont l'esthétique, par exemple) et donc avec des requêtes fonctionnelles bien définies, ce qui introduit un ensemble très puissant de contraintes. Cette caractéristique le différencie, par exemple, des processus de conception dans les beaux arts, qui naissent essentiellement pour exprimer une certaine idée ou sentiment ou émotion de la part de l'artiste : les objets d'art « pur » (en opposition aux arts appliqués) sont dépourvus par définition de toute fonctionnalité. On peut considérer la conception architecturale comme une forme d'art appliqué qui s'intéresse spécifiquement aux objets à grande échelle. Il s'agit évidemment d'un processus de conception créative, mais en raison de la présence déterminante des nécessités à satisfaire et des contraintes à respecter, dans le processus de conception en architecture et ingénierie l'équilibre entre les opérations « imaginatives » et les opérations « actualisatrices »<sup>3</sup> est très spécifique. Tous les processus créatifs sont évidemment soumis à des contraintes, mais la part que ces contraintes occupent dans la conception architecturale est plus importante que dans la conception purement « artistique ». En parlant d'une différence entre imagination et actualisation nous voulons simplement souligner l'importance des facteurs contraignants dans la conception en architecture et ingénierie, mais nous sommes totalement conscients de l'ambiguïté de cette distinction, car on sait très bien que les situations où on a le plus de contraintes, ce qui nécessiterait le plus de logique, sont au contraire celles qui requièrent le plus d'imagination. Dans ce cas, l'imagination devient *créativité*, car elle concerne, comme le dit le terme même, la possibilité de *créer* ce qu'on a imaginé : la création suppose un passage à l'action qui n'existe pas dans la pure imagination.

### *Qualités formelles et spatiales*

Le processus de conception en architecture et ingénierie concerne essentiellement des qualités formelles. Il s'agit de l'élaboration d'une certaine *forme* (à être réalisée matériellement) qui doit répondre à l'ensemble des besoins et des contraintes : « le but ultime du *design* est la forme »<sup>4</sup> [ALE64]. La définition du terme forme n'est pas univoque : nous appellerons *forme* la position et l'apparence des propriétés matérielles des objets<sup>5</sup> ; dans ce même sens nous utiliserons aussi le synonyme de *morphologie*. La morphologie est parfois appelé aussi *configuration spatiale* ; nous utiliserons aussi ce terme, surtout en relations aux agencements d'éléments dans l'espace. Le terme *spatiale* introduit la notion de tridimensionnalité et il fait

---

<sup>3</sup> Les opérations imaginatives concernent la création d'hypothèses virtuelles possibles ; les opérations actualisatrices concernent la vérification et la sélection des hypothèses en relation avec les contraintes. Des opérations de ce genre sont définies dans les sciences cognitives « pensée divergente » (imagination) et « pensée convergente » (limitation).

<sup>4</sup> « The ultimate goal of design is form » [ALE 64]

<sup>5</sup> Au contraire, le terme « *figure* » sera utilisé comme synonyme d' « *image* », c'est-à-dire *forme bidimensionnelle*.

référence à une qualité fondamentale : *le véritable centre d'intérêt de la conception architecturale ne sont pas les formes en eux-mêmes mais l'espace qui se trouve entre elles*. La conception sculpturale, par exemple, s'occupe elle aussi de formes tridimensionnelles, mais moins de l'espace qui est autour ou parmi ces formes, qui est la donnée déterminante en architecture. Cependant, l'utilisation du terme espace dans le milieu architectural est très récent, il n'a en fait commencé que aux années 20 avec le Mouvement Moderne. Il s'est ensuite généralisé autour des années 40 « lorsque la locution « arts de l'espace » a remplacé, sans s'y substituer, la locution « arts du dessin » consacrée par Vasari » [CHO07]. Certaines découvertes scientifiques comme la théorie de la relativité ont eu sans doute une influence sur cette nouvelle notion d'espace. Aujourd'hui, nous identifions donc l'espace comme la donnée essentielle et spécifique de l'architecture et de l'ingénierie. Pour cette raison nous appellerons la conception dans ces domaines *conception spatiale*. Cependant, il nous semble important de faire remarquer que, pendant le processus de conception, on ne travaille pas sur l'espace directement mais on agit sur les formes pour modifier l'espace. La forme, ou mieux la morphologie, pour utiliser un terme moins ambigu, est donc l'objet véritable sur lesquels les concepteurs agissent pendant la conception.

Le constat que la morphologie et les propriétés spatiales constituent l'objet essentiel dans la conception en architecture et ingénierie rend évident que les opérations visuelles jouent un rôle fondamental dans les processus créatifs spatiaux, tout comme les outils de représentation, qui sont les outils privilégiés d'interaction pour les opérations de nature visuelle.

## 1.2/2 CONCEPTION ET RESOLUTION DES PROBLEMES

On a vu que la conception spatiale en architecture et ingénierie présente des caractéristiques spécifiques; pour synthétiser en quelque ligne, on pourrait la définir comme un processus créatif qui concerne des qualités spatiales et qui est finalisée à la production d'un objet matériel à grande échelle, capable de répondre au mieux aux besoins qui en sont à l'origine. D'un point de vue cognitif, un tel processus peut être analysé et modélisé comme un *processus de résolution de problème* d'un genre particulier, qui présente certaines caractéristiques spécifiques dans les mécanismes et les stratégies utilisées. Il s'agit d'un processus de résolution heuristique, car il n'y a pas de solution prédéfinie, dans lequel les stratégies de résolution « divergentes », basés sur les essais et erreurs et sur le raisonnement pas cas sont prédominantes. Un tel processus est forcément séquentiel et itératif car il procède à travers des approximations successives qui convergent en boucle vers la solution finale ; cette cyclicité instaure un processus dialectique entre le concepteur et l'objet en voie de conception.

### 2a. La conception spatiale comme processus de résolution de problèmes

#### *Optimisation « heuristique »*

La solution cherchée par le concepteur pendant n'est pas prédéterminée, il n'y a pas une solution unique mais au contraire un nombre infini de solutions possibles : le concepteur choisira celle qu'il considère la meilleure en relation aux contraintes données. La solution cherchée n'est pas donc la solution optimale (dans le sens mécanique ou mathématique du terme : une et une seule solution possible pour un optimum absolu) mais la solution la plus satisfaisante, la meilleure possible en relation aux nécessités et aux contraintes (mathématiquement, un optimum relatif). De plus, les problèmes à résoudre sont des problèmes « hantés »<sup>6</sup> car les conditions aux limites sont toujours incomplètement formulées : l'énoncé du problème est déjà une amorce de solution. On pourrait parler d'un processus d'optimisation « heuristique », car les chemins à suivre se clarifient pendant le développement de la solution, et « subjective », car les choix personnelles du concepteur ont un poids déterminante.

#### *Essais et erreurs et raisonnement par cas*

Le processus de conception spatiale procède à travers des stratégies de « essais et erreurs » dans lesquelles on teste des solutions possibles pour exclure celles qui ne sont pas satisfaisantes, sans savoir a priori si les solutions testées peuvent être ou non satisfaisantes. Les opérations déductives ont une place minoritaire dans une telle logique de résolution, qui avance plutôt à travers le raisonnement *analogique* en faisant référence aux archives de « précédents » stockés dans la mémoire du concepteur, ou dans des archives externes (photos, livres, revues, par exemple). Sur le fonctionnement du principe d'analogie et sur son rôle déterminant dans la conception architecturale, ce qu'écrit l'architecte Rom Koolas dans son livre SMLXL (considéré dans les années 90 comme le nouveau manifeste de l'architecture contemporaine) est intéressant :

« ANALOGIE : Première règle : les concepts sont connectés par l'analogie. Il n'y a pas de façon de décider a priori si une analogie est bonne ou mauvaise, car à un certain niveau tout est connecté à tout le reste [...] »  
[OMA98]

L'analogie, fondamentale dans la conception architecturale, est un mécanisme cognitif qui fonctionne en duo avec la stratégie des essais et erreurs. L'analogie est un mécanisme ouvert, divergent, qui multiplie les connexions et les possibilités : on explore des hypothèses pas définies à

---

<sup>6</sup> « wicked problems » ou « ill-defined problems » en anglais

priori et qui faut vérifier pour savoir si elles sont valables ou pas et donc, les accepter ou les refuser.

### Processus séquentiel et itératif

Le processus de conception spatiale est séquentiel car il est constitué par des *étapes* fondamentales d'évolution : premières idées, définition, détails. Il s'agit d'un processus itératif, récursif, constitué par des boucles successives d'*analyse, synthèse et évaluation* pour la solution de sous-problèmes à travers lesquels la solution évolue en convergeant vers la solution finale. Dans chaque boucle, de plus en plus de connaissances caractérisent la solution, qui devient ainsi de plus en plus raffinée. Au fur et à mesure que le processus avance des solutions partielles sont définies, des «changements conceptuels»<sup>7</sup> (ce que d'un point de vue cognitif on appellera les « étapes critiques » -voir chap. 1.3-) de plus en plus détaillées, qui sont re-analysées et améliorées. J. Zeisel [ZEI81] propose un très intéressant modèle, bâti sur une analogie avec une spirale, pour décrire ce processus convergente et itératif [fig. 1].

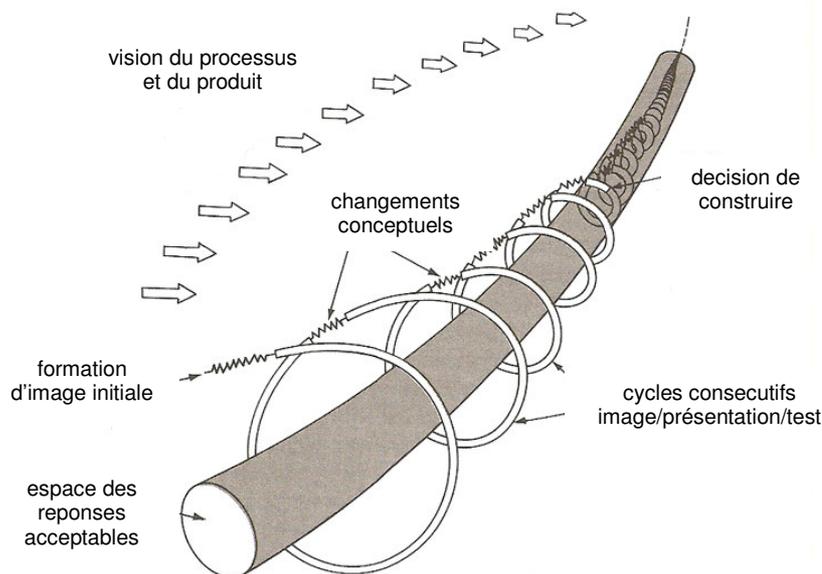


Fig. 1 La métaphore de la spirale, proposée par Zeisel pour modéliser un processus de conception [ZEI 81]

### Processus dialectique

Les boucles successives du processus de conception avancent à travers une interaction avec les « matériels de la situation »<sup>8</sup> [SCH83], ainsi que sur une interaction continue entre le concepteur et les dessins et schémas qu'il produit. R. Oxman parle de la « nature itérative et dialectique de la conception »<sup>9</sup> [OXM02]. Un dialogue s'instaure entre le concepteur et l'objet en voie de conception.

### 2b. Les stratégies visuo-spatiales

Le processus de conception en architecture et ingénierie peut être donc décrit comme un processus de résolution de problème ouvert, qui a pour solution un *objet spatial*. Même si il y a des exigences de nature différente (fonctionnelle, économique, technologique, etc.) qui entrent en jeu, les informations de nature non formelle doivent être forcément traduites dans

<sup>7</sup> "Conceptual shifts" [ZEI 81]

<sup>8</sup> « Design is a conversation with materials » [SCH83]

<sup>9</sup> « Iterative and dialectic nature of design thinking » [OXM02].

des qualités formelles et spatiales pour participer à l'élaboration de la solution, qui est toujours une solution spatiale : l'*élaboration d'une forme*. Une des opérations fondamentales dans les processus d'élaboration formelle et spatiale est le *raisonnement visuel*, définit "formation d'images" [ZEI81], par J. Zeisel, ou "voir comme" [SCH83] par D. Schon, parmi les autres. Le raisonnement visuel est basé sur des principes spécifiques, sur des stratégies de résolution qui lui sont propres et qui sont différentes des stratégies utilisées pour résoudre des problèmes de nature autre que spatiale. D'un point de vue cognitif, on sait (on l'expliquera en détail dans un prochain chapitre) que les processus de résolution de problème s'appuient principalement sur les ressources de la mémoire de travail. La mémoire humaine fonctionne à travers l'interaction de plusieurs composantes fonctionnelles, dont deux distinctes pour les aspects verbaux et pour les aspects visuo-spatiales. Une telle organisation se reflète dans la présence de deux stratégies distinctes qui peuvent être utilisées pour la résolution d'un problème : les *stratégies verbales* et les *stratégies visuo-spatiales* ; dans la conception architecturale les stratégies spatiales sont évidemment prédominantes. Il y a aussi une composante verbale et procédurale qui est constamment présente, mais la connaissance associée doit nécessairement être transformée en connaissance spatiale pour entrer dans la solution. En raison de l'importance du raisonnement visuel et des stratégies spatiales dans l'élaboration des qualités formelles, les représentations et en particulier le dessin, assument un rôle central dans la conception spatiale. On analysera leur rôle, ainsi que celui des différentes formes de représentation spatiale, dans le prochain paragraphe. Dans la suite nous allons décrire brièvement les stratégies d'élaboration formelle et spatiale qui sont couramment utilisées dans la conception en architecture et ingénierie : les stratégies spontanées, qui dépendent des mécanismes perceptifs, comme l'émergence visuelle, et les stratégies géométriques codifiées dans la pratique, comme les symétries, les grilles, les modules, etc.

#### *L'émergence visuelle*

Le principe de l'*émergence* [OXM02] est un principe fondamental dans les stratégies visuelles de résolution créative d'un problème spatial: certaines configurations formelles sont émergentes par rapport à d'autres. Toutes les figures ont la caractéristique d'être ambiguës, ce qui permet leur re-interprétation ; l'élaboration formelle procède à travers des re-interprétations successives des formes et des figures, dans un processus dialectique entre les représentations produites (les dessins, les maquettes, les schémas, etc.) et leur possibles re-interprétations : on peut parler de boucles perception/action (re-interprétation) à travers le dessin. L'émergence est basée sur des principes de perception purement formelle ainsi que sur le contenu cognitif issue des connaissances relatives à un certain domaine. Du point de vue de la perception formelle, les *propriétés de configuration* des formes et des figures et les *principes d'organisation perceptive* (synthétisés par les théories de la *gestalt*) sont à la base du mécanisme de l'émergence et plus en générale de l'élaboration formelle pendant la conception architecturale. On analysera en détail dans le chapitre 1.3 les lois qui organisent la formation des « unités perceptives », c'est à dire des objets qu'on perçoit comme unitaires et qui donc deviennent les éléments de base de nos perceptions. Ces lois proposent, en tant que facteurs d'unification en unités perceptives, des qualités qui semblent avoir un certain lien avec les logiques spatiales et visuelles utilisées pour la résolution d'un problème spatiale dans la conception, comment par exemple la prégnance, la tendance à la simplicité, la proximité, la ressemblance, la continuité, la fermeture [KAN80]. Des principes de ce genre partagent aussi une ressemblance avec certains aspects de la géométrie euclidienne, qui est en fait une géométrie intuitive et proche de la perception sensible spontanée de l'espace physique. Ces mêmes principes se retrouvent aussi à la base de la composition architecturale classique, jusqu'au Mouvement Moderne, dans

laquelle les régularités et les formes élémentaires sont dominantes. Une certaine idée d'unité entre la perfection mathématique et les lois d'organisation de l'esprit humain, déjà présente dans la pensée artistique depuis la période classique et la renaissance, est à la base de l'action formelle, comment Le Corbusier l'explique bien en défendant l'utilisation des formes primaires en tant que base de la grammaire architecturale : «*Les formes primaires sont les belles formes parce qu'elles se lisent clairement*» [LEC23]. On peut donc supposer la présence de certaines lois « universelles », innées, des invariants formels et géométriques qui structurent l'organisation de notre perception et ainsi l'élaboration des problèmes de nature spatiale.

Au côté de ces processus spontanés d'organisation formelle qui peuvent guider l'élaboration des formes, dans l'architecture et l'ingénierie sont souvent utilisées des systèmes régulateurs de nature géométrique, des *tracés régulateurs* dont le but originare est celui de garantir la mesure et donc, le contrôle analytique sur les formes.

### 2c. Les tracés régulateurs géométriques

L'importance des tracés régulateurs dans la conception architecture est parfaitement exprimée par Le Corbusier, qui affirme: «*L'obligation de l'ordre. Le tracé régulateur est une assurance contre l'arbitraire. Il procure la satisfaction de l'esprit.* » [LEC23]

Le mot géométrie vient du grec *geo* = terre et *metria* = mesure, en fait à l'origine elle naît comme un art pratique pour la mesure du territoire. La géométrie peut être définie comme la *science des figures de l'espace*: elle systématise sous forme analytique les qualités spatiales des objets ; elle définit les liens entre les propriétés quantitatives (mesurables, donc comparables) et celles qualitatives des formes spatiales. L'utilisation de principes géométriques dans l'élaboration spatiale naît en réponse au besoin de régularisation, comme recherche d'un aide pour garantir la rationalité et l'ordre à travers la mesure : le choix de certaines lois géométriques fournit une aide pour l'élaboration des formes, en donnant des indications sur le chemin à suivre. Comme représentant de ce genre d'approche à l'élaboration formelle de l'architecture on cite encore Le Corbusier, selon lequel les tracés mathématiques sont des « vérités réconfortantes », nécessaires pour la structuration efficace de l'élaboration formelle dans l'architecture. Les tracés régulateurs géométriques, comme les modules, ont eu un rôle fondamentale dans la conception architecturale depuis les ordres grecques jusqu'à nos jours. Il existe un lien très important entre géométrie et architecture, qui dépend de l'objet commune aux deux disciplines : l'espace et les qualités spatiales. Le concept de proportion est un concept mathématique fondamental qui fournit à l'architecture un système de règles et normes d'organisation formelle qui ont une fonction similaire à celle de la métrique dans la poésie et la musique. Le module est l'élément fondamental de la proportion ; le terme module est issu du latin « *modus* », qui signifie « mesure » : le module est un constituant élémentaire qui garanti la mesure de l'ensemble. Le nombre d'or ou le « modulator » qui en est issu sont des exemples de systèmes proportionnels utilisés pour l'élaboration des formes architecturales.

La géométrie est donc la science de l'espace ; cependant, la définition de la nature de l'espace n'est pas univoque et absolue. En fait il n'existe pas une seule géométrie possible, mais plusieurs systèmes géométriques ou langages géométriques différents, chacun plus ou moins efficace par rapport à un certain objectif à atteindre et chacun est lié à une conception spécifique de l'espace et de sa structuration. Si la géométrie élémentaire ou la géométrie euclidienne ont constitué les références de la pratique architecturale classique et moderne, des principes basés sur des logiques plus abstraites sont utilisées dans les morphogenèses de l'architecture Non-Standard. Dans ce contexte, on ne retrouve plus des principes

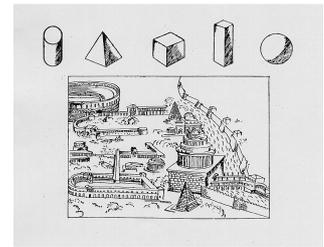


Fig. 2 Le Corbusier, croquis de la Villa Adriana, dans *Vers une architecture*

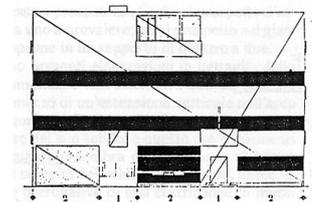


Fig. 3a Le Corbusier, façade de Villa Stein ; schéma proportionnel basé sur le nombre d'or

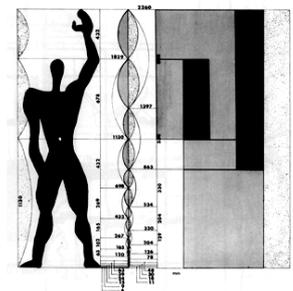


Fig. 3b Le Corbusier, Le modulator

Fig. 3 Proportions et modularité sont centrales dans la conception des formes dans l'architecture moderne

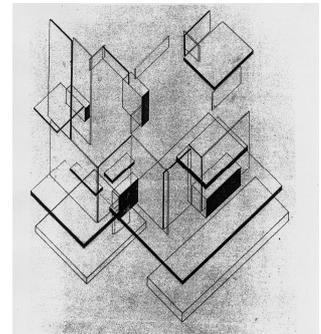
organisationnels issus de la géométrie élémentaire, mais des principes plus complexes, moins intuitifs et qui souvent ne peuvent être visualisées qu'à l'aide des outils numériques.

#### *La géométrie élémentaire*

Les principes géométriques utilisés dans le raisonnement visuel sont des principes de nature plutôt abstraite, ce sont des règles géométriques qui ont essentiellement une fonction organisationnelle. La question du rôle de l'apprentissage dans l'élaboration perceptive géométrique est une question ouverte : des études récentes ont démontré la présence de certains principes géométriques innés, indépendants de l'apprentissage [DEH06]. Ces principes « fondamentaux » pourraient être considérés des « universels » formels et spatiaux. Ils constitueraient une sorte de « géométrie élémentaire », présente dans l'esprit humain et indépendante de l'éducation et de la culture d'appartenance. Les universels identifiés sont des concepts très élémentaires, qui se rapprochent de concepts « topologiques » comme la proximité, l'inclusion, l'ouvert et le fermé, parmi les autres. J. Piaget décrit la présence de concepts de ce genre dans les premières étapes de la construction des mécanismes d'élaboration perceptive chez les enfants [PIA67]. On peut faire l'hypothèse d'une relation entre certains concepts géométriques élémentaires et universels et les lois d'organisation perceptive ; ce qui aura une influence sur les logiques géométriques utilisées dans la résolution d'un problème spatial et donc dans les modes d'élaboration formelle pendant la conception. Des études récentes semblent démontrer, par exemple, la reconnaissance spontanée d'une supériorité esthétique des formes construites selon les proportions du nombre d'or [HOL07].

#### *La géométrie euclidienne*

Avec les géométries spontanées qu'on vient de décrire, la géométrie élémentaire est un système géométrique essentiel dans les tracés régulateurs utilisés en architecture. La géométrie euclidienne est la géométrie qui étudie les propriétés fondamentales des figures du plan et de l'espace selon des principes basés sur les cinq postulats d'Euclide. Il s'agit d'un système déductif, basé sur un ensemble d'axiomes à partir desquels on déduit toutes les propriétés ou opérations. Le postulat fondamental est celui des parallèles, qui établit que deux lignes parallèles ne se croisent jamais, ce qui permet de modéliser un espace simple et « plan ». L'espace euclidien est donc un espace qu'on peut définir comme « physique » puisqu'il est proche de l'espace de l'expérience sensible et de la perception : ses objets (point, droite, plan, angle) et ses opérations (translation, rotation, par exemple) sont intuitifs et évidents, ils peuvent être visualisés et manipulés avec assez de simplicité parce que on peut les rapprocher d'expériences réelles qu'on a vécues dans l'espace naturel, comme par exemple les mouvements des corps rigides. Ce qui la différencie des géométries plus élémentaires est le fait qu'il s'agit d'une géométrie métrique : le concept de distance est fondamental. La géométrie euclidienne a un rôle fondamental dans la composition architecturale classique et moderne, comment on peut le déduire des exemples de Mies van Der Rohe, du De Stijl, ou de Le Corbusier, parmi beaucoup d'autres [fig.2] et [fig.3]. L'importance des formes simples et élémentaires dans l'idée formelle en architecture est bien attestée, par exemple, par l'architecture de A. Rossi, qui est structurée sur des principes logiques et organisationnels centrés sur les usagers, sur les flux d'énergie humaine qui se rencontrent et qui donnent vie aux bâtiments mais qui, au niveau formel, se transforment en combinaison de formes simples et standardisées, presque solennelles dans leur rigidité apparente.



**Fig. 4a** T. VanDoesburg, contre-construction (Analyse de l'architecture) (1923)



**Fig. 4b** A. Rossi, Teatro del mondo, Venise, Italie (1981)

**Fig. 4** Géométrie euclidienne et architecture moderne

## 1.2 /3 CONCEPTION ET OUTILS DE REPRESENTATION

Comme l'explique très clairement E. Arieli dans son texte « Pensiero e progettazione », une *représentation* est la *description* d'un objet, d'une situation ou d'un concept à travers la mise en évidence de ses aspects (ou de ses relations) significatifs. Plusieurs types d'artefacts peuvent être définis comme des « représentations » : un plan, une maquette, un dessin, une formule mathématique, un texte. Dans ce sens, elles sont des « prothèses » de notre pensée, car elles facilitent la mémorisation, l'observation et la communication des phénomènes [ARI03].

On a vu que la conception en architecture et ingénierie est un processus de résolution de problèmes de nature spatiale, essentiellement basée sur des opérations de raisonnement visuel qui procèdent de façon récursive à travers un « processus de re-représentation » [OXM97], dans lequel les idées spatiales sont élaborés, représentés, re-élaborés, re-représentés en boucle. Dans ce contexte, un rôle fondamental est donc assumé par les *outils de représentation visuelle*, qui permettent d' « externaliser » les images mentales qui sont en train d'être élaborées par le concepteur, en donnant ainsi la possibilité d'une nouvelle interprétation, à travers des mécanismes comme celui de l'émergence. Plusieurs types de représentations sont utilisés dans la conception spatiale, mais les plus importants sont ceux qui sont *figuratifs*<sup>10</sup>, c'est à dire ceux qui permettent de représenter des qualités formelles sur un support bidimensionnel : les *dessins* [fig.4] et [fig.5]. Dans le processus de conception le dessin est fondamental et il assume un rôle actif, qui va bien au delà de la simple reproduction de ce qui se passe dans la tête du concepteur, car il instaure une relation dialectique avec celui-ci : le processus de conception est un constant aller et retour entre les images mentales du concepteur et les dessins qui sont produits et re-élaborés en conséquence. D. Schön [SCH83] a défini la conception spatiale comme une « conversation avec le dessin »<sup>11</sup>.

On verra dans la suite que les maquettes réelles à l'échelle sont un autre outil important de représentation, mais elles ont une place moindre (sauf dans certains cas) par rapport au dessin, même si elles sont capables de transmettre des informations spatiales déterminantes sur la cohérence tridimensionnelle des objets en voie de conception. Enfin, on parlera des outils de représentation numériques utilisés dans la conception spatiale, qui ont désormais dépassé leur rôle originale d'outils de représentation pour devenir outils d'élaboration formelle et modélisation mécanique ou fonctionnelle. On commence donc par décrire les spécificités du dessin en relation à la conception spatiale.

### 3a. Le dessin

Dans un sens global, dessiner signifie « laisser une empreinte ou trait sur un support au moyen d'un instrument, pour y transcrire une idée » [YAN05]. Le terme *dessin* désigne ainsi plusieurs activités qui peuvent être très différentes entre elles, dans les méthodes et les outils (matériels et intellectuels) de travail et selon le but pour lequel elles sont produites, comme on peut le comprendre en comparant dessin technique, dessin artistique, croquis, relevé, etc. Deux caractéristiques nous semblent essentielles dans le dessin. En premier lieu, le dessin est un moyen pour exprimer des informations (dans le cas de la conception spatiale, surtout des informations formelles et spatiales 3d) sur une surface bidimensionnelle. Deuxièmement, le dessin est une re-présentation, une description, une image d'un référent : un dessin est une forme de langage qui transmet des

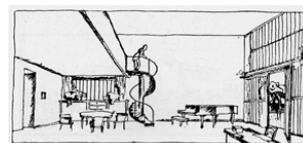


Fig. 5a Le Corbusier, maison « Citrohan » (pour ne pas dire Citroen), 1921



Fig. 5b Le Corbusier, croquis de la basilique de S. Sophie



Fig. 5c Le Corbusier, maison en série, 1922

Fig. 5 Le dessin dans la conception architecturale : croquis (5b) et perspective (5a et 5c)

<sup>10</sup> Une *figure* est une représentation bidimensionnelle d'une forme

<sup>11</sup> « Design as a conversation with the drawing. » [SCH83]

informations, codifiées selon un système de règles (qu'on peut comparer à une « grammaire »). Le dessin est donc fondamentalement un *outil de communication bidimensionnel*, qui a quelque fois le dessein de représenter la troisième dimension.

Les informations transmises et les systèmes de règles utilisées pour les transmettre sont de nature hétérogène, comme on peut le comprendre en observant la différence entre un dessin de détail pour la construction d'un bâtiment [fig., un croquis d'un sujet naturel ou encore un dessin satirique qu'on peut trouver sur la presse. Chaque genre de dessin requiert l'élaboration d'informations qui sont à la fois visuelles et logiques/analytiques. Dans les différentes typologies de dessin (dans le cas de la conception spatiale, par exemple, dessin d'après nature, relevé, géométrie descriptive, perspective, pour en citer que les principaux) le rapport entre quantité et qualité des informations des deux genres varie: une projection orthogonale transmet plus directement des données analytiques que perceptives/visuelles, au contraire d'une perspective, qui reproduit les informations spatiales d'une façon très fidèle à la perception ; le buts et la « grammaire » des deux représentations sont différents.

Dans ce chapitre on cherchera à expliquer le rôle des différentes formes de représentation 2d dans la conception spatiale et les mécanismes cognitifs qui sont concernés.

#### *Le dessin dans le processus de conception*

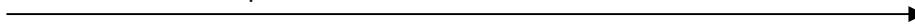
Les boucles d'analyse/synthèse/évaluation à travers lesquelles le processus de conception évolue vers sa version finale sont articulées autour des dessins produits au fur et à mesure, qui changent dans leur nature pour répondre aux différentes exigences des étapes successives de déroulement de la conception (préliminaires, définition, détails).

Plusieurs formes de dessin sont donc utilisées pendant le processus de conception, car chacune transmet un genre différent d'information [fig.4] et [fig.5]: entre les premières croquis conceptuels et les détails finals pour la construction il y a des différences fondamentales, même si il s'agit dans les deux cas de représentations figuratives bidimensionnelles [fig.7].

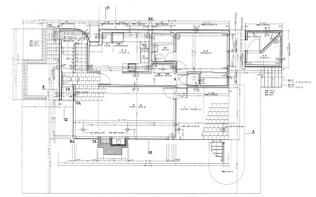
non-structuré  
ambigu  
abstrait  
vague  
...

structuré  
non-ambigu  
réaliste  
détaillé  
...

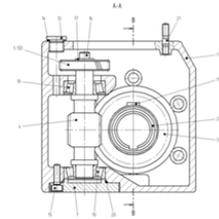
Processus de conception



Entre toutes les possibles déclinaisons du dessin, il nous semble important d'établir une première distinction fondamentale en deux grandes catégories (ou mieux familles) de dessin, par rapport aux langages utilisés, au genre d'informations qui sont traitées, aux habilités mises en jeux avec la pratique : la première famille, qu'on va appeler, un peu superficiellement, *dessin artistique*, est composée du dessin « à main levée », du dessin « à vue » ou du dessin d'après nature, des croquis; la deuxième famille est celle du dessin géométrique ou *dessin technique*. Ces deux familles constituent dans leur ensemble, en raison de leur complémentarité, la méthodologie de représentation essentielle de la pratique architecturale. Dans le dessin « artistique » les *figures* qu'on reproduit sont liées directement aux objets réels perçus, ce qui permet de mettre en relation les données figuratifs et les données perceptives ; dans le dessin technique (la géométrie descriptive, par exemple) les *figures* sont analysées et manipulées au niveau abstrait et analytique (principalement à travers des qualités métriques), ce qui permet



**Fig. 6a** R. Meier, plan du rez-de-chaussée, Smith House, (USA), 1967 [SCO94]

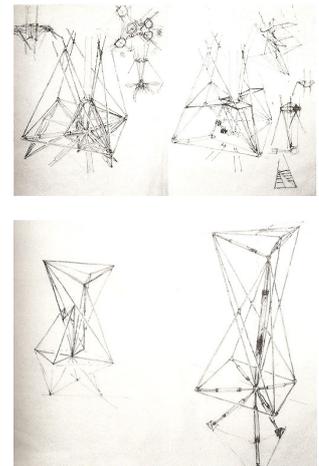
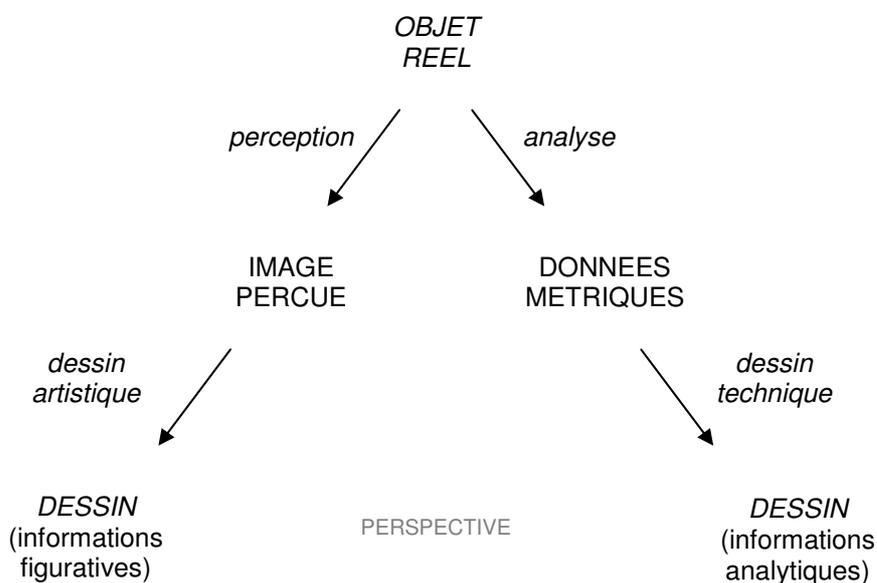


**Fig. 6b** Détail de construction

**Fig. 6** Le dessin technique dans la conception architecturale.

**Fig. 7** Les caractéristiques des dessins évoluent pendant le processus de conception spatiale, des premiers croquis abstraits aux détails pour la construction

de mettre en relation les données figuratives et les données analytiques. On voit clairement comment l'apprentissage, mais surtout la pratique, des deux activités (qui est à la base de l'éducation architecturale traditionnelle) peut amener à une expertise dans la compréhension complète des formes spatiales, en permettant de gérer de façon unitaire, au moyen des *figures*, les données perceptives et analytiques des qualités formelles d'un objet. Cette pratique est au fond un apprentissage à la quantification des perceptions : on apprend en fait à mettre en relation directe l'objet réel, l'objet perçu et l'information analytique. On verra que la perspective a un rôle très important dans ce contexte, car elle constitue un lien entre les données perceptives et celles qui sont analytiques. Il est évident que dans la pratique du dessin pendant la conception spatiale, les composantes « artistiques » et « techniques » participent ensemble à l'élaboration [fig.8] ; le choix de traiter le dessin à travers ces deux familles est issu de la volonté de mettre en évidence les différences entre le genre d'opérations mentales qui sont mises en jeu dans les deux cas [fig.9].



**Fig. 8** V. Giorgini, croquis pour le projet « Walking Tall », 1982. Pendant l'élaboration formelle, les dessins produits contiennent tant des informations figuratives (croquis) que des informations analytiques (géométrie descriptive) : la pratique du dessin est le lieu de rencontre entre les informations spatiales de nature différente (figurative et analytique)

### Le dessin artistique et les croquis

On considère dans la famille du dessin artistique toutes les formes de dessin qui ne sont pas issues de l'élaboration analytique mais qui sont le résultat de la simple reproduction d'une image (physique ou bien mentale). Le dessin du vrai, c'est-à-dire la reproduction exacte des images du monde physique, issues des données fournies par notre perception, constitue la caractéristique essentielle de ce que nous identifions comme dessin artistique. La pratique de cette forme de dessin repose donc sur l'élaboration perceptive des qualités formelles perçues : il faut représenter la réalité exactement comme on la voit, afin d'obtenir un dessin qui, en le regardant, puisse donner une image, une figure, la plus proche possible de l'image qu'on percevait directement de la réalité. D'un point de vue cognitif, pour pouvoir représenter fidèlement ce qu'on voit il faut limiter au minimum la présence de contenus autres que formel (symbolique et analytique) dans la perception des formes : il s'agit d'un processus qui très souvent est décrit comme une expertise « à voir », mais qui consiste en fait dans l'expertise à percevoir les formes spatiales dans leurs seules propriétés figuratives, en oubliant ce qu'on connaît sur les propriétés analytiques, symboliques, fonctionnelles des objets observés. A ce propos, l'exercice proposé par B. Edwards [EDW80] est très intéressant : il s'agit de reproduire le même dessin au trait (un Portrait de Igor Stravinskij réalisé par Picasso) d'abord

**Fig. 9** Le dessin « artistique » (dessin à vue, à main levée, croquis) est construit à partir des données figuratives des objets (l'image perçue) ; le dessin « technique » est construit à partir des données analytiques et métriques des objets. Evidemment dans la pratique de dessin ces deux caractéristiques sont toujours mélangées : un croquis contient aussi des données analytiques et une projection (par exemple, axonométrique) contient forcément des données figuratives.

normalement et après en retournant l'image de 180 degrés. On découvre que la reproduction du dessin renversé est beaucoup plus fidèle à l'original : en retournant l'image à reproduire, elle perd la plupart de ses références « symboliques » pour rester une forme pure, ou mieux (car c'est une image bidimensionnelle) une figure ; ainsi, reproduire cette figure est plus simple, d'autant que notre main n'est pas distraite par des informations, symboliques ou analytiques, inutiles (et créant de la confusion) pour la reproduction de la figure.

Nous supposons que les croquis (déterminant dans la conception spatiale) peuvent être considérés une forme de dessin de nature artistique dont l'objet ce sont les images qui sont élaborées dans le monde mental du concepteur [fig.10]. Des études récentes dans le domaine des sciences cognitives [PUR98] semblent en fait montrer que les images mentales sont traitées et élaborées selon les mêmes mécanismes perceptifs qui structurent la perception des images du monde physique. A travers le croquis, le concepteur représente ce qu'il « voit » dans son espace mental ; plusieurs critiques appellent ce processus « regarder avec les yeux de l'esprit ». Nous avons déjà appelé ce processus, fondamentale dans l'élaboration spatiale, « formation d'images » [ZEI81]: ces images sont représentées à travers les croquis.

Dans le cas de la conception architecturale, les croquis ont donc un rôle fondamental et actif qu'on peut synthétiser en deux fonctions principales.

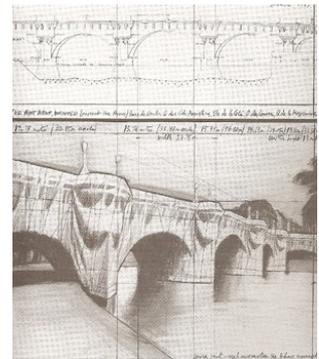
1. Les croquis sont un aide externe à la mémoire [SIM69] : ils externalisent le contenu des images mentales qu'on est en train d'élaborer [fig.10b], en le rendant plus faciles à analyser et évaluer par notre mémoire de travail qui, comme on expliquera en détail dans la suite (chap.1.3), a une capacité limitée.

2. Une fois que les idées sont externalisées sous forme de croquis, elles peuvent être regardées d'une façon nouvelle : les croquis sont des représentations figuratives et leur ambiguïté en permet la re-interprétation [OXM02] perceptive, selon des mécanismes dont on a parlé dans le paragraphe précédent (principalement le principe de l'émergence). Des tels mécanismes déterminent l'évolution de la forme vers la solution finale [fig.10c].

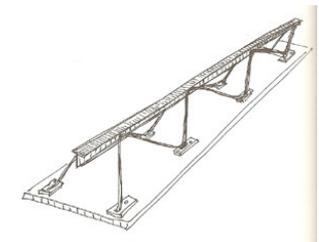
### *Le dessin technique et la géométrie descriptive*

Nous entendons ici par « dessin technique » la pratique de la géométrie descriptive [Fig.11]. La géométrie descriptive est une forme de géométrie qui permet de représenter de façon mesurable des figures de l'espace sur un ou plusieurs plans, selon des constructions géométriques basées sur les lois des projections. La géométrie descriptive est constituée de plusieurs types de représentations, qui sont utilisées dans les différentes formes de conception spatiale, en relation avec les informations qu'elles permettent de transmettre : diagrammes et plans dans l'urbanisme, plans et coupes dans l'architecture et dans l'ingénierie, axonométries pour le design industriel. L'opération fondamentale sur laquelle est basée la géométrie descriptive est la *projection*. Les projections orthogonales [fig.11a], une méthode élaborée par G. Monge dans le XIX siècle pour la production industrielle de pièces mécaniques, ont un rôle très important dans la conception architecturale traditionnelle, basée sur l'élaboration des formes à travers le plan et la coupe. Les axonométries [fig.11b] et, surtout, la perspective [fig.11c], sont fondamentales pour élaborer la cohérence tridimensionnelle des objets en voie de conception. La perspective en particulier détient un rôle central parce qu'elle constitue la liaison entre la vision et la géométrie analytique. En raison de cette possibilité de gestion unitaire des caractéristiques figuratives et analytiques qui permet la représentation perspective, elle détient un rôle fondamental dans la conception spatiale.

Le dessin technique est donc une forme de géométrie. La géométrie (dont on a déjà parlé dans le paragraphe précédent) peut être définie comme la *science des figures de l'espace physique*. En tant que *science*, elle

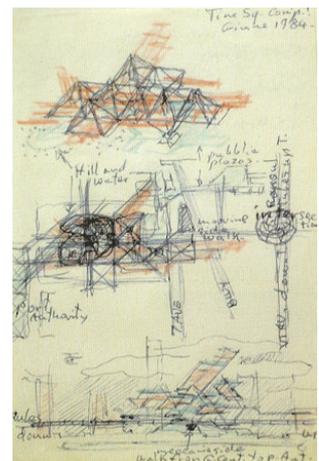


**Fig. 10a** Christo, *The Pont Neuf Wrapped, Projet pour Paris (1975-85)*



**Fig. 10b** C. Balmond, *croquis d'un détail constructif*

**Fig. 10** Le croquis dans la conception architecturale.



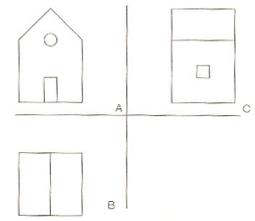
**Fig. 10c** V. Giardini, *croquis de conception du projet "Genesis" (1984)*

s'intéresse donc aux qualités analytiques des figures, les qualités métriques, ce qui veut dire mesurables (longueurs, angles, distances, etc.). Elles permettent de définir de façon claire et non ambiguë certaines propriétés des objets, à travers lesquelles il est possible de les décrire, de les manipuler et de les confronter. Les objets d'étude de la géométrie sont les *figures* : la science géométrique implique donc une manipulation figurative des qualités spatiales des objets étudiés. *La géométrie est constituée d'une science et d'une pratique : le dessin technique est la partie pratique de la science géométrique.* Ce genre de dessin, on l'a déjà expliqué, est très différente du dessin « artistique », tant pour ce qui concerne le but et le moyens de la représentation, que par rapport aux processus cognitifs qui sont mis en jeu : dans le dessin technique il ne s'agit pas de représenter quelque chose qu'on voit exactement comme on le voit, mais de représenter, selon des règles analytiques et formelles codifiées, quelque chose qu'on connaît dans ses caractéristiques organisationnelles et métriques.

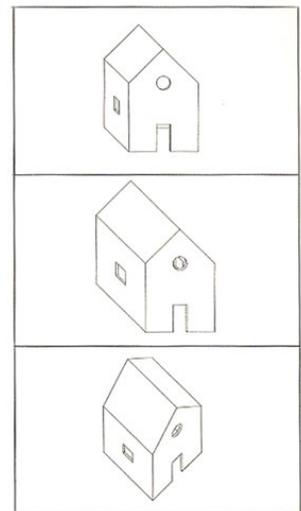
Dans la conception spatiale le dessin technique a deux fonctions principales. La première est la vérification de la possibilité d'existence réelle, dans le monde physique 3d, des objets imaginés. Dans le processus de conception, à travers le dessin géométrique, l'objet imaginé est confronté à sa possibilité de réalisation physique. On peut sans problème réaliser un croquis d'une forme qui ne peut pas exister ; en la dessinant selon les règles de la géométrie, on est obligé de comprendre sa nature spatiale réelle, c'est-à-dire on peut comprendre si ce qu'on a imaginé peut exister ou pas dans notre réalité physique tridimensionnelle. Le rôle d'outil pratique a été à la base du développement de la pratique géométrique : la naissance du dessin technique en architecture est liée aux exigences pratiques de la construction (comme on voit dans le cas de la stéréotomie -ou taille des pierres- ou du dessin technique du moyen age) en étant une représentation exacte et surtout mesurable (donc fiable et non ambiguë) des formes à réaliser.

La deuxième fonction du dessin technique est celle de langage pour l'échange d'informations : entre les différents spécialistes pendant le processus de conception et (ce qui est peut être encore plus important) entre les concepteurs et ceux qui doivent construire l'objet conçu.

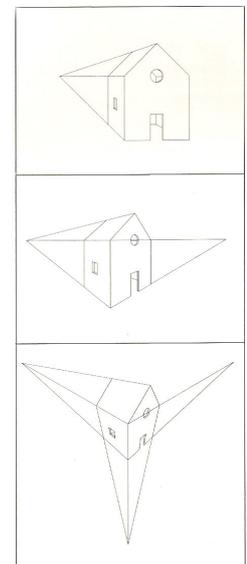
*Le dessin, tant pour ses caractéristiques « artistiques » que « techniques », détient donc dans la conception spatiale le rôle fondamental de médiateur entre le monde mental du concepteur et le monde physique de l'objet qui doit être construit.* D'autres formes de représentation sont possibles pour les idées des concepteurs, comme par exemple les maquettes.



**Fig. 11a** Projections orthogonales



**Fig. 11b** Projections axonométriques



**Fig. 11c** Projections perspectives (perspective)

**Fig. 11** La géométrie descriptive dans la conception architecturale. [SCO94]

### 3b. Les maquettes

Avec le dessin, les *maquettes réelles à l'échelle* constituent un outil de représentation fondamental dans la conception spatiale. Ce que nous appelons *maquettes* ce sont les modèles physiques tridimensionnels, d'habitude à l'échelle, d'un objet comme un bâtiment, une structure ou une pièce mécanique, par exemple. Le terme *maquette* est d'usage récent dans le vocabulaire architectural et il a substitué l'ancien terme *modèle*<sup>12</sup>. Ce terme est issu du mot « *macchietta* », du latin « *macula* » (tache) : le sens originaire de « petit tache » indique dans la maquette un croquis, une ébauche, un petit dessin préparatoire [SAR04]. En espagnol le terme est traduit avec *maquetas*, alors que en italien le terme est *modello* (modèle), ou *plastico*, un terme qui fait référence aux qualités plastiques, ou sculpturales, des représentations sous la forme de maquettes. La caractéristique spécifique des maquettes par rapport au dessin est, effectivement, la plastique, c'est-à-dire l'effective tridimensionnalité matérielle, qui permet d'unifier les différentes vues bidimensionnelles (les images) dans une seule représentation. Les maquettes ont été utilisées depuis toujours dans la pratique architecturale ou artistique : on a des témoignages de la présence de maquettes dans l'ancien Egypte ou dans l'ancienne civilisation grecque. Pendant la période gothique ou pendant la Renaissance les maquettes ont constitué un outil fondamental de représentation, tant pour la conception que pour la communication avec les mécénats [SMI04]. Au XX<sup>ème</sup> siècle, tous les grands architectes ont utilisé des maquettes, comme Le Corbusier [Fig.12a] Mies Van der Rohe ou Wright ; à nos jours les maquettes sont encore fondamentales dans la conception spatiale et leur réalisation est adaptée aux technologies disponibles, comme par exemple dans le cas des maquette coupées par les machines à contrôle numérique [fig.12b], largement utilisées dans l'architecture Non Standard. Cet outil de représentation semble donc central dans tout ce qui concerne la conception des qualités spatiales.

Plusieurs typologies de maquettes sont aujourd'hui employées dans l'architecture et dans l'ingénierie, en relation à l'échelle (maquettes d'urbanisme ou maquette d'une pièce intérieure ou d'une villa, par exemple) mais aussi en relation à la finalité pour laquelle la maquette est réalisée. Par rapport à la finalité, nous avons identifié trois catégories principales de représentation tridimensionnelle: les *maquettes de communication*, les *maquettes de conception* et les *maquettes mécaniques*.

#### *Les maquettes de communication*

Les maquettes de communication [fig.12] sont utilisées pour montrer, au client ou au public, une représentation du projet accompli. La tridimensionnalité des maquettes permet une compréhension des qualités spatiales des objets conçus plus immédiate que les dessins. Les perspectives, les croquis ou, aujourd'hui, les « rendus<sup>13</sup> », permettent d'exprimer efficacement des qualités tridimensionnelles sous la forme de « comment va-t-il apparaître » : quelle image nous verrons quand l'objet sera réalisé. Les maquettes, au contraire, sont capables de donner une information immédiate sur l'effective tridimensionnalité matérielle de l'objet : dans quel espace nous nous promènerons quand l'objet sera réalisé.

#### *Les maquettes de conception*

Les maquettes de conception [fig.13] sont les maquettes de travail utilisées pour visualiser les qualités spatiales des objets et des espaces en voie de

<sup>12</sup> Dans l'*Encyclopédie* de Diderot et D'Alembert et dans l'*Encyclopédie* de Quatremère de Quincy est encore utilisé le terme *modèle*. Le sens moderne du terme *maquette* en référence à l'architecture est défini pour la première fois dans le Grande Larousse de la langue française en 1873. [SAR04]

<sup>13</sup> On définit couramment "rendus" (en anglais "render") les représentations figuratives hyperréalistes de formes et espaces, réalisées avec les outils numériques.



**Fig. 12a** F. Gehry, maquette pour la Fondation LVMH, Paris (2007)



**Fig. 12b** Le Corbusier avec une maquette de la Ville Radieuse (1930)

**Fig. 12** Maquettes de communication

**Fig. 13** Maquettes de conception



**Fig. 13a** F. Gehry, maquette conceptuelle pour l'Astor Palace Hotel, New York (1998)

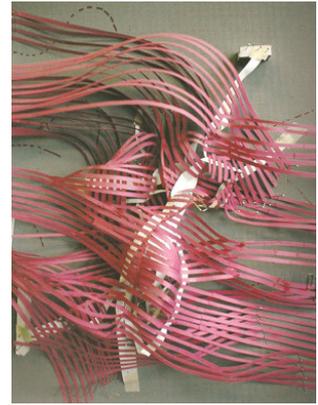
conception. Beaucoup de concepteurs considèrent les maquettes un outil indispensable et essentiel pour l'élaboration des qualités spatiales et formelles. L'architecte F. Gehry, par exemple, développe ses idées spatiales à travers une grande production de maquettes pendant toutes les étapes du processus [fig. 13a]

L'importance des maquettes dans la conception dépend du fait qu'elle constituent des *représentations matériellement tridimensionnelles* des objets en voie de conception : *elles permettent de transmettre, avec une seule représentation, la spatialité globale de l'objet*. Pendant la conception, par exemple, elles permettent de mettre en relation les différents dessins produits comme projections de l'objet sur des plans. La caractéristique d'unité et globalité des maquettes permet la vérification de la cohérence spatiale unitaire de l'objet en voie de conception. L'importance des maquettes pendant l'élaboration spatiale réside aussi, de notre point de vue, sur le processus même de réalisation matérielle des maquettes conception. En partant de récentes théories cognitives qui considèrent l'action fondamentale dans l'organisation des mécanismes perceptifs [noe04], nous supposons que l'acte de construire une maquette est capable de transmettre une connaissance plus efficace que les dessins sur les effectives qualités spatiales de l'objet modélisé.

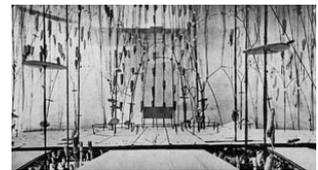
#### *Les maquettes mécaniques*

Les maquettes mécaniques [fig.14] sont des maquettes dont la finalité est de représenter la configuration spatiale optimale, du point de vue mécanique, d'une forme structurale par rapport à certaines conditions à la limite données (par exemple, la géométrie des bords). Des telles maquettes sont très utilisées dans les processus de *recherche de forme* des surfaces structurales comme les structures tendues ou les coques minces. L'intérêt de ce genre de maquettes réside dans le fait qu'elles ne sont pas des maquettes purement représentatives, mais *elle sont génératives* : la forme modélisée résulte de la configuration spontanée d'un certain matériel en réaction aux conditions au limites établies par le concepteur. Par exemple, dans le cas des structures tendues, avec un tissu élastique comme la lycra, en le positionnant sur la base des points d'appui choisis par le concepteur (les conditions au contour), est possible d'obtenir une bonne approximation d'une forme mécaniquement équilibrée. De même, pour les coques minces, l'enjeu est celui de faire « apparaître » la morphologie structurale la plus efficace pour fonctionner en compression : un tel problème a été approché par différents concepteurs [fig.18b, 18c, 18d]. H.Isler [fig.18d], par exemple, obtient les formes optimales en partant d'un tissu mouillé et accroché dans les points choisis, qui assume ainsi spontanément une position dans laquelle les forces sont exclusivement des forces de traction (il n'est pas possible que un tissu, qui n'a pas de rigidité, supporte des forces autres que de traction). Il fait alors glacer ses modèles, pour fixer la forme que, retournée dans l'espace (de 180° sur la verticale de la gravité), donnera une forme dans laquelle il n'y aura d'autres forces que des forces de compression. Les maquettes mécaniques sont aujourd'hui de moins en moins utilisées car elles sont substituées par des modèles numériques, capables de générer les formes optimales en relation à un certain matériel, aux charges et aux conditions d'appui, par exemple. La « supériorité » des modèles numériques, dans ce cas, est celle de pouvoir regrouper, dans un seul modèle, des informations de type géométrique, mécanique, thermique ou même technologique. Dans le cas des maquettes physiques de recherche de forme, en fait, un gros problème est celui de trouver la description géométriques la plus fidèle de la forme créée par le matériel : il faut faire un « relevée » de la maquette pour pouvoir la représenter sous forme géométrique et analytique. Avec un modèle numérique, les qualités géométriques de la forme sont déjà contenues dans le modèle.

Les dessins et les maquettes constituent les principaux outils analogiques de représentation spatiale.



**Fig. 13b** NOX, maquette de conception pour le projet Son-O-House (2000-2004)



**Fig. 14a** A.Gaudi, maquette mécanique pour la recherche de forme de l'église Sagrada familia, Barcelone, Espagne (1898)



**Fig. 14b** S.Musmeci, maquette mécanique pour la recherche de forme ; pont sur le fleuve Basento, Italie (1977)



**Fig. 14c** H.Isler, maquette de recherche de forme pour une coque mince (tissu imprégné d'eau et fait congeler) (1990)

**Fig. 14** Maquettes mécaniques

### 3c. Les outils numériques

Dans les années 70 du vingtième siècle, les outils numériques de représentation et modélisation ont commencé à être employés dans le monde de la conception architecturale. Depuis, ils ont pris de plus en plus de place, à détriment des outils analogiques comme le dessin et les maquettes, jusqu'à arriver dans nos jours à être fondamentaux et presque exclusifs tant pour la conception que pour la réalisation. Les outils numériques sont employés dans tous les domaines : à partir de l'architecte « traditionnel » qui conçoit des maisons individuelles « standard » et il le représente avec les outils numériques, jusqu'aux cabinets Non Standard où la nature même de l'idée architecturale est numérique.

*De la même façon que les modèles analogiques comme les maquettes, les modèles numériques permettent de simuler et représenter des qualités morphologiques et spatiales.* La principale spécificité des modèles numériques est qu'ils sont construits dans un espace tridimensionnel virtuel, dont nous avons connaissance à travers les représentations bidimensionnelles dynamiques qu'on obtient sur l'écran. On discutera dans la suite (dans la modélisation de la problématique -chap.I.4- et dans la discussion générale -chap.III-) les caractéristiques cognitives spécifiques liées à l'utilisation des outils de représentations numériques pendant la conception. Ici nous allons simplement identifier les principales catégories d'outils numériques qui sont utilisés dans la conception spatiale en architecture et en ingénierie, qui sont : les outils de *modélisation et représentation* (géométrique mais aussi mécanique) et les *outils de génération* (« créativité numérique ») ; les outils organisationnels (gantt, cahier des charges, par exemple) ; les *outils de production* pour les machines à contrôle numérique. La catégorie d'outils numériques qui nous intéresse en particulier dans le cadre de cette thèse est celle des logiciels de modélisation, représentation et génération. Dans ce cas les modèles (et donc les images sur écran) qui sont générées par l'ordinateur assument la fonction qui est d'habitude celle des croquis et de la géométrie descriptive: ils permettent de visualiser les qualités spatiales et figuratives qui constituent une solution possible du problème spatial qu'on est en train de résoudre.

#### a. Outils de modélisation et de représentation

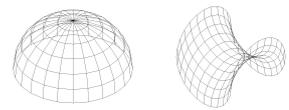
##### 1. Modélisation et représentation géométrique 3d [Fig.15a]

Les outils de modélisation tridimensionnelle (du type *Autocad*, par exemple) permettent de dessiner en 3d des objets de forme quelconque, en partant d'éléments et opérations standard (droites, cercles ellipses, surfaces planes, cubes, etc.) ; le « portefeuille formel » est donc limité à certaines familles de formes. Ce sont des outils de pure représentation : ils permettent de dessiner de la même façon qu'à main levée, car les informations nécessaires pour la modélisation de l'objet sont les mêmes que dans le dessin à main levée : les propriétés analytiques. Les outils de ce genre ont été élaborés dans le milieu industriel du XX siècle : on peut les considérer les « petit-fils » de la géométrie descriptive. Ce sont les outils les plus répandus dans le domaine de la construction.

##### 2. Modélisation, représentation et animation 3d [Fig.15b]

Les outils de modélisation et animation 3d (du type *3d studio max*, ou *Rhinoceros* ou *Maya*, par exemple) sont des outils développés dans le milieu de l'animation pour le cinéma. Ils permettent, en partant d'opérations intuitives (pliage, gonflage, déformation, etc.) de générer des configurations géométriques complexes, des formes à courbure variable ainsi que des séquences d'objets en mouvement. Il s'agit d'outils qui peuvent être comparés aux croquis, car ils permettent de visualiser des formes complexes sans se soucier des propriétés géométriques et analytiques. Cependant, à différence des croquis, les formes complexes créées par le concepteur de

**Fig. 15** Les outils numériques dans la conception spatiale.



**Fig. 15a** Modèles numériques de surfaces élémentaires: demi sphère et hyper.



**Fig. 15b** Modèle 3d d'une forme complexe.  
*M. Fuksas Centre Congres Rome (2004)*

façon intuitive, en agissant sur les commandes visuelles, sont directement calculés par le logiciel et transformés en objets analytiques, ce qui introduit un décalage entre les actions du concepteur sur les formes et les propriétés analytiques qui en résultent. Les outils de cette nature sont largement employés dans l'architecture Non Standard pour générer les formes complexes.

### 3. Modélisation mécanique ou physique [Fig.15c]

Les outils de modélisation physique permettent de simuler et de visualiser des propriétés ou des phénomènes physiques comme les courbures des surfaces, les efforts dans le matériel, les fluxes thermiques, l'ensoleillement, etc. Un exemple très répandu d'outil de cette nature ce sont les logiciels qui génèrent des modèles aux éléments finis (du type *Ansys*, ou *Sap*, par exemple). Parmi ces outils, les logiciels plus élémentaires de vérification mécaniques sont largement employés dans tous les domaines de la construction, en particulier par les ingénieurs. Les logiciels plus élaborées ou plus spécifiques, qui ont été développés dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique (comme ceux qui permettent de simuler les fluxes du vent) sont aujourd'hui souvent utilisées dans l'architecture Non Standard, tant pour la vérification mécanique des morphologies complexes que pour la génération formelle.

### 4. Outils couplées [Fig.15d]

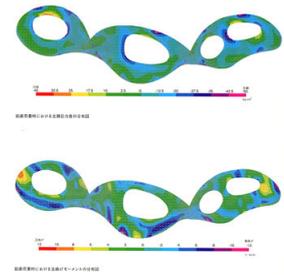
Nous avons défini "outils couplés" les outils que sont appelés aussi CFAO (en anglais CAD/CAM/CAE), c'est à dire Conception, Fabrication et ingénierie assisté par ordinateur. Ces outils permettent de créer des modèles unitaires qui contiennent et relient des informations de nature différente, comme par exemple la géométrie, la mécanique, les exigences de la production et celles de la construction. Ces outils (comme par exemple *CATIA*<sup>14</sup>) ont été originaires développés dans l'industrie aérospatiale mais ils sont aujourd'hui extensivement utilisés dans l'architecture Non Standard, par exemple pour pouvoir développer une forme avec cohérence entre les exigences mécaniques et constructives. Des tels outils ne sont pas utilisés dans les processus architecturaux « standard ».

### 5. Outils de génération morphologique (outils associatifs ou paramétriques) [Fig.15e]

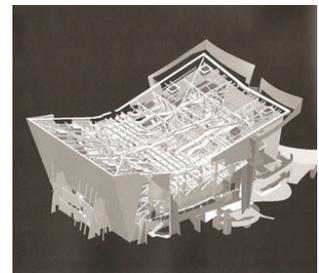
Les outils de génération morphologique permettent de générer des formes à partir d'un système de règles (géométriques, organisationnelles, mécaniques, etc.) qui sont élaborées par le logiciel, ou bien de créer des formes et de les modifier dans leur ensemble en agissant sur des paramètres locaux, grâce aux lois de couplage des paramètres. Des exemples d'outils de cette nature ce sont *Generative Components* (développé par la compagnie privée Bentley Systems) ou *Eifform* (développée dans les laboratoire de recherche du MIT). Ces logiciels ont été créés et développés dans le milieu de l'architecture Non Standard et ne sont pas utilisés dans s'autres domaines.

#### b. Outils organisationnels

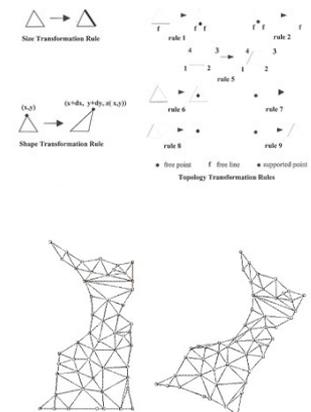
Les outils d'organisation et gestion permettent de gérer, par exemple, la logistique ou l'économie des projets complexes. Un outil de cette nature est, par exemple *Ganttproject*, qui permet de gérer l'emploi du temps d'un projet, tant dans la conception que, surtout, pendant les différentes étapes de la construction. En raison de la complexité, morphologique aussi bien que organisationnelle, des projets, ces outils sont extensivement utilisés dans l'architecture Non Standard.



**Fig. 15c** Modélisation et optimisation mécanique  
M. Sasaki, modèle mécanique de la surface du Parc Grin Grin (2007)



**Fig. 15d** Les outils couplés permettent de gérer dans un modèle unique des informations de nature différente (géométrique, mécanique, productive, etc.)  
F. Gehry, modèle numérique du projet EMP (2000)



**Fig. 15e** Outils de génération morphologique : génération paramétrique de la morphologie à travers les qualités structurelles et topologiques.  
*Logiciel eifForm*, en développement au Engineering Design Center de Cambridge

<sup>14</sup> Computer Aided Three Dimensional Interactive Application

*c. Outils de production (CAO/FAO)*

Les outils de production permettent de créer de modèles géométriques qui sont directement utilisées par les machines à contrôle numérique pour la production des pièces, tant à la petite échelle (maquettes produites à travers la stéréophotographie, par exemple) que à l'échelle du bâtiment (pièces à forme personnalisée, comme des poutres courbés, par exemples). Les outils de cette nature sont largement utilisés dans l'architecture Non Standard.

Dans ce chapitre nous avons donc présenté les principaux outils de représentation qui sont utilisés dans la conception spatiale : le dessin, les maquettes et les outils numériques. Nous avons approfondi en particulier le dessin car nous retenons que les outils numériques sont en train de prendre sa place et que ce fait semble être en train d'engendrer des changements profonds dans la conception, en raison de l'importance de la pratique (de l'activité physique) dessin. Nous allons approfondir cette question, en nous appuyant sur les résultats expérimentaux, dans la discussion générale (chap.III).

## 1.3 CONCEPTION ET PROCESSUS COGNITIFS



### I.3/1 APPORT DES SCIENCES COGNITIVES : UNE APPROCHE SCIENTIFIQUE DES PROCESSUS DE CONCEPTION

La notion de « processus de conception » fait intervenir des notions et des concepts relatifs à la créativité, au « génie créateur » et à l'intentionnalité de la pensée humaine comme condition de l'action sur le monde. Ces concepts constituent le cœur de la philosophie de la pensée [JAM09] [SEL67], qui a pour objectif une compréhension approfondie des modalités d'émergence de la pensée consciente et de ses interactions avec le corps humain d'une part et avec le monde physique d'autre part. L'objectif du présent chapitre est de resituer certains aspects de cette problématique dans un cadre théorique et scientifique récent et d'amener à une approche théorique opérationnelle permettant l'étude expérimentale des processus de création et de conception en architecture et en ingénierie, en particulier dans le cas de la conception dans l'architecture Non-Standard. On tentera de faire ressortir les principaux ancrages théoriques de la problématique dans le domaine des sciences cognitives modernes et on proposera une approche expérimentale des questions qu'elle soulève.

#### 1a. Les sciences cognitives

« Les sciences cognitives ont pour objet d'étude la cognition, c'est à dire la capacité de n'importe quel système, naturel ou artificiel, d'apprendre et de communiquer à soi même et aux autres ce qu'il connaît. » [LEG02]

L'étude de la *cognition* concerne plusieurs disciplines différentes, parfois hétérogènes entre elles, comme la psychologie, la linguistique, l'économie, l'art, etc., qui se rencontrent sur le terrain commun d'un problème spécifique : la cognition. La « discipline cognitive » constitue donc un domaine indépendant de connaissances et des méthodes qui sont le résultat de l'interaction (et non pas de la simple addition) des connaissances spécifiques de chaque discipline particulière sur certaines questions spécifiques. Comme l'explique très clairement E. Legrenzi [LEG02], l'objectif principal de cette discipline est celui de comprendre le fonctionnement de n'importe quel *système*, naturel ou artificiel, qui peut recevoir et filtrer des informations de son environnement (perception), de les archiver et effacer (mémoire), de les élaborer et d'en créer des nouvelles (pensée), de les communiquer, de prendre des décisions, de s'adapter et d'adapter son environnement grâce à la création d'artefacts (conception). La psychologie cognitive constitue un sous-domaine des sciences cognitives, sa spécificité étant de s'intéresser exclusivement aux systèmes naturels : les animaux et l'être humain.

#### *Monde mental et monde physique : quels liens ?*

D'un point de vue cognitif, lorsque l'on aborde les problématiques relatives à la créativité humaine en générale et au processus de conception dans un certain domaine en particulier (par exemple, en ingénierie ou en architecture), on soulève inévitablement la question des liens qui existeraient entre la manière dont fonctionne le monde mental (monde de la création, fonctionnement « interne ») et les principes d'organisation fonctionnelle du monde des objets (monde physique, fonctionnement « externe »). Puisque les processus mentaux, dont font partie les processus de création et de conception, reposent en grande partie sur des interactions entre le monde « interne » et le monde « externe », un certain nombre de théories récentes en sciences cognitives ont proposé des modèles qui expliquent les liens fonctionnels qui pourraient exister entre ces deux mondes. Trois approches théoriques contemporaines méritent tout particulièrement d'être mentionnées ici: le modèle ART (« *Adaptive Resonance Theory* ») de Grossberg [GRO99],

la théorie de l'internalisation des principes d'organisation du monde physique (« *internalization theory* ») de Shepard [SHE94] et la théorie « constructale » (« *constructal theory* ») de Béjan [BEJ03].

La théorie du mathématicien et psychologue Stephen Grossberg modélise les interactions entre les événements internes et le monde des événements physiques sur la base d'un réseau de neurones formels qui génère des états de résonance entre les objets externes et les hypothèses du système cognitif relatives à « ce que devrait être ces objets » à un moment et dans un contexte donné dans le temps. Ces états de résonance positive ou négative correspondraient à des états de conscience qui seraient sous le contrôle direct des processus perceptifs. Leur dynamique fonctionnelle changerait en fonction des changements qui ont lieu dans le monde physique, ce qui donne aux mécanismes perceptifs et cognitifs simulés dans ce modèle une fonction adaptative qui permet de rendre compte de certains aspects du développement cognitif et de la plasticité des processus mentaux.

Un modèle radicalement différent du fonctionnement mental en interaction avec le monde physique a été proposé par le psychologue Roger Shepard. Ce modèle suppose que les processus perceptifs et cognitifs seraient gouvernés par les mêmes principes fonctionnels que ceux qui gouvernent le monde physique. Ainsi, sa théorie de l'internalisation des principes d'organisation du monde postule que les caractéristiques structurales et relationnelles d'objets et leurs représentations mentales seraient soumises aux mêmes lois mathématiques. Ce modèle a été critiqué par d'autres auteurs [BAR01] [DRE01] [HEC01], entre autres parce qu'il ne rend pas compte du développement cognitif, ni de la plasticité cognitive en général ou de la dynamique des processus d'apprentissage et de résolution de problèmes.

La théorie la plus récente sur les liens qui unissent le monde des représentations internes, le monde social et le monde physique est la théorie « constructale » (*constructal theory*) proposée par le mathématicien Adrian Béjan. Cette approche emprunte des concepts à la thermodynamique et à la théorie du chaos. Les systèmes étant par essence imparfaits (le second principe de la thermodynamique), le temps imposerait aux formes et aux structures d'optimiser leurs « objectifs » en fonction de l'évolution des contraintes locales et globales. Ainsi, la théorie « constructale » permettrait de rendre compte des différentes manières dont le système cognitif « construirait » des représentations mentales des objets physiques perçues et des relations, existantes ou possibles, entre objets en fonction de l'évolution des situations et des contraintes (« *constructal dynamics* »). On retrouve dans cette approche l'idée d'une nature essentiellement adaptative des mécanismes, comme dans la théorie de Grossberg.

L'état de l'art en sciences cognitives, sur le plan des recherches empiriques, ne nous amène pas à conclure que l'une des trois approches théoriques soit plus « vraie », ou plus valide, qu'une autre. La théorie de la résonance adaptative est plus proche des connaissances actuelles en matière de neurophysiologie des systèmes sensoriels et a été validée empiriquement par des résultats expérimentaux relatifs à la cognition des propriétés géométriques et structurales locales des objets visuels [DRE02]. La théorie de l'internalisation des principes d'organisation du monde physique a connu beaucoup de succès au siècle dernier dans les années '80 et '90 et a été validée par des résultats relatifs aux représentations cognitives d'objets visuels en fonction de certaines transformations (par exemple, la taille relative, la rotation dans le plan, les rotations à 180 °). En ce qui concerne la plus récente des trois théories introduites ici, la théorie « constructale », elle n'a pas encore été empiriquement validée en ce qui concerne les représentations mentales humaines mais a permis de modéliser efficacement certains phénomènes « d'intelligence auto-organisatrice » que l'on trouve dans la nature et en économie. Ce qui réunit ces trois approches théoriques est le fait qu'elles proposent des modèles du fonctionnement cognitif susceptibles de générer des hypothèses opérationnelles dans le cadre d'une recherche expérimentale. Les modèles de Grossberg et de

Shepard ont été élaborés pour rendre compte du fonctionnement cognitif tout particulièrement, mais ont trouvé également des applications en économie et en sciences sociales. Ces deux modèles accordent une importance primordiale au rôle des processus perceptifs dans la représentation cognitive du monde physique.

### 1b. Le processus de conception

Comme on a expliqué dans le chapitre 1.2, c'est un *besoin* réel ou imaginé qui motive la création ou la conception d'une structure nouvelle, qui devient alors un produit ayant une certaine *fonction* ou un ensemble de fonctions concrètes. Ces fonctions auront une influence tout à fait critique sur les processus de conception. Dans ces cas, le processus de conception est ramené à un processus de résolution de problème qui peut être défini comme le processus qui passe « d'un besoin à la description de la structure d'un produit capable de le satisfaire, dans le respect de certaines contraintes, à l'aide d'une technologie donnée » [CHA90]. Cette définition s'applique à toute conception dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie. A partir de cette définition, il restera donc à identifier et définir au mieux la nature du besoin (réel ou imaginé), ainsi que les contraintes en termes de moyens et de limites des technologies potentiellement disponibles

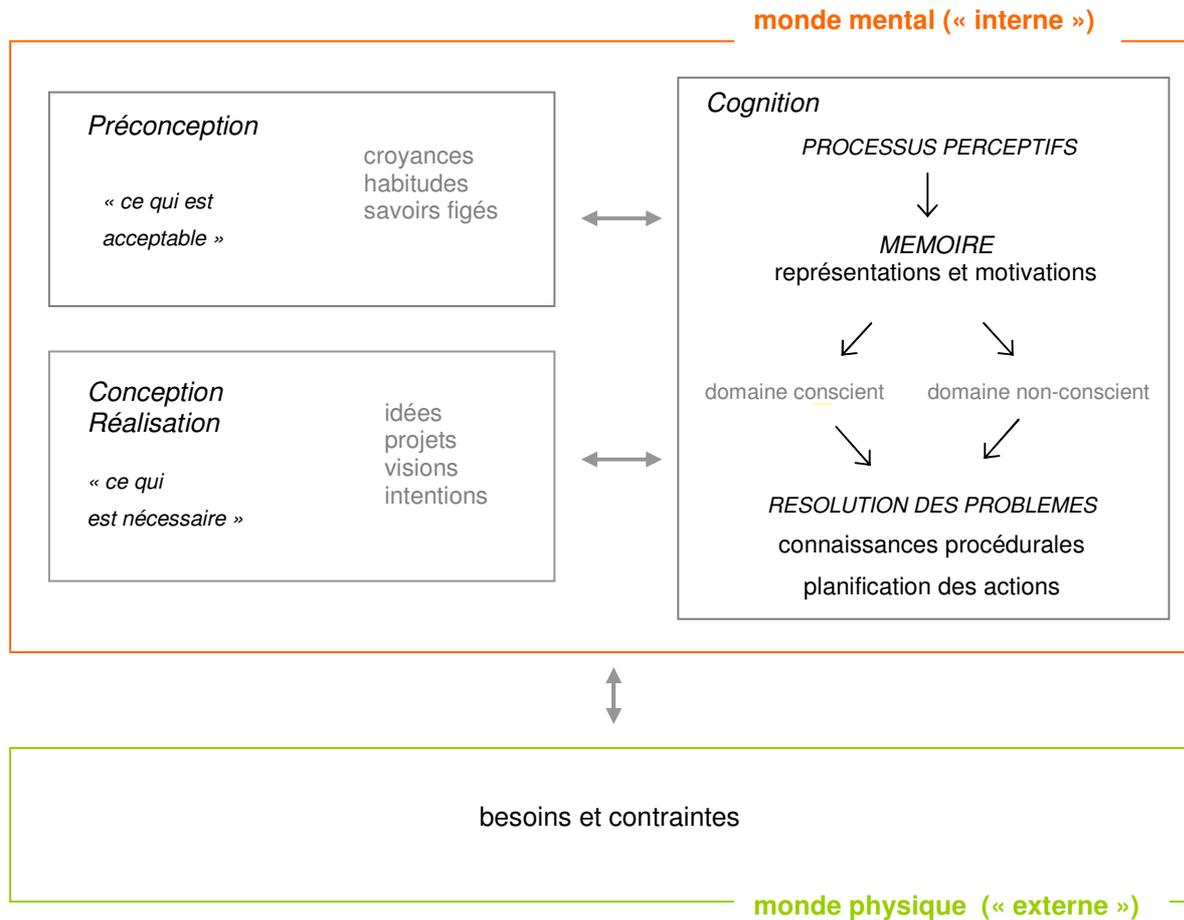
La conception d'une œuvre d'architecture ou d'ingénierie est donc motivée par l'idée d'une fonctionnalité, qui peut-être de nature concrète ou abstraite. La nature de la motivation initiale est susceptible d'avoir une influence sur la nature du processus de conception même. Finalement, l'état des connaissances préalables de l'individu ainsi que ses aptitudes doivent être pris en compte. A ce sujet des éclairages très pertinents sont proposées par H. Gardner dans son livre passionnant sur la question de ce qu'est « l'intelligence » [GAR83] ainsi que dans un article plus récent [HOW99].

Travailler sur les processus de conception soulève donc la question de l'*intentionnalité* et des mécanismes de *prise de conscience*. L'intentionnalité étant sous le contrôle des mécanismes psychologiques de la motivation est de la volition (c'est-à-dire des actes de volonté), il paraît évident qu'un processus de conception, ou de résolution de problème, fait intervenir l'intentionnalité. Cependant, il nous reste à identifier et à comprendre à quel(s) niveau(x) du processus l'intentionnalité intervient et quel est exactement son rôle. Il est connu, d'autre part, que des mécanismes non-conscients peuvent être fortement efficaces dans les stratégies spatiales (les stratégies principales dans la conception architecturale), déjà chez l'enfant au cours du développement cognitif [PIA67].

En dehors des contraintes et limitations matérielles, voire technologiques, qui font partie des données du problème à résoudre dans la conception, il existe des barrières cognitives, individuelles et/ou collectives, qui ont une influence déterminante sur la créativité humaine et sur le processus de conception. Ces barrières cognitives peuvent être caractérisées comme étant du domaine des « préconceptions » (les idées préconçues), ou « a priori », qui constituent les habitudes, croyances et savoirs figés de l'individu ou des groupes d'individus. Les normes culturelles, sociales et éthiques, par exemple, jouent un rôle important dans ce domaine. Il est important, voir primordial, de tenter de cerner ce domaine afin d'identifier au mieux les préconceptions individuelles et collectives avant de pouvoir passer à l'analyse du processus de conception lui-même. En particulier, les connaissances spécifiques des spécialistes des différentes disciplines qui doivent collaborer dans la conception sont déterminantes pour l'efficacité de la communication et, donc, du processus même.

Le schéma suivant [fig. 1] représente les différents domaines de la cognition, et leur interdépendance hypothétique, qui touchent à la problématique des processus de conception en architecture et ingénierie : les processus

perceptifs, la mémoire et les processus de résolution de problème sont les aspects cognitifs le plus importants. Nous allons dans la suite décrire brièvement leurs caractéristiques générales ; dans le chapitre I.4 on clarifiera plus en détail leur rôle et leurs interactions pendant le processus de conception architecturale.



**Fig. 1** Pendant la conception en architecture et ingénierie les mécanismes cognitifs plus importants qui sont activées ce sont les processus perceptifs, la mémoire et la résolution de problème.

## I.3/2 LES PROCESSUS PERCEPTIFS

Les recherches sur les processus perceptifs constituent l'un des plus vastes sous-domaines de recherche en sciences cognitives. Toute problématique autour des processus de conception en mécanique, architecture ou en ingénierie soulève inévitablement des questions relatives aux processus perceptifs sous-jacents. Par exemple, comment les parties d'un objet ou d'une structure sont-elles réorganisées par le système perceptif pour générer une représentation cognitive d'un tout cohérent et stable dans l'espace et dans le temps ? Sachant que les neurones du cortex visuel n'enregistrent que les informations visuelles locales, comme des lignes ou des zones de transition de contrastes [GIL98], il nous reste à comprendre comment ces informations locales sont intégrées en une perception, voir représentation, du tout dans son ensemble.

### 2a. La théorie de la « gestalt »

Les recherches sur les lois d'organisation perceptive, issues de la psychologie de la *Gestalt* [MET36] [KOH47] et source précieuse d'inspiration pour les recherches contemporaines en sciences cognitives, ont abouti à une conceptualisation des règles d'organisation perceptive des objets physiques, les célèbres *lois de la Gestalt*. Ces lois sont, en fait, des postulats théoriques d'organisation perceptive des parties d'objets physiques en une représentation d'ensemble. Certains de ces postulats, comme celui de « continuité », de « bonne forme », de « saillance » ou celui de la « supériorité du tout sur les parties », ont pu être validés par des recherches empiriques. La loi la plus importante, car sans doute la plus controversée, issu du courant *gestaltiste* est celle de la « supériorité du tout sur les parties »<sup>1</sup> [MET36]. Elle postule que « le tout n'est pas réductible à la somme des parties qui le constituent » mais posséderait « quelque chose de plus », une caractéristique (ou des caractéristiques) qui lui est (ou lui sont) propre(s). On saisit pleinement l'importance de cette « supériorité du tout sur les parties » d'un objet, ou d'une structure, lorsque l'on regarde du côté des travaux sur la résolution de problèmes dans le domaine des représentations spatiales<sup>2</sup>.

Ces approches expérimentales en sciences cognitives ont permis de démontrer que l'on peut distinguer entre deux grandes classes de stratégies de résolution de problèmes dans le domaine spatial : les stratégies visuo-spatiales<sup>3</sup> (gribouillis, dessins [LEO01]) et les stratégies verbales. Dans les deux cas, l'élaboration d'une représentation d'ensemble, ou représentation holistique<sup>4</sup> du problème est souvent une condition nécessaire pour trouver une solution pertinente [LEV82]. Les représentations d'ensemble font intervenir ce que l'on appelle dans la littérature spécialisée des processus meta-cognitifs [SWA90], ou des « connaissances sur les connaissances ».

Dans les stratégies visuo-spatiales les mécanismes *visuels* d'élaboration perceptive détiennent évidemment un rôle primordial. Dans la suite nous allons donc brièvement décrire le fonctionnement des processus de perception visuelle.

---

<sup>1</sup> « *Ganzbestimmtheit der Teile* » [MET36]

<sup>2</sup> En anglais « *spatial problem solving* »

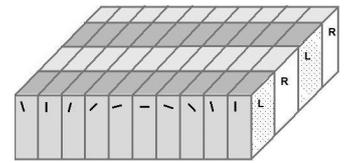
<sup>3</sup> « *Visualization strategies* » [leo01]

<sup>4</sup> « *Holistic processing* » [lev82]

## 2b. La perception visuelle

L'importance des processus perceptifs dans la cognition humaine réside dans le fait que c'est forcément à partir des processus perceptifs, en tant que « fenêtre » ouverte sur le monde extérieur, que nous organisons toute notre pensée, comme l'explique très clairement R. Arnheim [ARN69] dans son livre « La pensée visuelle ». Dans le cadre de cette thèse nous allons traiter exclusivement les processus perceptifs visuels, car ils constituent les processus les plus importants dans le domaine de la conception spatiale en architecture et ingénierie, en raison de l'importance des représentations bidimensionnelles (les images) dans le développement des idées formelles et spatiales.

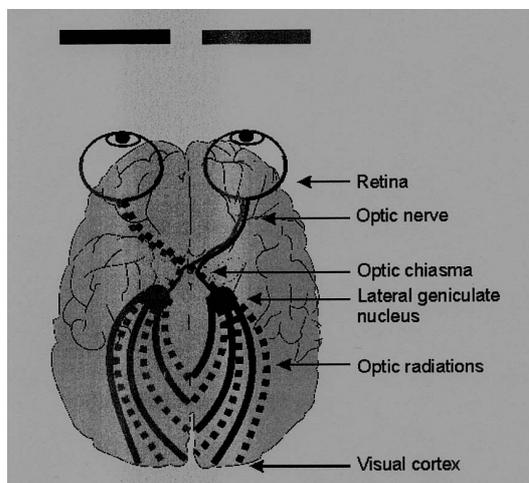
La perception visuelle est un processus complexe qui se déroule à partir du passage de l'information physique sur les objets du monde extérieur à travers les filtres optiques des yeux. Cette information est ensuite directement traitée par des états supérieurs du système visuel et ce n'est qu'après ce passage par des opérations d'élaboration centrale que l'information peut commencer à prendre sens. Dans les cas où, par exemple, des lésions sont présentes dans une partie du cerveau dédiée à la vue, la perception d'objets complexes est impossible, même si les yeux sont capables de transmettre l'information physique locale qu'ils reçoivent du monde extérieur. La question fondamentale dans les mécanismes de perception visuelle est exactement celle de comprendre comment des signaux indépendants qui arrivent à notre cerveau sont organisés pour être reconnus comme un ensemble. Les signaux visuels locaux qui arrivent à la rétine sous forme de lumière sont ensuite transformés par les cellules ganglions et, à travers le nerf optique, arrivent directement au cerveau. L'information sur la forme est ensuite reconstituée, organisée et « interprétée » par des neurones visuels hautement spécialisés, situés dans le cortex visuel [fig.1]. Les neurophysiologistes D. Hubel et T. Wiesel [HUB82] ont découvert une propriété fonctionnelle importante des neurones visuels corticaux : leur sélectivité à l'orientation. La plupart des neurones visuels corticaux répondent exclusivement à une orientation, ou direction de contraste, dans le champ visuel [fig.2]. Sur la base de cette découverte, ils ont proposé un modèle du cerveau visuel en termes de « colonnes de dominance oculaire » : chacune de ces colonnes est constituée par des neurones sélectifs associés à une seule orientation. Ce modèle explique la façon à travers laquelle les neurones visuels du cerveau « voient » la structure locale. L'interaction entre les neurones des différentes colonnes de dominance oculaire expliquent comment les contours des figures et des formes sont élaborés par le cerveau.



**Fig.2** Le modèle du cerveau visuel proposé par les prix Nobel Hubel et Wiesel, organisé en colonnes de dominance oculaire, constituée chacune par des neurones sélectifs à une seule orientation.



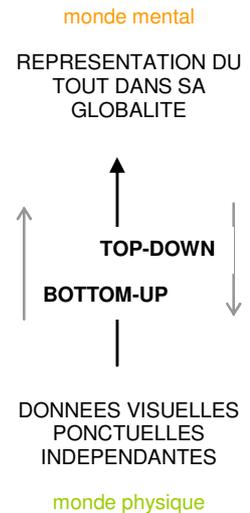
**Fig.3** Leonardo da Vinci, Représentation des liens entre œil et cerveau (siècle. XVI)



**Fig. 4** Le système visuel humain est composé par des capteurs (les yeux), un système de transmission (les nerfs optiques) un système d'élaboration (le cortex visuel), qui travaillent en stricte collaboration.

*L'élaboration perceptive: opérations ascendantes (« bottom-up ») et descendantes (« top-down »)*

Chez les humains, le système visuel est le seul système sensoriel à être directement connecté, via le nerf optique, au cerveau, en raison de la nécessité de traiter rapidement l'information visuelle. Le lien fondamental entre le système « périphérique » des yeux et les zones d'élaboration centrale dans la partie du cerveau dédiée à la vue ont été déjà vaguement compris par Leonardo Da Vinci au XVI<sup>ème</sup> siècle [fig.3]. L'importance de ce lien est fondamentale, car cela signifie que il n'y a pas une perception « pure » avec les yeux, suivie par une re-interprétation dans le cerveau, mais que la perception est au contraire un processus hautement centralisé, basé sur l'interaction entre des opérations d'élaboration des informations locales en entrée (opérations ascendantes) et des opérations d'interprétation globale en sortie (opérations descendantes). Le terme *ascendante* (« *bottom-up* ») désigne toutes les opérations d'acquisition des stimuli visuels simples ; le terme *descendante* (« *top-down* ») concerne, en opposition, les régulations que l'on met en place grâce aux connaissances qu'on a déjà stockées dans la mémoire. Le « *bottom-up* » est la récolte des informations visuelles « non interprétés », le « *top-down* » est l'interprétation qui en est faite à partir de notre expérience, de notre culture, etc. La perception est donc le résultat de l'interaction étroite entre des opérations simultanées de traitement ascendant et descendant des informations locales, qui sont ainsi organisées, structurées et interprétées pour donner origine à une perception globale, dotée de sens.



**Fig.5** l'interprétation des données perceptives indépendantes pour arriver à la représentation d'ensemble procède à travers des opérations ascendantes (bottom-up) et descendantes (top-down).

*L'ambiguïté de la perception: les images réversibles, les illusions d'optique*

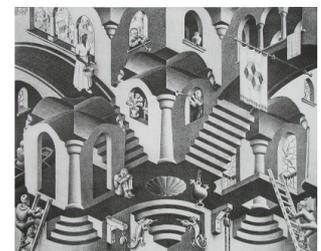
Notre perception donc n'est pas un processus passif d'enregistrement, mais un processus *constructif* dans lequel les opérations descendantes d'interprétation sont structurantes de la perception même et non pas des élaborations faites a posteriori. Dans le cas de la perception visuelle, par exemple, les effets d'optique que normalement qui sont appelés « illusions » sont un très bon exemple pour mettre en évidence l'importance de l'interprétation et de l'apprentissage dans l'élaboration de signaux visuels qui sont toujours potentiellement ambigus [Fig.7]. Ce qu'on appelle « illusion » n'est rien d'autre en fait qu'un conflit entre ce qu'on voit et ce qu'on sait [Fig.6]. On peut résumer ce phénomène en disant qu'on voit toujours ce qu'on cherche ou ce qu'on attend et si l'image qui arrive à nos yeux est en conflit avec les possibles interprétations que nous pouvons lui donner, on parle d'une « illusion ». L'importance de l'apprentissage dans le processus perceptifs est donc fondamentale, car les signaux visuels sont toujours interprétés par rapport aux connaissances que nous avons sur les propriétés des objets du monde physique.



**Fig.6** Illusion d'optique (illusion de Ponzo) : la ligne en haut apparaît plus longue que celle d'en bas quand en réalité elles sont égales. [DEL03]

*La perception de la troisième dimension*

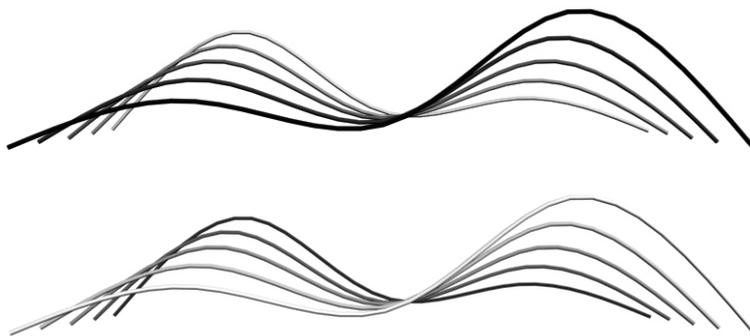
Les objets tridimensionnels de l'environnement qui nous entoure sont perçus par la rétine comme des images 2d : la projection, à travers des faisceaux lumineux, de la réalité sur la surface rétinienne. Notre connaissance des qualités spatiales effectives des objets tridimensionnels et des espaces que nous observons résulte donc d'un processus d'élaboration de ces signaux 2d, nommé *reconstruction morphologique*. Pendant ce processus notre système perceptif utilise des indices, nommés les *indices de profondeur*, qui lui permettent de reconstruire, à travers des opérations ascendantes et descendantes, les qualités tridimensionnelles effectives des objets observés. Les principales indices de profondeur sont : la binocularité<sup>5</sup>, la perspective, le mouvement, la superposition (ces indices dépendent de l'interaction entre objet et sujet); l'ombrage (dépendante de l'interaction entre objet et environnement) ; les contours et la texture (propriétés de l'objet).



**Fig.7** Image réversible : les signaux visuels sont toujours potentiellement ambigus. M.C. Escher, *Konkav konvex* (1955)

<sup>5</sup> La binocularité est la superposition des images différentes reçues par chaque œil. La convergence est, au contraire, un indice musculaire qui informe le cerveau de la distance entre le sujet et l'objet focalisé.

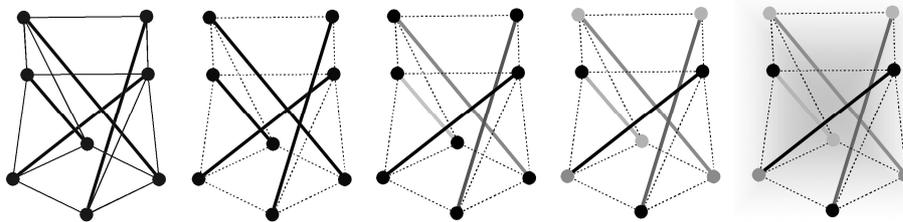
Les indices de profondeur peuvent collaborer ou être en conflit entre eux dans l'élaboration perceptive : deux indices collaborent si les informations spatiales qu'ils fournissent sur la profondeur sont en accord et donc renforcent réciproquement une certaine information spatiale [Fig.8a]; deux indices sont en conflit s'ils fournissent des informations conflictuelles sur l'information spatiale [Fig.8b]. Dans ce dernier cas, notre système perceptif va faire un choix entre les deux indices, par rapport au contexte ou à d'autres informations qu'il possède sur la probabilité que ce qu'il voit corresponde à un certain objet. Dans le cas spatial, par exemple, deux indices de profondeur comme la couleur et la superposition peuvent collaborer ou être en conflit et donc aider ou empêcher la compréhension de la configuration spatiale effective des objets observés.



**Fig.8a** Dans cette image l'indice de profondeur fourni par la superposition des éléments (l'élément qui n'a pas de superpositions et devant) collabore avec celui fourni par la couleur (couleur plus forte, objet plus près de l'observateur).

**Fig.8b** Dans cette image, au contraire, l'indice de profondeur fourni par la superposition est en conflit avec celui qui est transmis par la couleur : la couleur foncée fait apparaître la barre noire devant les autres, alors qu'elle est derrière, comme on peut déduire grâce à la superposition des bords.

L'importance des mécanismes de reconstruction morphologique et donc l'exploitation attentive des indices de profondeur est fondamentale dans la conception spatiale, largement basée sur l'utilisation d'outils de représentation et prévision qui sont essentiellement bidimensionnels (des images), pour la communication efficace des qualités spatiales des objets en voie d'élaboration.



**Fig.9** L'utilisation dans les images 2d d'indices locaux sur la structure 3d peut aider le cerveau à accomplir plus efficacement la reconstruction morphologique des objets représentés. De gauche à droite, nous avons ajouté à l'image de plus en plus d'indices locaux significatifs pour la compréhension de la tridimensionnalité de la structure représentée.

Dans la [Fig.9], par exemple, nous avons utilisé les indices de profondeur comme la texture, la superposition, la couleur et l'ombrage de façon à améliorer, à travers leur collaboration, la compréhension immédiate des réelles qualités spatiales 3d de l'objet représenté : une structure en état de tenségrité, caractérisée par une complexité géométrique qui rendrait difficile la reconstruction morphologique directe en absence de ces indices.

### *La perception de l'espace physique*

Comme l'avait très bien compris Le Corbusier, en disant que « nos yeux sont faits pour voir les formes sous la lumière » et que « l'homme voit les choses de l'architecture avec ses yeux qui sont à 1 m 70 du sol » [LEC23], la perception visuelle est fondamentale dans la perception de l'architecture, car c'est d'abord et principalement à travers les yeux que nous formons notre connaissance (c'est à dire, nos représentations mentales) des objets spatiaux et des espaces. Cependant, la perception des espaces qui nous entourent (à différence de la perception d'objets à petite échelle) dépend de l'interaction étroite de stimuli qui ne sont pas exclusivement visuels, mais aussi sonores, tactiles, ou encore relatifs à l'équilibre ou à la température. Nous n'allons pas développer ici cette thématique, qui constitue un domaine

de recherche assez vaste et que nous considérons comme l'une des possibles pistes futures de travail, mais il nous semble important de rappeler que les espaces construits sont perçus et élaborés d'une façon fondamentalement différente de celles de leurs représentations et que ce constat doit être présent à l'esprit des concepteurs pendant le processus de développement des formes spatiales. Des études sur l'orientation spatiale, ainsi que sur la perception spatiale des personnes présentant des handicaps visuels sont en cours dans notre équipe de recherche (B. Dresp, F.Georges et J. Boumenir).

Les processus perceptifs présentent donc une importance centrale dans la conception spatiale, tant en relation avec la perception de l'objet réalisé que pendant l'élaboration formelle du projet ; nous expliquerons en détail ces questions dans le chapitre I.4. Avec la perception, la mémoire et les processus de résolution de problème constituent les principales opérations cognitives impliquées dans la conception spatiale.

## I.3/3 LA MEMOIRE ET LA RESOLUTION DE PROBLEMES

### 3a. La mémoire

La mémoire peut être définie comme la capacité d'un système (humain, animal ou artificiel) de stocker, retenir et ensuite retrouver des informations. D'un point de vue de l'élaboration de l'information, on peut donc identifier trois étapes principales dans les processus concernés par la mémoire : l'*encodage* (ou enregistrement), qui consiste dans l'élaboration et la combinaison des informations reçues, le *stockage* (ou dépôt), qui consiste dans la création d'une représentation permanente de l'information enregistrée et la *récupération* (ou rappel), qui consiste dans le rappel de l'information déposée en réponse à un certain besoin, pour être utilisée dans un processus ou dans une activité. L'ensemble de ces activités, définies globalement sous le vocable « mémoire », peut être séparé en trois sous-systèmes, ou types de mémoire, en relation avec la capacité et avec la durée de rétention de l'information : le registre sensoriel, la mémoire de travail et la mémoire à long terme. Le *registre sensoriel* peut retenir un grand nombre d'informations pendant un temps extrêmement court (quelque millisecondes) ; la *mémoire de travail* peut contenir un nombre limité d'informations pendant quelques secondes (on évoquera en détail ce type de mémoire dans le chapitre suivant) ; la *mémoire à long terme* peut contenir un nombre très haut d'informations pendant un temps très long : elle ne connaît pas en pratique de limites de capacité ou de durée de mémorisation. La mémoire à long terme est celle qui s'approche le plus de notre conception intuitive de la mémoire.

La mémoire à long terme contient donc un très grand nombre d'informations, qui sont déposées sous la forme de *représentations mentales* de genres différents. Plusieurs distinctions ont été établies pour ce qui concerne la mémoire à long terme, comme celles entre la *mémoire épisodique* et la *mémoire sémantique* ou encore entre la *mémoire implicite, ou procédurale* (qui permet l'acquisition et l'utilisation de compétences), et la *mémoire explicite, ou déclarative* (qui est responsable de la mémorisation de données et informations et qui requiert une récupération consciente).

#### *Les représentations mentales*

Les informations reçues par le système sensoriel sont élaborées et retenues par la mémoire sous la forme de *représentations ou images mentales* : les représentations mentales peuvent donc être définies comme les *données de la mémoire*.

#### *L'apprentissage*

Dans le cadre des sciences cognitives, l'apprentissage est l'une des fonctions mentales les plus importantes des systèmes cognitifs (ceux des humains, des animaux ou des systèmes artificiels) ; l'opération d'apprentissage est nécessaire à élaborer les données pour la mémoire, c'est-à-dire les représentations mentales. On peut définir l'apprentissage comme un processus d'acquisition de différents types de savoir, construit en partant des données perceptives et ayant pour finalité l'augmentation de l'expertise d'un individu ou d'un groupe. L'expertise, qui est forcément le résultat d'un processus d'apprentissage, a une fonction déterminante sur la structuration de l'organisation perceptive ainsi que sur les stratégies de résolution de problème.

Par exemple, un processus d'apprentissage importante est celui de la reconnaissance des objets : des expériences ont été conduites afin de comprendre quels mécanismes structurent la reconnaissance d'un objet, par exemple après que celui-ci ait subi une rotation, ou par rapport à des différents angles visuels, ou encore, après qu'il ait subi des déformations. La reconnaissance des objets est basée sur la construction d'une

représentation mentale qui puisse être aisément retrouvée, c'est à dire qu'il ne nécessite un analyse trop complexe ; la compréhension des mécanismes de reconnaissance des objets est importante car elle nous donne des informations sur la façon dont notre système perceptif construit les représentations mentales des objets, archivées dans la mémoire à long terme. Dans notre cas, ce qui nous intéresse (et ce que nous allons chercher d'éclaircir avec les expériences) ce sont principalement les aspects géométriques de l'élaboration perceptive à la base de l'apprentissage des formes complexes.

### *3b. La résolution de problème dans le domaine spatial*

Comment on l'a expliqué en détail dans le chapitre 1.2, les processus de conception en architecture et en ingénierie peuvent être définis comme une classe particulière de processus de résolution de problème dans le domaine spatial. Ils mettent en jeu des représentations cognitives, des connaissances procédurales (tout ce qui est « savoir faire » ou, en anglais, « know how »), des mécanismes de prise de conscience et aussi des apprentissages dont le concepteur peut ou ne peut pas avoir pris conscience.

Les travaux de recherche en sciences cognitives relatifs aux processus de résolution de problème dans le domaine spatial ont pour but de comprendre comment le système cognitif élabore des représentations procédurales et organisationnelles lorsqu'il est confronté avec un problème qui consiste à aboutir à une certaine structure d'ensemble à partir d'éléments isolés qui doivent être appariés, par actions directes ou dans un plan image sur l'écran d'un ordinateur. Un tel appariement repose sur des *règles et procédures* qui, en principe, ne sont pas communiqués au sujet et qu'il doit trouver. Une première distinction importante sépare, par exemple, les stratégies visuelles des stratégies verbales : il s'avère que les individus qui ont recours aux stratégies du type géométrique n'ont que rarement recours aux stratégies verbales tandis que les individus qui ont recours à ces dernières semblent les utiliser également de manière préférentielle [MAC78] [KYL84]. Certains auteurs se sont alors posé la question de savoir dans quelle mesure le type de communication (verbal vs non-verbal) d'instructions ou de règles de transformation à respecter peuvent influencer le processus de résolution de problème chez les uns et chez les autres [ROB97]. La résolution de problèmes met donc en jeu des connaissances procédurales que le sujet possède déjà ou qu'il doit acquérir au cours du processus. Ces connaissances peuvent être formalisées en termes d'étapes critiques. Par exemple, dans le cas de la conception architecturale, nous savons (voir le chap. 1.2) que le processus de résolution de problème procède à travers un processus séquentiel, dans lequel ils existent des « tournures conceptuelles » qui marquent les étapes fondamentales dans l'évolution vers la solution finale. Dans le domaine des sciences cognitives, ces « tournures conceptuelles » sont définies « étapes critiques ».

#### *Procédures et étapes critiques*

Les procédures de résolution de problèmes peuvent donc être analysées en termes d'*étapes critiques*. Ce sont ces dernières qui permettent de comprendre par quels chemins on doit passer pour arriver d'une idée de départ (du « problème posé ») à la solution finale souhaitée. Une étape critique du processus peut être définie comme une opération transformationnelle, ou une chaîne d'opérations, indispensable(s) à l'évolution du processus de conception dans la bonne direction (c'est-à-dire vers la solution souhaitée). L'identification des étapes critiques d'un processus de résolution de problèmes est nécessaire pour comprendre le processus même et pour pouvoir communiquer sur le processus (avec le concepteur lui-même ou avec d'autres personnes).

Le point focal de tout raisonnement conceptuel en termes de configurations spatiales est la réalisation de la configuration finale (qui correspond à la résolution du problème spatial posé). Ainsi, les processus de résolution de problèmes dans le domaine spatial mettent en jeu, au niveau des opérations transformationnelles, des boucles perception-action, réels ou imagées, verbalisées ou non selon la stratégie adoptée par l'individu. Fréquemment, les individus réalisent des étapes critiques dans la conception sans en prendre conscience [ROB97], ou sans pouvoir expliciter le raisonnement qui les a amenés à passer par la réalisation de cette étape.

### 3c. La mémoire de travail

Comme on l'a exposé dans le chapitre précédent, la mémoire humaine est composée de deux parties fondamentales distinctes : la mémoire à long terme, qui a une capacité très large (elle est essentiellement un *réservoir*, capable de contenir un nombre très important d'informations) et la mémoire de travail, qui, au contraire, a une capacité limitée de 7 (+/-2) regroupements (en anglais « chunks ») d'information. A partir de la découverte, faite par A.G. Miller [MIL56] en 1956, de la capacité limitée de la mémoire de travail, Newell et Simon [NEW72] ont développé un modèle qui propose que la résolution de problème correspond à un ensemble de processus cognitifs qui se passent essentiellement dans la mémoire de travail. Pour affronter un problème qui se présente dans l'environnement externe à l'organisme, une représentation du problème est construite dans la mémoire de travail. Des connaissances et des procédures pertinentes pour la solution du problème sont cherchées dans la mémoire à long terme et utilisées dans la mémoire de travail. Au delà, et allant plus loin, A. Baddeley a développé cette théorie du rôle de la mémoire de travail dans la résolution de problème pour inclure dans ce processus d'autres types d'activités cognitives parmi lesquelles la formation d'images mentales. Ce modèle propose que, en raison de sa capacité limitée, la plupart des activités cognitives, comme la pensée et la résolution de problème, sont trop complexes pour être élaborées et gardées dans la mémoire de travail. Tout le matériel qui est traité dans la mémoire de travail va en fait disparaître très rapidement. Ce modèle propose donc que toutes les activités cognitives complexes requièrent une élaboration séquentielle, dans laquelle les premières étapes doivent être gardées pour être utilisées dans les étapes suivantes. En plus, les connaissances et les procédures retirées de la mémoire à long terme doivent être gardées d'une façon qui les rende facilement accessibles pour les processus en cours, ce qui est nécessaire car la recherche de matériel dans la mémoire à long terme est un processus relativement lent. Pour tenir compte de ces questions, le modèle de Baddeley propose donc que les activités cognitives directement concernées par la pensée et la résolution de problème se passent dans ce qu'il appelle l'*administrateur central* et les résultats partiels, ainsi que le matériel nécessaire issu de la mémoire à long terme, sont gardées à part dans des *dépôts* temporaires (en anglais appelées « stores » ou « caches »). En tout cas, en raison de la décadence rapide des informations dans la mémoire de travail, il faut que ce qui est temporairement stocké dans ces dépôts soit constamment « rafraîchi » pour être retenu. Ces recherches ont pu démontrer la complexité de l'articulation de cette forme de mémoire et, pour cette raison, elles ont conduit à la définition de *mémoire de travail* à la place de la précédente définition de *mémoire à court terme*.

Les premières études sur la mémoire de travail ont été conduites sur l'audition, pour laquelle a été proposée l'existence d'un système de stockage temporaire, défini comme une *boucle phonologique* (en anglais *buffer* ou *loop*), dans lequel sont déposés par exemple, les mots nécessaires pour la construction d'un discours, qui sont retirés de la mémoire à long terme et utilisés au fur et à mesure par l'administrateur central. De la même façon, dans le cas de la vision il y a un système de stockage temporaire des informations, le *calepin visuo-spatial*. Pour être plus précis, on sait en fait

qu'il y a deux systèmes de ce genre relatifs à la vision : l'un (celui qui nous intéressera le plus) c'est un système spatial dans lequel l'information spatiale est stockée et traitée à travers des « mouvements intérieurs » : comment par exemple imaginer de se déplacer dans un environnement ou de manipuler un objet. La deuxième composante visuelle du calepin visuo-spatial est apparemment liée aux propriétés visuelles non-spatiales, comment par exemple la couleur. On sait que l'information stockée dans le calepin visuo-spatial est utilisée activement pour la construction des images mentales, qui sont un élément fondamental dans la pensée et dans les processus de résolution de problème. La présence des composants auditifs et visuels dans la mémoire de travail a déjà reçu plusieurs supports expérimentaux ; on suppose donc l'existence d'autres systèmes similaires associés avec les autres sens. Au delà des fonctions très spécifiques de la *boucle phonologique* et du *calepin visuo-spatial*, dans la résolution de problème un rôle central et unificateur est évidemment assuré par l'administrateur central, qui recherche dans la mémoire à long terme et traite des connaissances et des procédures pertinentes spécifiquement pour la tâche à accomplir, ainsi que des connaissances plus générales relatives à l'organisation, au déroulement temporel et à la planification.

#### *La mémoire de travail et les processus de conception*

Le processus de conception est un processus de résolution de problème basé sur une séquence réursive d'activités qui concernent la pensée, l'élaboration et manipulation d'images mentales, le dessin, ses re-interprétations et l'utilisation de plusieurs types de connaissance stockés dans la mémoire à long terme. Comme l'expliquent parfaitement Purcell et Gero dans leur article [PUR98], dans le modèle de la résolution de problème proposée par Newell and Simon (qu'on vient de décrire dans le paragraphe précédent), l'une des questions centrales est la capacité limitée de la mémoire de travail. Quand la complexité et /ou la taille du problème dépasse ces limites, le problème est séparé ou décomposé en sous-problèmes et sa résolution est séquentielle, ce qui signifie que la mémoire de travail procède à travers une élaboration sérielle. En plus, des aides externes à la mémoire, comme du matériel écrit, des dessins ou des diagrammes, sont utilisés. La décomposition, l'élaboration sérielle et l'utilisation d'aides externes à la mémoire sont des modes qui permettent de réduire la charge de la mémoire de travail. Les problèmes de la conception d'artefacts sont des problèmes complexes, en raison du fait que ce genre de conception concerne la manipulation d'information perceptives/spatiales, simultanément avec l'utilisation de connaissances conceptuelles issues d'un nombre considérable de disciplines et de connaissances procédurales spécifiques à la résolution de problèmes spatiales. *On peut donc supposer que la mémoire de travail joue un rôle fondamental dans le déroulement d'un processus de conception spatiale : celui-ci est caractérisé par la décomposition en sous-problèmes, par l'élaboration séquentielle et par l'utilisation d'aides extérieures, ainsi que par la présence d'une planification unitaire et d'organisation globale des objectifs. La compréhension des modes de fonctionnement de la mémoire apparaît donc fondamentale dans le but de développer des connaissances utiles à l'amélioration des processus de conception spatiale.*



I.4

## MODELISATION DE LA PROBLEMATIQUE

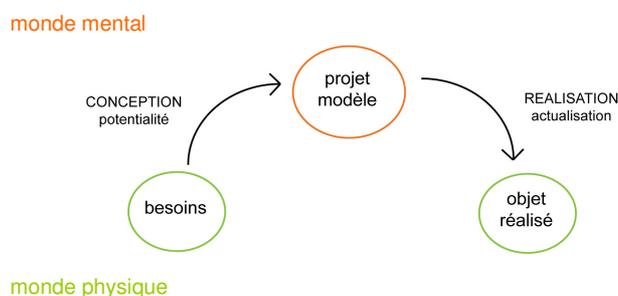


## 1.4/ 1 PER-CEPTION ET CON-CEPTION : CONTRIBUTION DES SCIENCES COGNITIVES

Dans les paragraphes suivants on va brièvement décrire le rôle des processus cognitifs qui nous semblent les plus importants dans un processus de conception spatiale: la mémoire, les mécanismes perceptifs (principalement visuels), l'apprentissage et l'expertise. Ce cadre constituera la base théorique sur laquelle nous avons construit la partie expérimentale (basée sur la méthodologie qui sera décrite en fin de chapitre) afin d'explorer ces questions dans le cas particulier des formes complexes et de la conception assistée par ordinateur.

### 1a. Mémoire et processus de conception

La conception en architecture et ingénierie est un processus créatif qui repose sur la relation et les interactions entre le monde physique d'un côté et le monde mental du concepteur de l'autre : à partir des besoins et des nécessités du monde physique un modèle de solution est élaboré dans le monde mentale du concepteur, en vue de sa réalisation finale dans le monde physique [Fig.1].



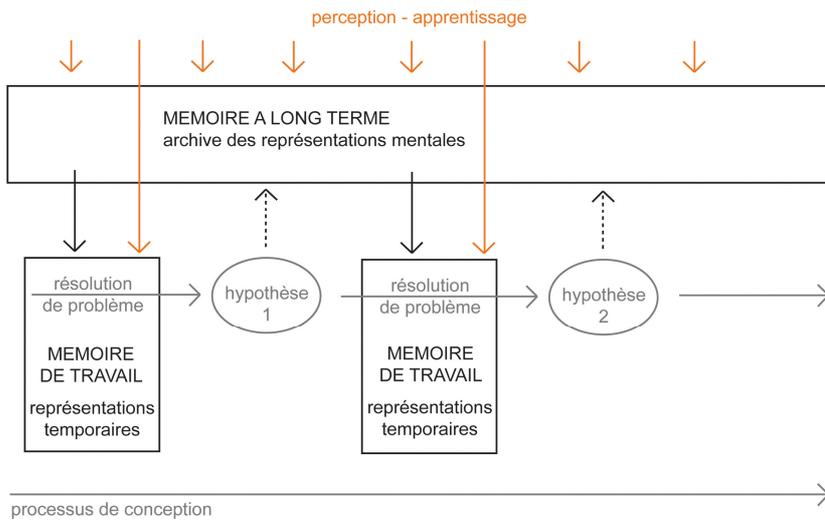
**Fig.1** La conception en architecture et ingénierie repose sur les interactions entre le monde mental interne des concepteurs et le monde physique externe.

La relation entre monde physique et monde mental est, donc, déterminante pour le résultat du processus de conception, ce qui signifie pour les qualités de l'objet construit et donc, par extension, pour l'environnement physique matériel dans lequel nous vivons, nécessaire aux besoins humains, autant physiques que spirituels. Les lois structurales à la base de cette relation (monde mental/monde physique) sont au centre des intérêts de notre travail de thèse et les sciences cognitives fournissent les outils et les concepts nécessaires à l'étude de ce genre de relations : pour cette raison on a décidé de réaliser une approche multidisciplinaire, en partant des concepts élaborés dans le milieu des sciences cognitives et en utilisant les méthodes de la psychologie expérimentale pour l'analyse des processus de conception des formes complexes.

D'un point de vue cognitif, on peut décrire le processus de conception en architecture et ingénierie en termes de processus de résolution de problèmes, constitué d'une série récurrente de sous-processus qui exploitent principalement les ressources de la mémoire de travail afin d'arriver à une solution satisfaisante, en se basant sur un archive de connaissances (formelles, procédurales, etc..) stockés sous la forme de représentations mentales dans le « réservoir » de la mémoire à long terme [Fig.2]. Les représentations mentales qui entrent en jeu dans le processus de conception sont donc de deux types principaux :

- les représentations stockées dans la mémoire à long terme
- les représentations temporaires produites et modifiées dans le « calepin »<sup>1</sup> de la mémoire de travail

<sup>1</sup> Voir chap. 1.3

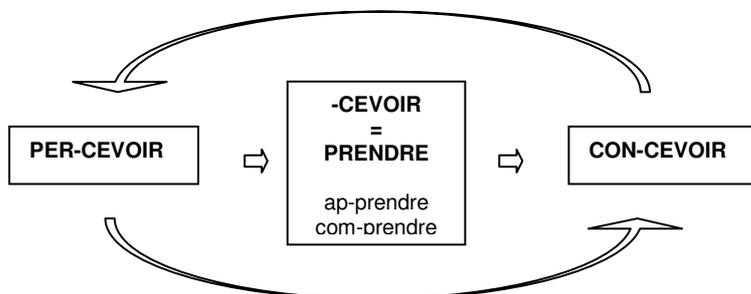


**Fig. 2** Le processus de conception se développe à travers l'interaction étroite entre la mémoire à long terme (réservoir des représentations mentales) et la mémoire de travail (dans laquelle se construisent des représentations temporaires).

La construction des représentations mentales (archivées ou temporaires) qui constituent le cadre de référence pour la conception, ainsi que les stratégies de résolution de problème choisies pour l'élaboration des formes, dépendent des mécanismes perceptifs et de l'apprentissage.

### 1b. Elaboration perceptive et processus de conception

Dans la créativité humaine en général et dans la conception en particulier, la perception et les mécanismes perceptifs occupent une place particulièrement importante : comme on peut le supposer en regardant l'étymologie des deux mots, per-cevoir et con-cevoir sont deux opérations complémentaires, articulées autour du verbe *-cevoir*, issu du latin *cāpere*, qui signifie *prendre* ou, dans ce cas, *ap-prendre* et *com-prendre*. L'acte de la *-préhensions*, prise ou possession, est précédé d'une *per*-ception, à *travers (per)* laquelle les informations sont reçues, et il est suivi d'une *con*-ception, qui, *avec (cum)* les informations ainsi acquises crée quelque chose de nouveau. Dans le cas particulier de la conception spatiale, en raison du rôle déterminant assuré par les opérations visuelles, la perception (en particulier la perception visuelle) et ses mécanismes sont encore plus importants que dans d'autres genres de conception.



**Fig. 3** Per-cevoir et con-cevoir sont deux opérations complémentaires, car toute conception est issue de la pensée, qui se construit à partir de la perception.

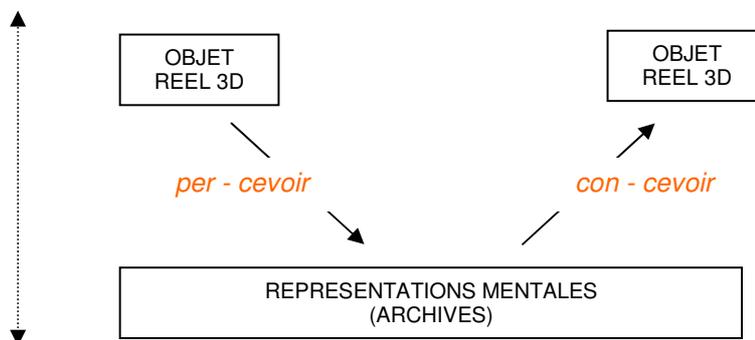
D'ailleurs, le lien étroit entre les mécanismes perceptifs et l'organisation de notre pensée est largement prouvé et renvoie à la question plus ample des lois qui structurent la relation entre l'espace mental interne et l'espace physique externe. Les mécanismes perceptifs assument évidemment un rôle primordial dans cette relation, la perception étant notre seul moyen de connaissance sur le monde externe: tout apprentissage sur la réalité physique est nécessairement issue d'une opération perceptive. Un très

intéressant point de vue sur ce sujet est fourni par R. Arnheim, qui écrit, dans son ouvrage *La pensée visuelle* [ARN69] : « Le raisonnement, selon Schopenhauer, est féminin de nature : il ne peut donner qu'après avoir reçu. Privé d'information sur ce qui se passe dans l'espace et dans le temps, l'esprit est incapable de fonctionner. » En particulier, dans les domaines artistiques (et en particulier dans ceux qui s'occupent de qualités spatiales), les processus créatifs se constituent comme « une forme de raisonnement dans laquelle perception et pensée sont indissociablement liés. » [ARN69]

Dans le cadre spécifique de la conception en architecture et ingénierie, les mécanismes perceptifs (et en particulier la perception visuelle) nous semblent particulièrement importants par rapport à deux questions principales :

1. La conception repose sur un *réservoir* d'idées et d'expériences qui est formé à travers la perception du monde physique et à travers l'accumulation de connaissances procédurales [Fig.4]. En particulier dans le cas de la conception spatiale (voir chap. 2.1) le raisonnement par cas et le mécanisme de l'analogie sont fondamentaux: le réservoir des représentations mentales se révèle donc déterminant, comme l'a bien expliqué H. Hertzberger dans ses *Lessons for students in architecture* [HER91]: *“Tout ce qui est absorbé et enregistré dans la pensée s'ajoute à la collection d'idées stockées dans la mémoire: une sorte de bibliothèque qu'on peut consulter quand un problème se présente. Donc, finalement, plus on a vu, essayé et absorbé, et plus nombreuses seront les références qui vont nous aider à faire le choix de la direction à prendre: notre cadre de référence s'élargit.”*<sup>2</sup> (traduction libre personnelle)

ESPACE PHYSIQUE



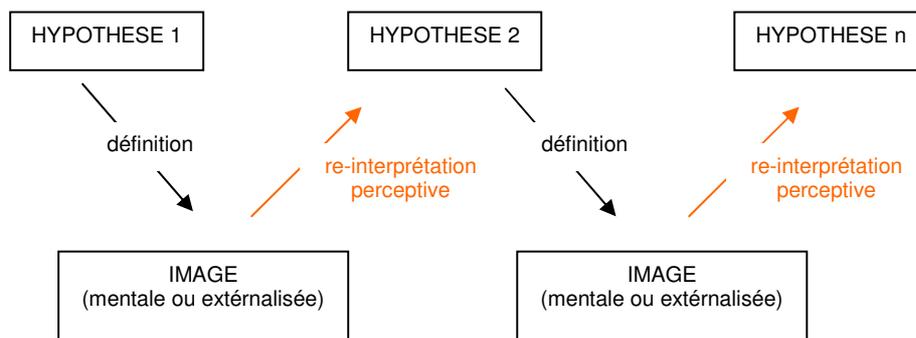
ESPACE MENTAL

**Fig. 4** La conception repose sur un réservoir d'idées et d'expériences formé à travers la perception du monde physique.

2. Les mécanismes de *résolution de problème* dans la conception spatiale procèdent selon des re-interprétations d'images (aussi bien mentales que physiques, comme des dessins), dans un processus itératif dans lequel les mécanismes perceptifs sont fondamentaux [Fig.5], car les images mentales fonctionnent et sont traitées perceptivement de la même façon que les objets et les formes réelles [KAV01]. Un exemple très parlant à ce sujet est celui qui est choisi par Newell et Simon [NEW72], qui ont analysé les opérations cognitives dans un cas particulier et très significatif de résolution de problème : le jeu d'échecs. Ce qu'ils ont découvert c'est que les joueurs experts n'ont pas seulement des connaissances procédurales plus

<sup>2</sup> "Everything that is absorbed and registered in your mind adds to the collection of ideas stored in the memory: a sort of library that you can consult whenever a problem arises. So, essentially the more you have seen, experienced and absorbed, the more points of reference you will have to help you decide which direction to take: your frame of reference expands." [HER91]

développées que les non-experts, mais ils ont surtout une perception différente : dans la résolution d'un problème, cette expertise dans la perception est aussi importante (peut être même plus importante) que celle dans l'action. En particulier, dans la conception spatiale, on sait que les re-interprétations perceptives des images mentales et des croquis sont essentiellement basées sur la perception visuelle ; l'analyse des mécanismes à la base de cette modalité perceptive nous semble donc fondamentale afin de comprendre les logiques cognitives qui sous-tendent l'élaboration d'une forme dans un processus de conception architecturale.



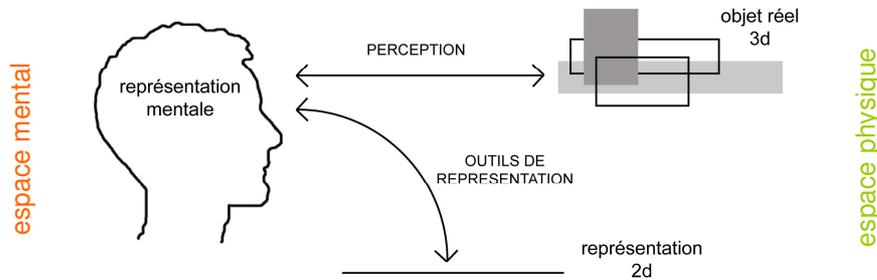
**Fig. 5** La conception spatiale est un processus itératif dans lequel la re-interprétation perceptive des images (mentales ou physiques, comme les croquis) produites au fur et à mesure détient un rôle fondamental.

La compréhension des mécanismes perceptifs et des lois qui les structurent est fondamentale si on veut s'intéresser aux processus de conception architecturale d'un point de vue cognitif, pour deux raisons principales : d'abord, le *réservoir* de représentations internes stockés dans la mémoire, nécessaire à la création, se construit à partir de la perception du monde physique ; deuxièmement, l'élaboration formelle des représentations internes dans l'espace mental est basée sur les mêmes mécanismes perceptifs que ceux qui organisent l'action perceptive dans l'espace physique. En plus, nous pensons que dans l'architecture Non-Standard, en raison de la complexité formelle, constructive et procédurale qu'elle présente, ainsi qu'en relation aux outils de représentation utilisés dans la conception, des mécanismes perceptifs très spécifiques doivent être mis en place.

### 1c. Elaboration perceptive et outils de représentation

La relation entre le monde mental du concepteur et le monde physique se déroule, dans les processus de conception, selon deux modes principaux : en premier lieu la relation entre les objets réels 3d (le monde physique) et leurs représentations propres à l'esprit du concepteur ; deuxièmement la relation entre ces représentations internes et les représentations externes produites par le concepteur (sous la forme de dessins ou maquettes) [Fig. 6]. On a vu dans le chapitre 1.2 qu'on peut analyser un processus de conception spatiale comme une série récursive d'opérations de résolution de problème, dont l'objectif est l'élaboration d'une forme spatiale tridimensionnelle ; ce processus itératif d'élaboration est essentiellement constitué par des séquence d'analyse/synthèse/évaluation qui visent à restreindre l'espace des solutions possibles, jusqu'à ne conserver que la solution « relativement optimale », c'est à dire la meilleure possible en relation aux données du problème et aux choix personnels du concepteur. Une des caractéristiques spécifiques de la conception en architecture et ingénierie, par rapport à d'autres formes possibles de conception (comme littéraire, scientifique, technologique, parmi d'autres) est celle de concerner des problèmes spatiaux ; on pourrait même définir exhaustivement cette catégorie de conception comme *élaboration d'une forme*, c'est-à-dire d'une certaine

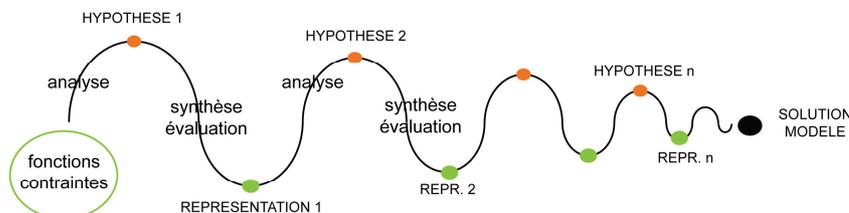
configuration géométrique matérielle, capable de satisfaire les fonctions et les contraintes données. Evidemment il y a des questions non directement spatiales qui entrent en jeu, mais dans la recherche d'une solution on agit toujours au niveau formel, c'est-à-dire sur le paramètre forme, bien entendu dans sa qualité matérielle qui considère aussi la technologie et le matériel utilisé pour sa réalisation. La « solution » du processus c'est en effet la configuration formelle qui répond « au mieux » aux exigences et aux contraintes données.



**Fig. 6** Les deux modes d'échange au cœur du processus de conception spatiale sont la perception, qui gère les relations entre représentation mentale et objet réel et les outils de représentation, qui gèrent les relations entre représentation mentale et représentation 2d (ou 3d virtuel ou 3d à l'échelle -maquette-).

En raison de cette importance des données formelles dans la conception spatiale, les outils de représentation, et en particulier les outils visuels, assument un rôle déterminant. L'interaction entre le concepteur et le dessin est une des opérations clés dans le développement efficace d'une idée spatiale. Plusieurs études (dont on a parlé en détail dans le chapitre I.2), ainsi que l'expérience directe, permettent en fait d'affirmer que les boucles d'analyse/synthèse/évaluation dans la conception spatiale sont basées sur l'interaction entre les idées développées dans le monde mental du concepteur et une représentation visuelle physique de ses idées (dessin 2d, modèle virtuel 3d, maquette), qui constitue un passage fondamental pour les opérations de synthèse et évaluation [Fig.7].

espace mental



**Fig. 7** Le processus de conception spatiale se développe en une série d'opérations récursives d'analyse/ synthèse/ évaluation basées sur l'interaction entre le monde mental du concepteur et les représentations qu'il en fait.

espace physique

En particulier, les modes de représentation visuelle bidimensionnelle, sous la forme de dessin ou de diagramme, sont dominantes dans la conception spatiale. L'utilisation de maquettes à l'échelle est aussi un moyen puissant utilisé pour la représentation des qualités spatiales dans l'élaboration formelle, mais la communication visuelle en deux dimensions (tant sur une feuille de papier que sur l'écran d'un ordinateur) reste dominante dans la conception en architecture et ingénierie, dès les premiers croquis conceptuels, jusqu'aux dessins techniques pour la construction. En raison de l'importance fondamentale de ces questions, il nous semble important de chercher à clarifier le genre de relations structurales qui organisent le système de relations entre les représentations mentales du concepteur, l'objet réel et ses représentations 2d. En particulier, il nous semble important de comprendre quelle est l'influence de l'outil de représentation utilisé sur le processus de résolution de problème choisi pour l'élaboration d'un objet ou

d'un espace, ainsi que sur la construction des représentations mentales des objets conçus.

#### *1d. Apprentissage et expertise dans la conception spatiale*

En sachant que la construction des représentations mentales dans le cerveau humain se fait à partir de la perception et de l'apprentissage, des processus sur lesquels l'expérience, l'expertise et la culture ont une influence déterminante, nous pouvons supposer que les représentations mentales d'acteurs qui participent au même processus de conception, mais qui ont une formation et une expertise différentes, sont probablement structurées différemment. Une meilleure compréhension des modes de construction et organisation des représentations mentales en relation à l'expertise nous semble nécessaire afin d'améliorer la communication et l'interaction (pas toujours facile, comme on le sait bien) entre les différents acteurs d'un processus de conception spatiale.

Plusieurs questions nous semblent importantes sur ce sujet :

- \_ Quel genre d'influence a une certaine expertise sur la construction des représentations mentales ?
- \_ Existe-t-il des représentations qui sont « universelles », invariantes par rapport à la culture, à l'éducation, à l'expertise ?
- \_ Si deux spécialistes ont des expertises différentes, ils ont probablement des représentations mentales différentes du même phénomène : comment assurer une communication efficace ?

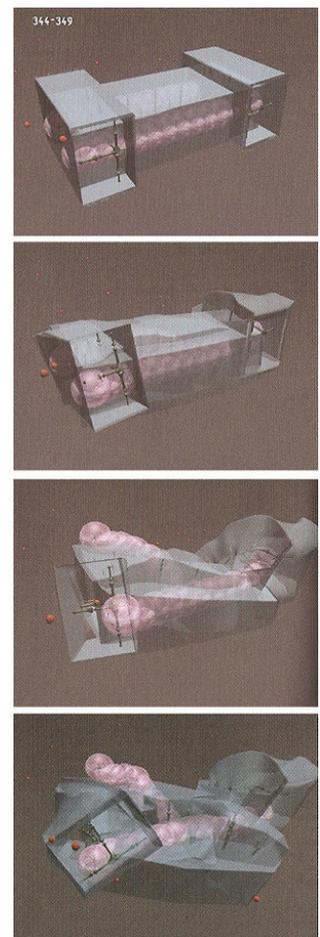
## I.4/2 LES PROCESSUS DE CONCEPTION DANS L'ARCHITECTURE NON-STANDARD

En raison de la complexité du lien entre l'idée et sa matérialisation (mécanique ainsi que technologique) dans le cas des formes complexes, la conception de l'architecture Non-Standard propose, d'un point de vue cognitif, des questionnements qui concernent principalement la gestion mentale du rapport entre la continuité et la discontinuité dans la conception et la réalisation en architecture et ingénierie. En se basant sur les préliminaires présentés dans les chapitres précédents, on va dans la suite proposer une modélisation du processus de conception de l'architecture Non-Standard en relation avec trois caractéristiques qui nous semblent avoir le plus d'impact sur le développement des processus cognitifs pendant l'élaboration spatiale: la première est le conflit entre la *continuité* du monde mental de la conception des formes Non-Standard et la *discontinuité* du monde physique de la construction ; la deuxième est le rôle déterminant des *outils de modélisation numérique* dans le processus d'élaboration des formes complexes ; la troisième est le bouleversement du *système de relations* entre les différents acteurs qui participent au processus de conception, en particulier entre les architectes et les ingénieurs.

### 2a. Morphogenèse et composition

Au niveau perceptif, les *formes à courbure variable continue ou à géométrie hautement irrégulière* des projets Non-Standard sortent des schémas formels à dominante orthogonale à travers lesquels nous sommes habitués à élaborer la tridimensionnalité de l'environnement bâti occidentale contemporaine, spécialement après la période moderne et postmoderne, car ces formes complexes, courbes ou hautement irrégulières, nous proposent un langage formel et spatial différent. Le rôle d'icônes qu'assument souvent les bâtiments qui présentent des formes complexes (comme cela a été le cas pour le Musée Guggenheim à Bilbao en 1996 ou, plus récemment, en 2008 pour le Stade Olympique à Pékin) traduit bien la curiosité et l'intérêt, positif ou négatif, que ces constructions suscitent inévitablement, en raison de la puissance visuelle de leurs formes. Une question surgit donc spontanément : au delà de cette réaction spectaculaire immédiate, quels effets ont-ils à long terme ces formes et espaces, originels et inattendus, sur notre « image » du monde ?

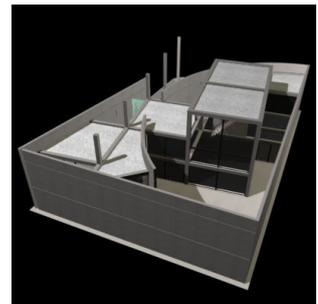
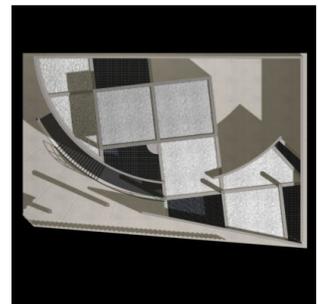
Du point de vue de la conception, les opérations d'élaboration formelle dans l'architecture Non-Standard sont le résultat d'une approche théorique centrée sur l'idée de *continuité* : les actions sur les formes sont essentiellement des opérations de modification continue, ou déformation, d'une entité unitaire imaginée comme souple [Fig.8a] et [Fig.8b], ou bien des modifications incrémentales (très petites et appliqués en très grand nombre) sur la configuration d'un ensemble. Le concept de *morphogenèse*, qui renvoie au développement des formes vivantes, animales ou végétales, est la métaphore qui est plus souvent utilisée pour décrire ce genre de processus.



**Fig. 8** La forme comme résultat d'une déformation continue.  
G. Lynn, House prototype, Long Island, USA (1994), modélisation numérique (en haut) et maquette (à gauche).

Un tel système d'élaboration formelle est nettement opposé aux systèmes « traditionnels » de conception en architecture et ingénierie, qui reposent principalement sur des opérations de *composition* : au niveau formel, dans ce cas, il s'agit de la composition de figures élémentaires (opérations de rotation, union, soustraction, etc.) [Fig. 9] et au niveau matériel de la composition d'un ensemble d'éléments discrets agencés dans une structure (colonnes et poutres, par exemple). Les logiques d'organisation formelle typiquement utilisées dans la « composition », comme par exemple les grilles, les systèmes proportionnels ou les modules, qui sont basés sur des propriétés ponctuelles ou linéaires, résultent inutilisables dans des processus de morphogenèse, qui procèdent à travers des variations continues et hautement variables. De la même façon, les logiques perceptives liées à la forme la plus simple, ou à la réduction à un ensemble de formes élémentaires ne semblent pas eux aussi efficaces. Le premier questionnement par rapport à la conception de l'architecture Non-Standard concerne donc les stratégies cognitives auxquelles on peut avoir recours pendant un processus d'élaboration formelle de type morphogénétique. On sait que la gestion perceptive et la construction des représentations mentales des formes continues et complexes repose sur des mécanismes spécifiques (par rapport aux formes plus simples) la plus part desquels restent encore largement méconnus. La difficulté dans la compréhension des mécanismes de reconstruction morphologique des surfaces continues courbes, par exemple, dépend de l'absence de formes élémentaires, d'arrêts, de lignes de direction verticales ou horizontales ou d'autres éléments de référence ; les indices qui restent sont des gradients, comme la texture ou les ombres. Evidemment la relation entre ces indices et le processus d'élaboration formelle n'est pas aussi facile à identifier comme pourrait l'être dans le cas de la composition d'un ensemble des formes élémentaires. Des études expérimentales [KOE90] ont démontré, par exemple, que notre système perceptif est capable de reconnaître la différence entre une surface synclastique, comme une coupole, et une surface anticlastyque, comme une selle de cheval. Les variations internes de la surface, à l'intérieur de ces catégories, sont perceptivement beaucoup plus difficiles à détecter et à juger. Sur quel genre d'indices seront donc basées les stratégies d'élaboration formelle mises en place dans l'élaboration d'une forme à courbure hautement variable? Comment notre cerveau fait-il pour synthétiser l'information complexe de la forme d'une courbe à travers des éléments assez simples pour être gérés, par exemple, dans un processus d'élaboration formelle? Si les stratégies « traditionnelles » de la composition architecturale apparaissent inutilisables, on peut supposer, par exemple, qu'elles soient transposables à la courbure avec des modifications: quelles lois pourrait suivre cette transposition hypothétique?

Un deuxième questionnement, qui nous semble encore plus important que le premier, surgit par rapport au décalage qu'on remarque actuellement entre la conception et la réalisation des projets Non-Standard : le domaine de la *conception* « morphogénétique » est *continu*, courbe, souple, fluide [Fig.10 en haut]; le domaine de la *construction*, au contraire, est actuellement *discontinu* et essentiellement linéaire [Fig.10 en bas]. On a vu que les plus cohérentes des expérimentations Non-Standard visent idéalement à développer des nouvelles idées tectoniques dans les modes de matérialisation et non pas simplement des abstraites idées formelles. Cependant les moyens actuels de la production et réalisation architecturale ne permettent pas vraiment la réalisation, par exemple, de surfaces effectivement continues ou l'agencement d'un ensemble complexe de pièces personnalisées sans avoir recours à des moyens économiques et matériels souvent disproportionnés vis-à-vis du résultat. La cohérence entre l'idée et la réalisation repose donc actuellement sur un choix de l'organisation



**Fig. 9** La forme comme résultat d'une opération de composition de formes élémentaires.  
T.Ando, Ito House, Japon (1990)



**Fig. 10** Le domaine de la conception « morphogénétique » du Non-Standard est continu (en haut), celui de la réalisation est discontinu (en bas).  
Toyo Ito, I-project, Japon (2005)

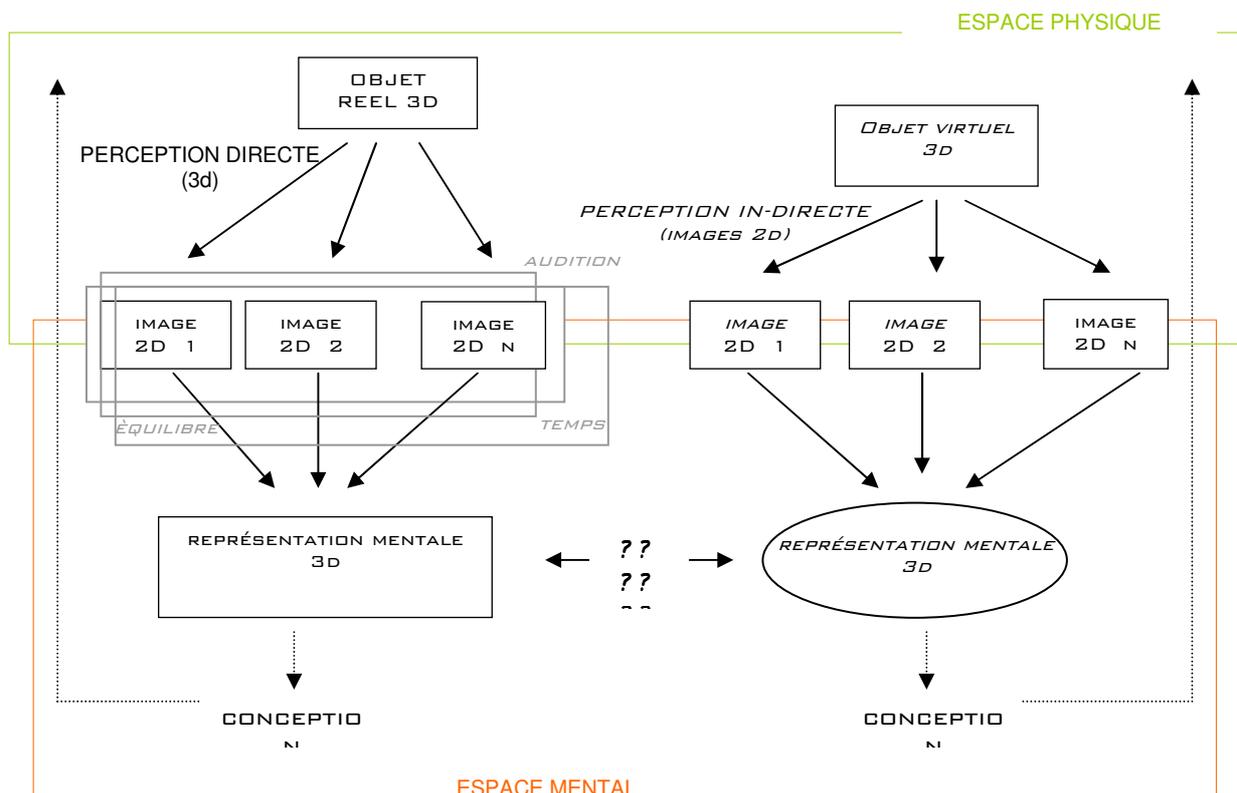
structurale, des matériaux et de la technologie de matérialisation qui puisse réduire au minimum ce décalage entre la continuité de la conception et la discontinuité de la réalisation. L'efficacité de ce choix repose en bonne partie sur l'efficacité dans la gestion perceptive d'agencements complexes de formes dans l'espace.

D'un point de vue formel, deux questions émergent donc comme spécifiques dans l'architecture Non-Standard en relation avec l'élaboration perceptive et cognitive pendant le processus de conception : la *courbure variable continue* et les *agencements géométriques à haute irrégularité*.

## 2b. La conception numérique

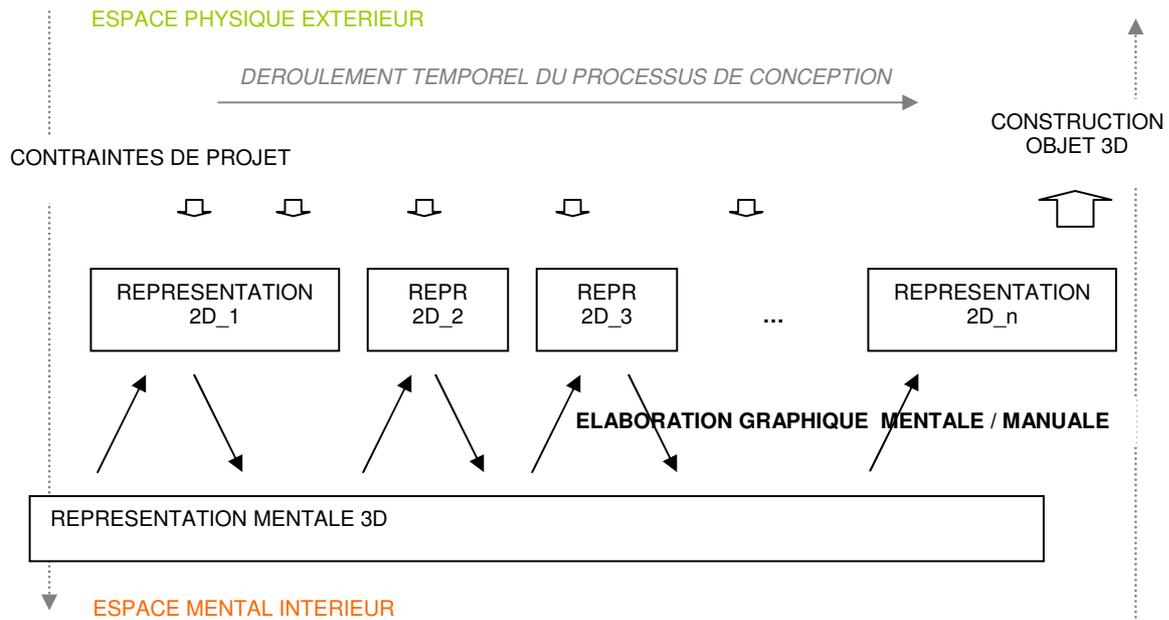
Les outils numériques dans l'architecture Non-Standard occupent un rôle fondateur et essentiel, que va bien au-delà de la simple visualisation, car ils concernent tant la modélisation spatiale, la modélisation mécanique, ainsi que la gestion organisationnelle. Pour ce qui concerne en particulier les outils de représentation, en l'état actuel les outils de modélisation et animation tridimensionnelle des formes sont de nature fondamentalement différente des outils de dessin « passifs », comme pouvaient l'être les premiers logiciels des années 70 ou 80, qui correspondaient, on peut dire, à un mimétisme des opérations réalisées à la règle et au compas en numérique, dans le sens qu'ils fonctionnaient selon les mêmes logiques constructives que la géométrie descriptive. Les logiciels contemporains permettent au contraire de modéliser des formes de façon purement visuelle et intuitive, sans avoir aucune connaissance sur leur nature géométrique ou analytique ; ils permettent aussi de générer des formes de façon « automatique » à travers des algorithmes dont on ne contrôle que certains paramètres, qui donnent une certaine forme comme résultat. Evidemment ce genre d'outils a un potentiel énorme, comme celui de visualiser des configurations spatiales complexes, impossibles à obtenir à travers le dessin à la main, ou bien la possibilité de modéliser des phénomènes mécaniques ou thermiques caractérisés par l'interaction complexe, le couplage d'un très grand nombre de variables.

**Fig. 11** Nous supposons que les représentations mentales issues des objets virtuels, qui résultent exclusivement d'un ensemble de multiples vues 2d sur un écran sont de nature différente par rapport à celles issues des objets réels, qui sont au contraire le résultat d'une perception multi sensorielle : quelles sont-elles les caractéristiques spécifiques des représentations mentales issues des modèles numériques ?

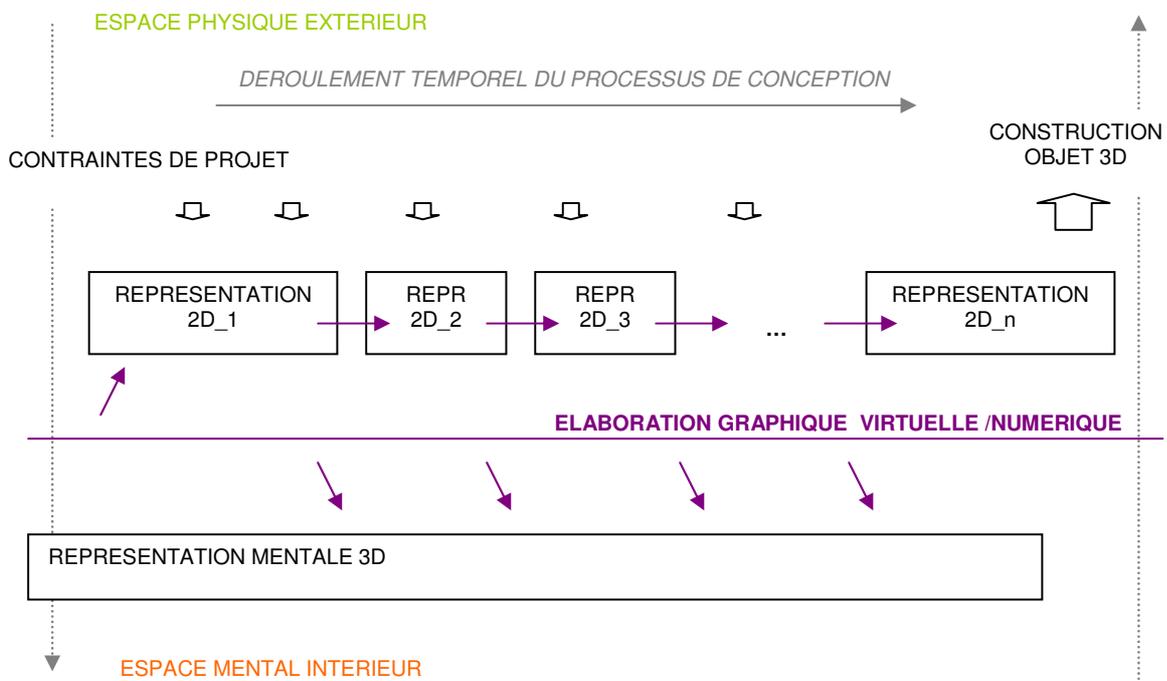


En même temps, les outils de représentation numériques présentent aussi des limites, qui dépendent surtout, à notre avis, du fait qu'il s'agit d'outils qui sont essentiellement *visuels* ; la limite principale est celle d'introduire un décalage fondamental entre les objets visualisés, leurs qualités tridimensionnelles effectives et donc la possibilité de leur construction. Ce décalage, dans la conception « analogique » (faite à l'aide de la règle et du compas), pouvait être dépassé exactement grâce au dessin et en particulier à travers la géométrie descriptive, qui permet de prendre conscience de l'effective tridimensionnalité des objets imaginés et donc de la possibilité de leur construction dans l'espace. Les représentations mentales issues des images numériques, qui résultent exclusivement d'un ensemble de multiples vues 2d, doivent forcément être de nature différente par rapport à celles issues des objets réels, qui sont au contraire le résultat d'une perception multi sensorielle [Fig.11]. Le lien entre les images sur l'écran, les représentations mentales des concepteurs et les objets réels de l'espace physique tridimensionnelle risque d'être faible, ce qui amènerait inévitablement à un décalage avec les questions constructives. On remarque aussi une autre caractéristique spécifique de la conception numérique : dans le processus de conception « analogique », la forme est élaborée à travers des représentations 2d (croquis ou dessins techniques -géométrie descriptive-) basées sur l'élaboration mentale et manuelle des informations ; la représentation extérieure est donc directement dépendante de la représentation mentale interne du concepteur, qui est externalisée à travers le dessin et qui au fur et à mesure évolue à travers les boucles successives de re-représentation extérieure [Fig. 12a]. Dans la conception « numérique », au contraire, le lien entre la représentation mentale interne du concepteur et la représentation externe perd de sa cohérence car les outils de modélisation introduisent entre les deux une barrière, constituée des algorithmes qui permettent de passer des commandes (sur lesquelles agit le concepteur) aux véritables qualités géométriques et analytiques des formes modélisées. En plus, la forme évolue souvent de façon autonome de la volonté directe du concepteur, car cette évolution suit des logiques qui dépendent d'un ensemble paramètres sur lesquels le concepteur agit ; le lien direct entre l'image mentale du concepteur et la représentation de la forme est coupée [Fig. 12b]. On peut donc affirmer que, du point de vue cognitif, une des principales caractéristiques des processus de morphogenèse digitale est celle d'introduire une barrière opaque entre les qualités formelles élaborées et les correspondantes représentations mentales du concepteur.

Nous supposons donc que, d'un point de vue cognitif, les processus de conception entièrement basés sur le numérique doivent forcément être de nature différente par rapport aux processus développés à travers des outils analogiques et nous voulons mieux comprendre en quoi ils sont différentes. Ce qui nous intéresse, par exemple, c'est de comprendre quelles stratégies cognitives d'élaboration formelle peuvent être mises en place dans ce genre de processus. Du point de vue des mécanismes perceptifs et de la construction des représentations mentales des formes complexes, quelles sont les informations disponibles sur l'écran d'un ordinateur ?



**Fig. 12** Dans le processus de conception « analogique », la forme est élaborée à travers des représentations 2d (croquis ou dessins techniques -géométrie descriptive-) basées sur l'élaboration manuelle et mentale des informations ; cette représentation extérieure dépend directement de la représentation mentale interne du concepteur, qui est externalisée à travers le dessin et qui au fur et à mesure évolue à travers les boucles successives de re-représentation [Fig. 12a (en haut)]. Dans la conception « numérique », au contraire, le lien entre la représentation mentale interne du concepteur et la représentation externe perd de sa cohérence, car les outils de modélisation introduisent une « couche » opaque entre les deux ; de plus, souvent la forme évolue selon des principes dépendants d'un système logique non directement formel, ce qui crée des formes dont les caractéristiques géométriques sont en grand partie inconnues ou non directement contrôlées par le concepteur [Fig. 12b (en bas)].



### *2c. La collaboration entre les acteurs dans la conception*

Les processus de conception de l'architecture Non-Standard sont caractérisés par une extrême complexité organisationnelle : les défis mécaniques et technologiques proposés par les formes complexes, ainsi que les système contemporain de travail, basé sur l'hyper-spécialisation disciplinaire, requièrent la participation et la collaboration étroite de nombreux spécialistes. En particulier, la collaboration entre architecte et ingénieur est appelée à prendre des nouvelles formes par rapport aux habitudes modernes et postmodernes dans lesquelles l'architecte s'occupe de la forme et, a posteriori, demande à l'ingénieur de calculer une structure adaptée à cette forme, capable d'assurer la résistance mécanique. Dans l'architecture Non-Standard la collaboration entre les deux est nécessaire depuis les premiers pas du développement de la conception afin d'obtenir des formes qui répondent tant aux exigences esthétiques qu'aux exigences mécaniques. L'efficacité de la communication dans des processus de ce genre, au cours desquels plusieurs acteurs interagissent dès les premières étapes de l'activité de conception, est, évidemment, déterminante. La compréhension des systèmes de communication entre acteurs est un sujet très fertile au niveau théorique ainsi qu'opérationnel. Cependant, dans les processus de conception de l'architecture Non-Standard, la complexité du système de relations entre les acteurs qui y participent, ainsi que leur grand nombre, rendent d'abord nécessaire la définition claire du contexte de cette communication. Au delà des limites techniques à l'échange des informations, comme par exemple les langages de modélisation spécifiques des outils numériques utilisés pour la conception dans les différents domaines, il peut y avoir aussi des limites « cognitives », dues à la spécificité du monde mental de chaque spécialiste. Comme on l'a expliqué dans le chapitre I.3, les préconceptions et l'apprentissage sont à la base des mécanismes d'élaboration perceptive ainsi que de la pensée. Nous pouvons supposer que chaque expert qui participe à un processus de conception architecturale met en place des mécanismes perceptifs et des stratégies de résolution de problème spécifiques. La compréhension des mécanismes spécifiques, dépendant de l'expertise, ainsi que des mécanismes qui sont eux universels, semble fondamentale pour assurer une communication efficace.

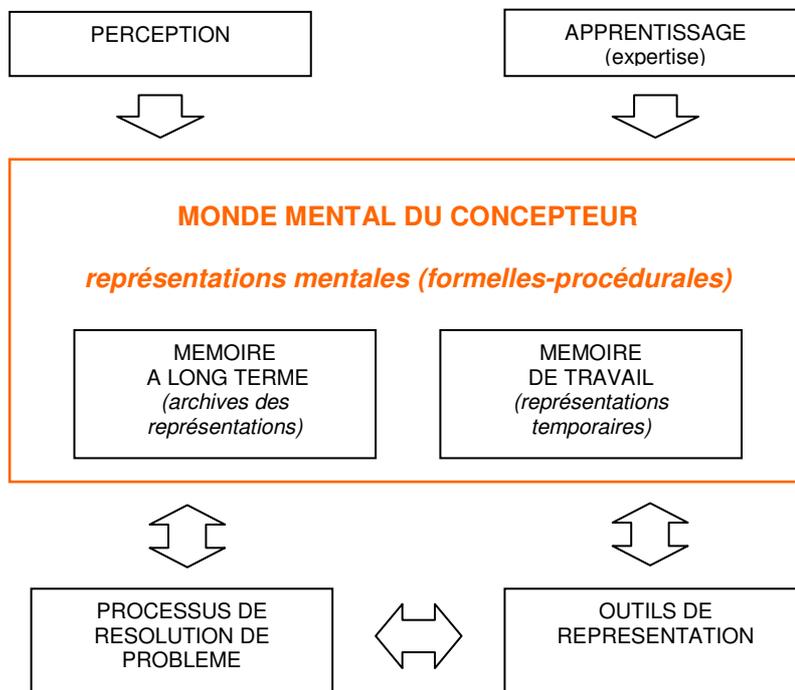
### 1.4/3 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Après avoir proposé une modélisation de la problématique que nous nous proposons d'explorer, celle des mécanismes cognitifs spécifiques à la conception spatiale des formes complexes dans l'architecture contemporaine Non-Standard, nous allons dans la suite brièvement préciser les objectifs de notre travail ainsi que la méthodologie utilisée pour les atteindre, basée, elle aussi, sur les préliminaires proposées dans la partie I et en particulier dans le chapitre I.3.

#### 3a. Objectifs de la thèse

L'objectif global de ce travail de thèse est celui de proposer une contribution à la compréhension des processus mentaux qui structurent la conception spatiale des structures tridimensionnelles à forme complexe dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie.

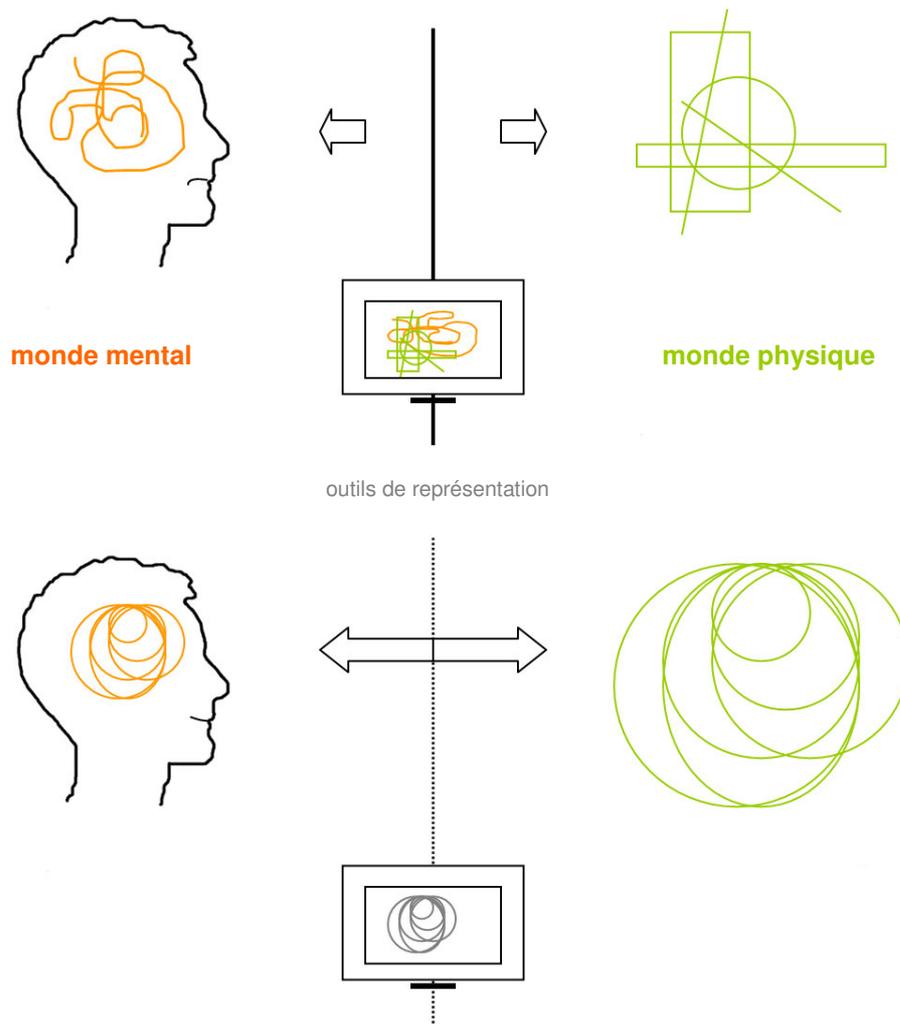
Le monde mental du concepteur (architecte ou ingénieur) est constitué d'un ensemble de *représentations mentales*, formelles et procédurales, qui peuvent être soit archivées, dans la *mémoire à long terme*, soit temporaires, dans la *mémoire de travail*. La construction de ces représentations repose sur les *processus perceptifs* et sur l'*apprentissage* (expertise) et leur structure détermine le *processus de résolution de problème* choisi pour le développement de la conception. Dans le cas des processus spatiaux les *outils de représentation* jouent un rôle clé dans l'interaction entre l'objet conçu dans le monde mental du concepteur et la réalité physique, en raison de l'importance de la communication (intra- et inter-personnelle) de type visuel dans la conception spatiale [Fig.13].



**Fig. 13** La conception spatiale est articulée, du point de vue cognitif, autour de la relation entre le monde mentale des concepteurs (dont la structure dépend essentiellement des mécanismes perceptifs et de l'apprentissage), les outils de représentations utilisées et les stratégies de résolution de problème choisies pour l'élaboration de la forme.

Dans ce cadre, nous avons essayé de clarifier les relations organisationnelles à la base du système d'interactions entre le monde mental du concepteur et le mode physique en relation avec les outils de représentation, dans le cas particulier des formes complexes. Plus

précisément, les qualités formelles de la *courbure* et des organisations géométriques à *haute irrégularité* seront traitées du point de vue des lois qui structurent les relations entre nos perceptions et les qualités géométriques des objets observés. La compréhension de ces lois nous semble nécessaire afin de pouvoir reconstruire une cohérence effective entre le monde mental des concepteurs, les modèles et les images qui sont visualisées sur les écrans des ordinateurs et les objets réellement construits dans l'espace physique tridimensionnel. Cette cohérence, comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, semble être très faible dans certaines des expériences liées à l'architecture Non-Standard et requiert certainement une nouvelle interprétation par rapport aux enjeux, technologiques, matériels et esthétiques, de l'architecture et de l'ingénierie contemporaines.



**Fig. 14** La cohérence entre le monde mentale des concepteurs, les outils de représentation numériques et les objets du monde physique n'est pas toujours assurée à l'état actuel. La compréhension des lois qui structurent cette relation nous semble nécessaire afin d'obtenir des processus de conception efficaces. Notre travail de thèse voudrait contribuer à clarifier certaines de ces lois.

Dans le cas des formes complexes et des processus de « conception numérique » (caractéristiques essentielles de la conception Non-Standard), la question du rapport entre le monde mental des concepteurs, les stratégies spatiales de résolution de problème (c'est-à-dire les stratégies d'élaboration formelle des objets conçus) et les outils de représentations utilisés peut être synthétisée selon une série de questions-clé:

- a. comment la qualité de courbure est-elle élaborée perceptivement? est-il possible identifier des lois et des invariants capables de décrire la structure perceptive à la base de la sensation de courbure?

- b. quelles sont les logiques qui organisent l'élaboration perceptive de formes complexes qui ne peuvent pas être directement associées à des formes élémentaires ou à un ensemble de parties plus simples?
- c. la réalité virtuelle est-elle une réalité augmentée ? par rapport à quels paramètres peut-on affirmer qu'elle est « augmentée » ?
- d. existe-t-il des spécificités dépendant de l'expertise des sujets et en particulier de leur expertise en géométrie ?

Notre travail de thèse se propose de fournir des données qui puissent se révéler utiles pour la clarification de ces questions. La partie expérimentale que nous avons mise en place à cette fin est organisée en deux expériences indépendantes :

1. une première expérience concerne la sensation de courbure perçue, obtenue en observant un segment courbe bidimensionnel (une ligne de contour courbe) ; l'objectif de cette expérience est l'identification d'une loi capable de modéliser la relation entre notre sensation de courbure et les qualités géométriques de la courbe observée et, si possible, la mise en évidence d'invariants capables de reproduire cette relation au delà des cas particuliers.
2. Une deuxième expérience concerne la résolution d'un problème spatiale, dans un travail de dessin de mémoire de certains éléments critiques d'une structure à géométrie complexe. L'objectif de cette deuxième expérience est la mesure de l'efficacité du processus de résolution en relation avec l'outil employé pour la représentation : une image bidimensionnelle, une maquette réelle, un modèle virtuel exploré sur l'écran de l'ordinateur.

Ces deux expériences ont été conduites sur deux populations d'étude (un groupe d'experts dans la géométrie et la conception spatiale et un groupe de non-experts) avec l'objectif de faire émerger d'éventuelles influences sur les mécanismes perceptifs et de résolution de problème de certaines expertises spécifiques (c'est-à-dire des connaissances apprises).

Afin d'obtenir un' étude scientifique pertinente de ces questions nous avons choisi d'emprunter les méthodes de deux disciplines de la *psychologie expérimentale*, l'un des principaux sous domaines des sciences cognitives : la *psychophysique sensorielle* et l'*analyse cognitive des processus d'apprentissage* et de *résolution de problème*.

### *3b. Méthodologie : la psychologie expérimentale*

La psychologie expérimentale est une science basée sur l'interprétation de la psychologie comme l'une des sciences naturelles, susceptible donc d'être soumise à la méthode expérimentale. Il s'agit d'une définition essentiellement méthodologique, ce qui fait que cette discipline embrasse un ensemble varié et hétérogène de domaines. Dans le cadre de cette thèse, nous avons emprunté l'approche de la psychologie expérimentale pour l'appliquer dans le domaine des sciences cognitives (dont l'objet d'étude est la cognition, humaine ou artificielle) ; en particulier, nous avons utilisé les méthodes expérimentales de la psychophysique sensorielle et des études sur la résolution de problème.

#### *a. La psychophysique sensorielle*

La première expérience, qui concerne l'élaboration visuelle de la qualité de courbure perçue, consiste dans une étude de *psychophysique sensorielle* [STE75]. La psychophysique sensorielle est une branche de la psychologie expérimentale qui cherche à déterminer les relations quantitatives qui existent entre un stimulus physique et la perception qu'on en a. Dans la

psychophysique classique, on considère que les sensations visuelles réfléchissent l'expression des mécanismes cérébraux impliqués dans l'élaboration des informations spatiales ou temporelles transmises par les stimuli. Thurston [THU27] et après Stevens [STE56] [STE75] ont introduit les *échelles psychophysiques*, ou échelles de sensation, comme mesure pour les variations dans la réponse du système perceptif aux variations de certaines propriétés comme l'intensité sonore, la luminosité ou la chaleur pour certaines classes de stimuli comme les sons, la lumière, la température. Les fonctions psychométriques qui décrivent les réponses en échelle du système perceptif à des niveaux critiques d'une stimulation donnée sont définies comme lois psychophysiques, ou lois de sensation.

Cette discipline s'est beaucoup développée dans les pays anglo-saxons et en Allemagne comme un moyen précieux de recherche sur les mécanismes sensoriels humains dans le cadre de l'ergonomie cognitive et de l'ingénierie des structures et des postes de commande ou de travail. Cette sous-discipline de la psychologie cognitive propose des méthodes de mesure de la sensation de l'opérateur, créateur ou utilisateur humain face aux dimensions physiques d'un objet visuel, auditif, tactile, olfactif. Ces méthodes de mesure permettent de connaître les fonctions qui lient les niveaux physiques aux niveaux perçus. Dans le cadre de la conception de structures en architecture et ingénierie, les techniques psychophysiques permettent, par exemple, de définir les règles et lois qui gouvernent la perception des dimensions spatiales de l'objet en cours de conception. Une telle connaissance est utile sur le plan de l'application, voire indispensable, lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'opérateur humain (utilisateur, observateur) face à l'objet conçu. Elle apporte également des savoirs fondamentaux relatifs à la perception de l'espace physique par le système cognitif humain.

#### *b. Les études sur la résolution de problème*

La deuxième expérience concerne la résolution de problème dans le domaine spatial, en relation avec la structuration perceptive des formes à géométrie irrégulière et les outils de représentation utilisés. Les études sur la *résolution de problèmes* en sciences cognitives [ROB97] permettent, par exemple, d'étudier des questions relatives à la relation entre préconception et conception, ou encore les liens qui existent entre la nature des représentations de départ (relatives à la fonction souhaitée et à la structure visée, par exemple) et les étapes de réalisation de structures (problèmes du type « stratégie idéale » versus « stratégie effectivement empruntée », etc.).

#### *c. Les études de population*

Les études de population sont des études expérimentales basées sur la comparaison entre différentes populations d'étude ; on définit « population » un groupe de sujets qui partagent une certaine caractéristique commune. L'objectif de telles études est de mettre en évidence les réponses spécifiques (dans la performance, par exemple) d'une certaine population et donc de tracer des liens possibles entre cette réponse et la caractéristique spécifique à la population. On peut choisir une population, par exemple, par rapport à l'expertise spécifique dans un certain domaine, qui dépend de leur apprentissage (c'est-à-dire des connaissances apprises) ; on suppose qu'il est possible de faire émerger des correspondances entre certaines réponses cognitives et un certain apprentissage spécifique. Dans le cas particulier de cette thèse on a construit nos expériences sur deux populations d'étude : des experts dans le domaine de la conception spatiale et de la géométrie et des non-experts dans ces domaines.

Les informations spécifiques sur les plans expérimentaux et sur les outils statistiques employés pour l'élaboration des données seront détaillées dans le contexte de chaque expérience, dans la partie II.

## Partie I

# CONCLUSION

A la lumière des préliminaires théoriques présentés dans ce premier chapitre, nous pouvons affirmer que *l'une des problématiques plus importantes actuellement soulevées par l'architecture Non-Standard est celle du décalage, source potentielle de conflit, qui est présent entre la conception et la réalisation.*

L'idée de continuité (organisationnelle et formelle) est structurante dans la conception, alors que dans le domaine de la construction elle est encore, dans l'état actuel, discontinue. Ce conflit entre continuité et discontinuité et, dans un sens plus large, entre idée et matérialisation est présent dans différents aspects de la production architecturale Non-Standard. Pour ce qui concerne les qualités morphologiques, on a identifié la *courbure variable continue* et les *configurations spatiales à haute irrégularité* comme caractéristiques de l'architecture Non-Standard. Au niveau procédural, on a vu que les *outils numériques* sont dominants (voire presque exclusifs) dans la conception Non-Standard, jusqu'à faire supposer qu'ils sont à l'origine d'un processus de conception spécifique et particulier : la « conception numérique » (en anglais « digital design »). Enfin, on a noté un changement profond dans le système d'interactions entre les différentes personnes qui interviennent dans l'élaboration spatiale : une collaboration étroite à partir du début du processus d'élaboration est indispensable afin de gérer au mieux les problématiques soulevées par les formes complexes.

Par rapport à ces questions, nous supposons que la conception de l'architecture Non-Standard va solliciter, au niveau cognitif, des mécanismes d'élaboration perceptive et procédurale différents et spécifiques par comparaison avec la conception traditionnelle, essentiellement basée sur l'opération de composition d'éléments simples et sur des procédures analogiques standard de projet et vérification. Ce constat nous a amené à nous intéresser aux processus cognitifs qui sont à la base de la conception architecturale.

Trois questions nous semblent déterminantes à ce sujet:

- la première concerne la structuration géométrique des représentations mentales des formes complexes (complexité que nous identifions avec la courbure et la haute irrégularité), ainsi que des opérations de manipulation qui les font évoluer vers la solution formelle finale ;

- la deuxième est relative aux outils de représentation (le dessin à la main, les représentations numériques et les maquettes) qui permettent d'extérioriser ces images mentales et qui sont fondamentaux pour le raisonnement visuel sur lequel repose la conception spatiale ;
- la troisième rend compte des mécanismes cognitifs spécifiques des différents spécialistes qui collaborent dans un processus de conception spatiale, notamment des architectes et des ingénieurs.

**Partie II**

**EXPERIMENTATION:  
LE TRAITEMENT PERCEPTIF DES FORMES  
COMPLEXES**



## Partie II INTRODUCTION

La deuxième partie de cette thèse présente les détails des études expérimentales qui ont été menées et les résultats obtenus. Le corpus expérimental nécessaire pour établir une étude scientifique de l'élaboration perceptive et du traitement cognitif des qualités formelles complexes (courbure et haute irrégularité) est basé sur une méthodologie et des outils issus du domaine des sciences cognitives et en particulier de la *psychologie expérimentale*. Ces outils permettent d'obtenir des *données quantitatives* sur les mécanismes cognitifs : ils permettent d'identifier des *invariants* quantifiables capables de représenter univoquement les réponses perceptives ou cognitives des sujets. En particulier, ce qui nous intéresse ce sont les invariants et les lois qui peuvent mettre en relation les propriétés *géométriques* des objets physiques avec les représentations mentales correspondantes.

Notre première étude concerne la *courbure* : nous nous sommes questionnés sur les lois qui organisent la représentation mentale de la qualité morphologique de « courbure ». Nous avons choisi la situation la plus simple : la courbure bidimensionnelle, qui est celle d'un segment appartenant un plan (par exemple le plan image sur l'écran d'un ordinateur). Des études précédentes ont déjà montré que la distinction instantanée entre un segment courbe et un segment rectiligne est une capacité hautement développée de notre système perceptif ; on connaît les lois scientifiques qui la soutendent. Par contre, dans le cas d'objets plus complexes et dans les situations de traitement perceptif plus élaboré, les lois qui gouvernent ces représentations mentales sont encore largement inconnues. Afin de clarifier les lois qui ordonnent *l'élaboration perceptive de la qualité morphologique de courbure*, nous avons conduit une étude de psychophysique sensorielle, discipline qui permet d'établir des liens quantifiables entre les qualités du monde physique et celles du monde mental ; dans notre cas particulier, des échelles psychophysiques ont été utilisées pour quantifier la perception de courbure suscitée par la vue d'arcs elliptiques. Les niveaux subjectifs de courbure, ainsi quantifiés, sont mis en relation avec certaines propriétés dimensionnelles des arcs. L'objectif de cette expérience est d'isoler des *indicateurs géométriques* capables de représenter la variation du *niveau subjectif de perception de la courbure* (sensation de courbure).

Notre deuxième étude concerne la *résolution de problèmes dans le domaine spatial* en relation avec les outils de représentation employés. Ce qui nous intéresse, dans ce cas, c'est le traitement perceptif et cognitif des informations spatiales complexes qui peuvent être obtenues à travers les différentes modalités de représentation d'un objet. Dans cette étude nous avons proposé aux sujets un travail de dessin de mémoire sur un *objet abstrait à forme complexe* (un petit système de tensegrité, qui quoiqu'élémentaire a tous les caractères d'un objet complexe), qu'ils ont précédemment exploré selon trois *modalités de représentation* différentes: une *image bidimensionnelle*, une *maquette réelle* et un *modèle virtuel*. Les performances des sujets (nombre d'erreurs de positionnement des éléments, et durée de réponse) sont mises en relation avec la modalité de représentation, afin de mettre en évidence des correspondances significatives entre l'efficacité dans la réponse et les informations spatiales disponibles dans chaque modalité de représentation spécifique.

Ces deux expériences sont construites comme le sont des *études de population*, afin de comparer les performances entre une population d'experts (en géométrie ou dans l'utilisation des outils numériques) et une population de non experts. Nous voulons ainsi mettre en évidence, si elles existent, des différences dans les performances qui puissent être associées à l'expertise spécifique dans ces domaines.

II. 1

MODELES GEOMETRIQUES POUR LA  
PERCEPTION DES FORMES COMPLEXES:  
LE CAS DE LA COURBURE 2D



## II.1/ 1 PRELIMINAIRES

### 1a. La courbure

Dans sa signification intuitive la *courbure* peut être définie comme la qualité d'un segment (et donc, par extension, d'une forme) de *changer de direction sans former des angles* [Fig. 1c], en opposition à la qualité de linéarité d'un segment droit, qui ne change pas de direction [Fig.1a], ou des singularités d'un segment brisé, qui change de direction de façon discontinue (ou, qui est formé par plusieurs lignes droites de directions différentes) et qui donc forme des angles [Fig. 1b].

D'un point de vue analytique, il n'existe pas une seule définition pour la courbure, mais on retrouve plusieurs définitions différentes en relation avec les objectifs pour lesquels la définition est élaborée (courbure d'une ligne ou d'une surface, par exemple) et avec le langage géométrique utilisé (géométrie différentielle, géométrie euclidienne, etc.). On approfondira cet aspect dans la discussion générale, par rapport aux résultats de notre expérience ; pour l'instant nous allons considérer la définition de courbure en tant que différence par rapport à la « droite » comme la plus significative pour les objectifs de notre étude, car d'un point du vue cognitif la courbure comme caractéristique visuelle purement formelle est principalement élaborée en tant que « incurvation » (« *curvedness* » en anglais), dans le sens de qualité opposée à la linéarité.

### 1b. Le traitement de l'information de courbure par le système perceptif humain

Des récentes études sur les relations entre la perception des formes 2d et les propriétés connues d'objets 3d dans le monde réel ont suggéré que la perception des qualités formelles 2d est déterminée par des relations statistiques entre les caractéristiques géométriques des images et leurs sources physiques dans l'environnement visuel « naturel » [HOW05]. Dans ce contexte, la signification et le rôle de la courbure bidimensionnelle ont été objet de plusieurs études [ATT54] [OGI67] [WIL89] [MOR05], qui ont mis en évidence l'importance de la courbure 2d dans la perception des formes, dans l'identification des objets et dans la transmission de la sensation de souplesse d'un objet [CAV89]. La courbure est en fait une caractéristique visuelle typique des objets naturels, comme les plantes [Fig.2a] ou les animaux, ainsi que des objets souples, qui peuvent changer de configuration [Fig.2b], alors que les formes linéaires sont plutôt associées à ce qui est rigide et fixe. Les indices perceptifs générés par la courbure semblent être des indices qui peuvent être qualifiés « d'écologiquement significatifs », *écologiquement* signifiant qu'ils sont nécessaires pour la compréhension immédiate de l'environnement qui nous entoure et donc pour l'action directe sur celui-ci en tant « qu'animaux » (animal est un être qui perçoit et agit) [GIB66]; les indices *écologiques* sont donc liés aux opérations cognitives les plus élémentaires, comme reconnaître des objets familiers ou se déplacer dans l'espace. Dans ce contexte, il a été démontré, par exemple, que la courbure a un rôle important dans la perception des expressions faciales [LYO00], qui est une opération fondamentale dans l'interaction de l'homme avec son environnement.

La courbure 2d joue aussi un rôle important dans les procédés qui permettent au système perceptif humain de générer des représentations 3d d'objets complexes et scènes, sur la base de simples images de contour 2d [Fig. 3]. Ces représentations (le 3d dans les images 2d) peuvent être générées par certains éléments formels comme les tendances locales des formes 2d vers la symétrie ou d'autres régularités structurelles, à travers la combinaison d'indices figuratifs locaux [BIE87] [KOE03]. Dans ces mécanismes d'interprétation 3d des images 2d, il ne faut pas oublier le rôle fondamental de l'expérience visuelle passée et de la connaissance archivée dans notre



Fig.1a Ligne droite

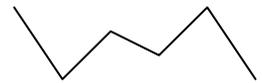


Fig.1b Ligne brisée



Fig.1c Ligne courbe



Fig. 2a La courbure est une caractéristique formelle typique des objets naturels.  
*Fleur d'hibiscus*



Fig. 2b La courbure est un indice important dans la transmission de la sensation de souplesse d'un objet visuel.  
*Méduse*

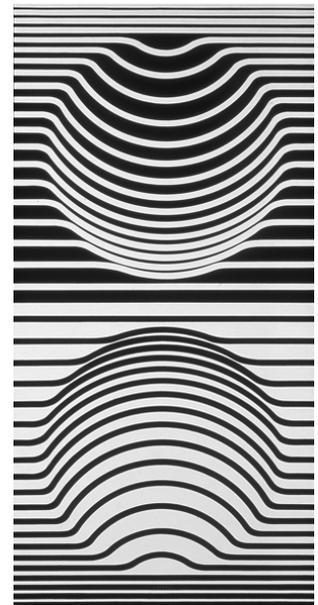
mémoire sur les propriétés des objets, comme peuvent l'être les associations apprises entre certaines projections 2d et leurs structures tridimensionnelles correspondantes [BIE87] [SHI96] [HOW05]. L'importance fondamentale de la perspective dans la structuration de la perception visuelle de l'homme moderne occidental [PAN61] est un exemple significatif de la puissance de ce genre d'associations apprises.

Certaines des propriétés organisationnelles qu'on rencontre dans nos modèles présentent une relation évidente avec les propriétés organisationnelles d'objets courbes existant dans l'environnement visuel qui nous entoure. Des propriétés de ce genre ont probablement dominé l'expérience visuelle de l'espace tridimensionnel depuis le début de l'aventure constructive humaine [Fig. 4a et b], ce qui pourrait expliquer quelques uns des processus perceptifs qui génèrent les représentations spatiales tridimensionnelles sur la base de simples indices ou régularités géométriques bidimensionnelles.

On suppose que l'évolution peut avoir produit des mécanismes cérébraux spécialisés dans le développement efficace de la géométrie de l'espace perceptif visuel [FOL04] [HEE96], mais on n'a pas encore identifié les processus cérébraux à travers lesquels la géométrie des courbes 2d est transformée en une représentation formelle 3d, ni les indices géométriques déterminant pour la perception des qualités formelles essentielles d'une courbe 2d. L'élaboration visuelle précoce des lignes courbes a fait l'objet de plusieurs investigations dans des études psychophysiques qui utilisent des procédures de choix forcé entre deux alternatives (en anglais « two-alternative forced-choice » ou 2AFC) pour mesurer les seuils de discrimination visuelle. Dans ces expériences les observateurs devaient comparer des segments courbes présentés rapidement et prendre des décisions immédiates en regardant des différences locales dans la courbure ou dans l'orientation des courbes.

### 1c. Elaboration visuelle locale de la courbure bidimensionnelle

La capacité des observateurs humains à détecter la caractéristique de courbure (en opposition à celle de « rectilinéarité ») dans des stimuli bidimensionnels (des lignes de contour) est remarquablement développée et appartient au domaine de l'« hyper acuité visuelle » : la précision spatiale avec laquelle l'être humain est capable de différencier une courbe d'une ligne parfaitement droite représente un cinquième de la distance physique entre deux récepteurs visuels (cônes) voisins et un dixième du plus petit centre du champ réceptif des cellules ganglions trouvé dans la rétine des primates [WAT82] [WAT87]. Cette découverte suggère que la courbure a un rôle déterminant dans la structuration perceptive animale et humaine. La précision qui nous permet de différencier une courbe d'une ligne parfaitement droite semble être basée sur certains indices géométriques qui ont été identifiés dans des expériences psychophysiques précédentes en utilisant des méthodes du jugement perceptif relatif (jugement des différences entre stimuli) [FOS93] [WHI98]. Deux indices en particulier ont été identifiés comme significatifs pour mesurer efficacement la sensation de courbure dans un stimulus bidimensionnel (une ligne de contour). Le premier indice est la flèche (dans d'autres expériences dénommée aussi « flèche ») [FOS93], qui est la distance entre la corde (ligne qui joint les deux extrémités de la courbe) et la ligne parallèle tangente à la courbe [Fig.5]. Le deuxième indice est le rapport entre la flèche et la corde d'un arc de courbe, dénommé « rapport d'aspect » (en anglais « rapport d'aspect ») dans d'autres expériences [WHI98]; l'effet de ce deuxième indice sur les performances visuelles est indépendant de l'échelle du stimulus, puisque des images de courbes avec le même rapport d'aspect mais des dimensions différentes donnent les mêmes seuils de détection. L'indépendance de l'échelle dans l'élaboration visuelle représente un certain avantage fonctionnel ou écologique [WHI98] et, entre les différents indices



**Fig.3** La courbure est un indice très puissant pour la transmission de la sensation de tridimensionnalité dans les images 2d.  
V. Vasarely, *Sir-Ris* (1957)

**Fig.4** Les formes courbes ont dominé l'expérience visuelle de l'espace tridimensionnel depuis le début de l'aventure constructive humaine.



**Fig. 4a** Bains de Qusayr 'Amra, Jordanie (VIIIe siècle)



**Fig.4b** Structure semi-nomade, région de Tombouctou, Mali

géométriques disponibles dans une image, le système visuel devrait préférer les indices donnant ce genre d'avantage.



**Fig.5** Dans la perception de la courbure bidimensionnelle, deux indices ont été identifiés comme significatifs par des expériences précédentes : la flèche (appelée aussi « flèche ») et le rapport entre corde et flèche (dénommé « rapport d'aspect »).

Chacun de ces deux indices identifiés (flèche et rapport d'aspect) transmet une information différente : alors que la flèche donne un indice strictement local sur la position relative dans le champ visuel du point le plus « haut » de la courbe par rapport aux autres (dans une courbe orientée sur un hypothétique axe vertical), le rapport d'aspect transmet une information plus globale sur la surface couverte par la courbe. L'utilisation efficace par le système visuel de chaque indice peut dépendre des paramètres du stimulus visuel comme la longueur ou la durée de présentation des arcs de courbe. Par exemple, il a été découvert que la détection de la courbure était optimale pour des stimuli avec une longueur d'au moins 30 minutes de l'arc visuel [WAT84] [KRA95] et que certaines caractéristiques de la performance de détection variaient avec la durée de présentation du stimulus [FER86] [WAT87]. Ces différences peuvent être synthétisées dans une augmentation de la sensibilité visuelle à la courbure pour des durées de présentation jusqu'à deux secondes et par un changement de la performance, de discrète à continue, à l'augmentation de la durée de présentation du stimulus. La détection rapide des arcs de courbe présentés très brièvement (100 millisecondes) entre séries de multiples segments, droits ou courbes, (appelées « perturbateurs ») produisait des variations de la performance visuelle en fonction de la flèche et du nombre des perturbateurs [FOS02]. La rapidité et la précision dans la détection rapide de la courbure dans les tâches en 2AFC suggère que l'élaboration visuelle locale de l'information sur la courbure peut être basée sur des détecteurs sélectifs à l'orientation [KOE88] [ZET90], dotés d'une sensibilité optimale pour une étroite fenêtre de variations des dimensions et de la durée de présentation des stimuli. Des études sur les cerveaux visuels des mammifères [DOB87] [DOB89] suggèrent que les neurones corticaux sélectifs à l'orientation [HUB59] pourraient acquiescer cette fonction.

Les résultats de l'expérimentation sur la détection visuelle de la courbure mesurée dans les essais avec 2AFC, que nous venons de décrire, peuvent donner des explications sur les mécanismes à travers lesquels le système visuel extrait des informations strictement locales sur la courbure bidimensionnelle. Comment ces mécanismes sont-ils sollicités pour générer l'interprétation bidimensionnelle globale d'une courbe en termes de sa propriété principale « courbure », ce n'est pas encore expliqué dans le cas de la détection visuelle précoce.

#### *1d. Mesure de la sensation pour détecter les lois organisationnelles à la base de la perception de la courbure bidimensionnelle de contour*

Dans la psychophysique classique, on considère que les sensations visuelles sont l'expression des mécanismes cérébraux impliqués dans l'élaboration des informations spatiales ou temporelles transmises par les stimuli. Thurston [THU27] et après Stevens [STE56] [STE75] ont introduit les échelles psychophysiques, ou échelles de sensation, comme mesure pour les variations dans la réponse du système perceptif aux variations de certaines propriétés comme l'intensité sonore, la luminosité ou la chaleur

pour certaines classes de stimuli comme les sons, la lumière, la température. Les fonctions psychométriques qui décrivent les réponses en échelle du système perceptif à des dimensions critiques d'une stimulation donnée sont définies comme *lois psychophysiques*, ou lois de sensation.

Dans notre étude, nous avons utilisé une échelle psychophysique pour mesurer les variations dans la réponse du système perceptif visuel aux variations dans les indices sur la courbure bidimensionnelle de contour fournis par des segments courbes. Alors que les approches de la discrimination visuelle rapide des courbes basées sur les seuils ont démontré qu'il est possible pour le système visuel de déterminer des différences à peine remarquables entre deux courbes présentées rapidement, notre approche psychophysique se propose de mesurer la sensation de courbure sollicitée par un certain stimulus courbe donné, ce qui présuppose un niveau d'élaboration formelle plus élevé que dans les approches basées sur les seuils.

D'un point de vue analytique, les lignes courbes utilisées comme stimuli ont été générées en partant de l'équation générique d'une ellipse dans un plan cartésien pour la création de quatre modèles géométriques de variation de la courbure, qui seront décrits en détail dans la suite. On a déjà expliqué précédemment que la courbure bidimensionnelle de contour est un indice puissant pour l'identification des formes [ATT54] [MOR05]. On a parlé aussi du fait que l'organisation perceptive des formes 2d est largement déterminée par des relations entre les caractéristiques géométriques des stimuli visuels 2d et leurs possibles sources physiques dans l'environnement tridimensionnel. Un exemple significatif d'une habileté perceptive développée par le cerveau visuel [PES88] en partant de la relation entre des stimuli visuels 2d et des objets existants dans l'environnement physique 3d est la capacité d'utiliser des parties pour la génération des représentations de l'entier [BIE87] et sur des segments pour l'achèvement perceptif des contours. Dans le monde physique, en fait, ils n'existent pas des objets qui s'interrompent brusquement sans une raison, ce qui fait que notre cerveau, quand il observe un forme visuelle « interrompue », il aura la tendance à la percevoir comme un entier, donc à l'« achever » perceptivement. On peut donc affirmer que des relations de ce genre, entre des qualités formelles 2d et des situations présentes dans l'environnement physique, peuvent avoir une influence déterminante sur la structure organisationnelle des représentations internes de la courbure. En partant de ce constat, nous pouvons supposer que le potentiel d'activation des représentations internes de courbure devrait être optimal avec des stimuli 2d qui peuvent être mis en relation avec des sources physiques. La structure organisationnelle de ces représentations internes peut être traduite en éléments quantitatifs par les échelles de sensation.

1e. Géométrie de la courbure 2d : modèles de génération pour des arcs elliptiques

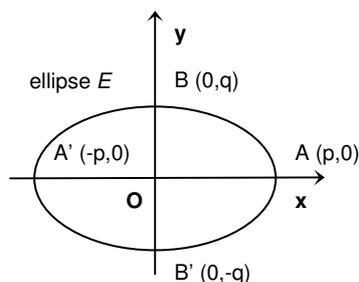
Les contours courbes des objets physiques « naturels » présentent une très ample série de formes arrondies ou oblongues qui peuvent être approximées par deux familles élémentaires de formes courbes bidimensionnelles: les cercles et les ellipses. En termes de géométrie, les courbes ou les arcs dérivés des cercles et des ellipses partagent certaines propriétés : le cercle peut être en fait considéré comme un cas particulier d'ellipse. Nous avons choisi les ellipses (dont les cercles font partie comme cas particulier) comme le modèle géométrique principal qui pourrait être utilisé par le système perceptif humain pour modéliser la variation de la courbure bidimensionnelle perçue, en raison du lien direct qu'elles permettent entre des caractéristiques analytiques (les axes principaux, qu'on définira dans la suite) et les indices sensoriels flèche et rapport d'aspect. A partir d'un ensemble de familles d'ellipses, on peut obtenir, pour représenter la variation de courbure bidimensionnelle, quatre modèles géométriques caractérisés par des propriétés mathématiques comparables. Chacun de ces modèles peut être dérivé de l'équation générale de l'ellipse, qui permet d'obtenir, au niveau formel, des familles d'ellipses dont les foyers sont identiques; en partant de celles-ci, la génération d'une ample série de courbes est possible, avec des variations dans la rapport d'aspect, dans la flèche ou dans les deux.

Equation générale de l'ellipse [Fig. 6]

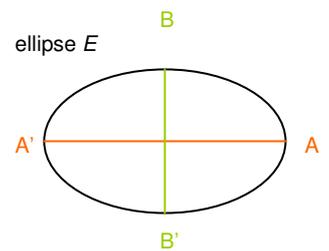
On peut définir analytiquement une ellipse  $E$  dans un plan cartésien  $x,y$  à travers l'équation:

$$\frac{x^2}{p^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1 \quad (e)$$

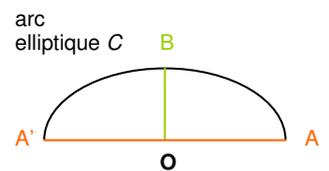
Cette courbe coupe l'axe  $x$  dans les points  $A(p, 0)$  et  $A'(-p, 0)$  et l'axe  $y$  dans les points  $B(0, q)$  et  $B'(0, -q)$  [Fig.6]. Les deux segments  $A'A$  et  $B'B$  s'appellent axes de l'ellipse ; le segment de dimension majeure s'appelle *axe majeur* et l'autre *axe mineur* [Fig.7a]. Si on ne considère que la moitié d'une ellipse  $E$ , c'est à dire un arc elliptique  $C$ , une relation directe entre les axes et les indices perceptifs *flèche* et *rapport d'aspect* est possible : le segment horizontal  $A'A$  (qui correspond à l'axe majeur de l'ellipse  $E$ ) est équivalent à la corde de l'arc elliptique  $C$  et le segment vertical  $BO$  (qui correspond à la moitié de l'axe vertical  $B'B$  de l'ellipse  $E$ ) est équivalent à la flèche de ce même arc  $C$  [Fig.7b] ; le rapport d'aspect résulte, évidemment, du rapport entre les segments  $BO$  (corde) et  $A'A$  (flèche).



**Fig. 6** L'ellipse  $E$ , définie par l'équation (e), coupe l'axe  $x$  dans les points  $A(p, 0)$  et  $A'(-p, 0)$  et l'axe  $y$  dans les points  $B(0, q)$  et  $B'(0, -q)$ .



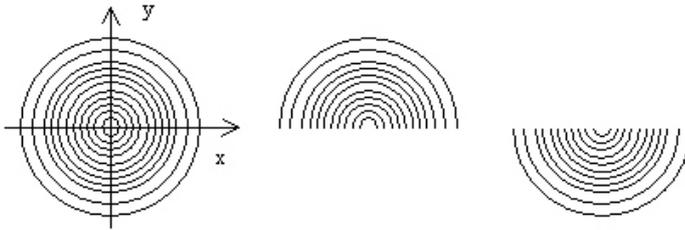
**Fig. 7a** Le segment  $A'A$  est l'axe majeur de l'ellipse  $E$  ; le segment  $B'B$  est l'axe mineur.



**Fig. 7b** Le segment horizontal  $A'A$  (correspondant à l'axe horizontal de l'ellipse  $E$ ) représente la corde de l'arc elliptique  $C$  (moitié de l'ellipse  $E$ ) ; le segment vertical  $BO$  (correspondant à la moitié de l'axe vertical  $B'B$  de l'ellipse  $E$ ) représente la flèche de l'arc elliptique  $C$ .

*Arcs de cercle concentriques [Fig.8]  
-modèle géométrique 1-*

Le cercle est un cas particulier d'ellipse, où les axes A'A et B'B ont une dimension équivalente et deviennent le diamètre du cercle. En modifiant la dimension du diamètre, on obtient des familles de cercles concentriques [Fig.8]. Si on ne prend que les moitiés (supérieures ou inférieures, par rapport à une ligne de coupe horizontale) de plusieurs cercles concentriques on obtient des arcs avec flèche variable et rapport d'aspect constant. La juxtaposition d'une série de courbes de ce type, c'est-à-dire une série de cercles concentriques, présente un pouvoir de suggestion tridimensionnelle très faible par rapport à d'autres modèles, comme on le verra par la suite.



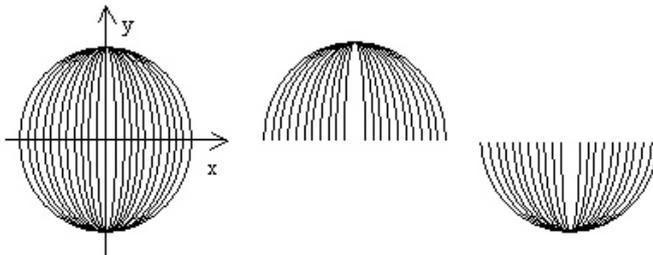
**Fig. 8** Arcs de cercle concentriques (modèle 1)

*Arcs d'ellipse verticaux [Fig.9]  
-modèle géométrique 2-*

On a vu que un' ellipse *E* peut être décrite par l'équation suivante:

$$\frac{x^2}{p^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1 \quad (e)$$

Les deux axes de cette ellipse sont représentés par les segments A'A et B'B, définis par les points A (p, 0), A' (-p, 0) et B (0, q), B' (0, -q). En modifiant la valeur des coordonnées p et q on peut définir deux familles d'ellipses, caractérisées au niveau formel par la direction verticale ou horizontale de leur axe majeur. Le premier modèle qu'on considère est constitué par les ellipses à dominante verticale: dans ce cas, l'axe majeur est l'axe vertical B'B et l'axe mineur est l'axe horizontal A'A. Les demi-ellipses sélectionnées sont des courbes avec flèche (demi axe majeur vertical OB) constante et corde (axe mineur horizontal A'A) variable et, par conséquent, rapport flèche/corde (rapport d'aspect) variable [Fig. 9]. La combinaison des courbes de ce modèle peut suggérer des propriétés tridimensionnelles d'objets qui existent dans le monde physique [Fig. 10].



**Fig. 9** Arcs d'ellipses avec axe majeur vertical (modèle 2)

**Fig. 10** Des objets existants dans le monde physique qui, au niveau visuel, peuvent rappeler la combinaison des arcs elliptiques du modèle géométrique 2.



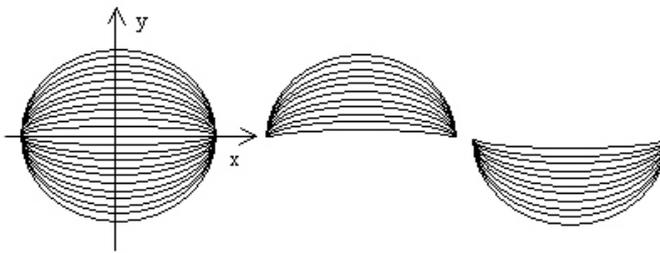
**Fig. 10a** Renzo Piano Building Workshop, Peek and Cloppenburg, Colonia (2007)



**Fig. 10b** Al-Amiriyah Madrasa, Rada, Yemen (XVIe siècle)

*Arcs d'ellipses horizontales [Fig. 11]  
-modèle géométrique 3-*

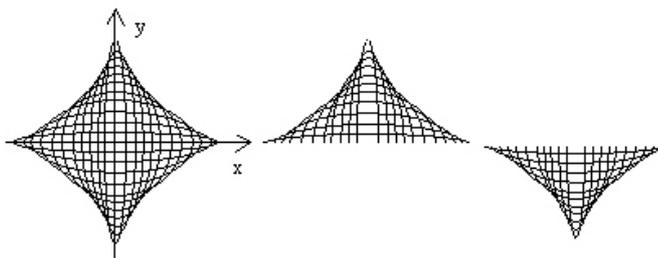
Le deuxième groupe d'ellipses qu'on peut générer est constitué des ellipses à dominante horizontale : dans ce cas, l'axe majeur est l'axe horizontal A'A et l'axe mineur est l'axe vertical B'B. Les demi-ellipses sélectionnées sont des courbes avec *flèche* (demi axe verticale OB) variable, *corde* (axe horizontale A'A) constante et, par conséquent, rapport flèche/corde (rapport d'aspect) variable [Fig. 11]. Comme pour l'ensemble des arcs du modèle 2, la combinaison des courbes du modèle 3 peut suggérer des qualités formelles propres des structures spatiales tridimensionnelles existant dans le monde physique [Fig. 12].



**Fig. 11** Arcs d'ellipses avec axe majeur horizontal (modèle 3)

*Combinaison d'arcs d'ellipses verticaux et horizontaux [Fig. 13]  
-modèle géométrique 4-*

La combinaison des demi-ellipses verticales et horizontales décrites par les modèles 2 et 3, à travers la modification de la valeur réciproque des axes majeur et mineur jusqu'à les inverser, permet la génération d'un ensemble de courbes avec aussi bien la flèche (demi axe OB) que la corde (axe A'A) variables et, donc, un rapport flèche/corde (rapport d'aspect) variable aussi [Fig. 13]. La combinaison de ces courbes suggère une structure spatiale qui peut ressembler à un réseau d'éléments courbes unis par des nœuds [Fig. 14]; ce genre de structure est très souvent utilisé dans l'architecture pour la réalisation de structures spatiales comme les « grid shells » ou les membranes tendue, ou encore dans le cas des architectures Non-Standard.



**Fig. 13** Arcs d'ellipses avec axe majeur à la fois horizontal et vertical (modèle 4)

Comme on peut voir en regardant les figures 8-14, à partir de l'équation générale de l'ellipse on a généré quatre modèles géométriques pour modéliser la variation de la courbure de contour bidimensionnelle. Chacun de ces modèles, constitués par une combinaison spécifique d'arcs de cercle ou d'ellipse, produit une structure spatiale bidimensionnelle différente, capable de suggérer l'apparence de structures spatiales tridimensionnelles existantes; ce sont surtout les modèles dérivés des ellipses qui présentent cette puissance de suggestion formelle.



**Fig. 12b** Bains de Qusayr 'Amra, Jordanie (VIIIe siècle)

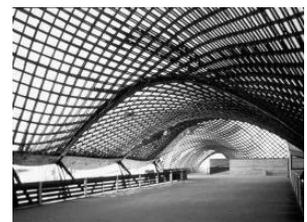


**Fig. 12a** J. Schlaich, Maison des hippopotames, Zoo de Berlin (1996)

**Fig. 12** Des objets existants dans le monde physique qui, au niveau visuel, peuvent rappeler la combinaison des arcs elliptiques du modèle géométrique 3.



**Fig. 14a** G. Minke et J. Natterer, "Ribbed timber shell", Munich (1968)



**Fig. 14b** F. Otto, Multihalle, Mannheim (1975)

**Fig. 14** Des objets existants dans le monde physique qui, au niveau visuel, peuvent rappeler la combinaison des arcs elliptiques du modèle géométrique 4.

## II.1/2 EXPERIENCE

Lequel des quatre modèles considérés mieux représente les mécanismes à la base de la perception de la courbure de contour 2d? Le modèle 1 est basé sur une combinaison de cercles concentriques qui ne semble pas suggérer une structure avec des propriétés tridimensionnelles, par contre les modèles 2, 3 et 4 sont dérivés d'ellipses qui, combinés, suggèrent des organisations spatiales avec des propriétés 3d, comme peuvent l'être des coupoles ou des tentes. Si on considère que la perception des propriétés formelles 2d dépend de certaines relations statistiques entre les propriétés structurelles d'une représentation 2d (image) et les propriétés d'un objet "naturel" existant dans le monde 3d, on peut supposer que les modèles géométriques qui suggèrent des propriétés d'objets "naturels" devraient générer des sensations perceptives formelles plus fortes. Si cette relation est vraie, on devrait donc s'attendre que les contours courbes qui dérivent des ellipses génèrent une sensation de courbure plus forte que les contours dérivés des cercles concentriques. En outre, on a vu que l'apprentissage perceptif peut être très important pour la perception formelle des images 2d [SH96]: les quatre modèles structurels que nous avons testés dans notre expérience peuvent donc produire des sensations formelles différentes dans le jugements des non experts et des experts (architectes ou ingénieurs, dans notre cas). Si les experts utilisent, pour la construction de leurs représentations formelles, les indices géométriques contenus dans les stimuli de façon différente (peut être plus efficace) que le non experts, alors on doit s'attendre des différences significatives dans les résultats des deux groupes.

### 2a. Sujets

Seize observateurs, non entraînés dans la psychophysique, avec une vision normale, ou corrigée à la normale (avec des lunettes), ont participé à l'expérience. Huit (quatre de sexe masculin et quatre de sexe féminin) étaient étudiants ou professionnels du milieu biologique ou psychologique, donc considérés non-experts dans les domaines de la géométrie et des structures spatiales. Les autres huit (trois de sexe féminin et cinq de sexe masculin) étaient étudiants ou professionnels du milieu de l'architecture ou de l'ingénierie civil, tous familiers avec la géométrie et utilisateurs experts des outils informatiques de dessin, comme Autocad ou Catia. Ces observateurs sont donc considérés experts dans les domaines de la géométrie et des structures spatiales.

### 2b. Stimuli

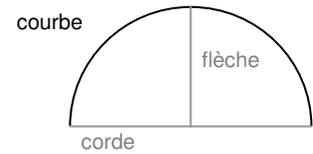
Les stimuli pour les expériences ont été générés par un logiciel de dessin (Autocad) sur un ordinateur IBM (Pentium III) doté d'un écran couleur standard avec une résolution de 1024 x 768 pixels. Tous les arcs (les stimuli) ont été choisis, comme on a expliqué en détail dans la partie précédente, à partir de séries d'ellipses dont les axes majeur et mineur varient entre 1.2 et 10 degrés de l'angle visuel<sup>1</sup>. Les moitiés supérieures et inférieures des ellipses dérivées ont produit 88 courbes avec convexité vers le haut ou convexité vers le bas dans le plan bidimensionnel. 22 de ces arcs présentaient une forme circulaire et 66 une forme elliptique. Pendant chaque session expérimentale les arcs ont été présentés en ordre aléatoire sur l'écran de l'ordinateur, individuellement à chaque observateur placé à une distance d'environ un mètre de l'écran. Les deux paramètres géométriques

---

<sup>1</sup> L'angle visuel est l'angle qui sous-tend un objet à partir de l'œil. Mathématiquement il est défini par la relation suivante :  $AV=2\arctang(S/2D)$ , avec S=taille linéaire de l'objet et D=distance entre l'objet et l'œil.

individuels de chaque arc qui ont été testés sont la *flèche* et le *rappor*t *d'aspect*, qu'on déjà définit comme le rapport entre flèche et corde.

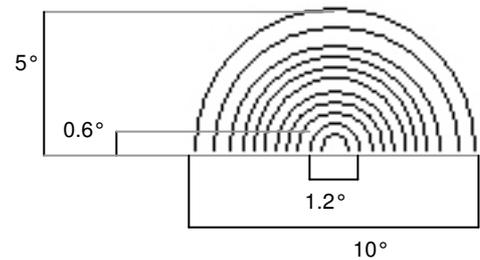
$$\frac{\text{flèche}}{\text{corde}} = \text{rappor}t \text{ d'aspect}$$



Les arcs dérivés des cercles concentrique (*modèle 1*) ont tous rapport d'aspect constant (0.5), flèche variable entre 0.6 et 5 degrés de l'angle visuel et corde variable entre 1.2 et 10 degrés.

Fig. 15 Modèle 1

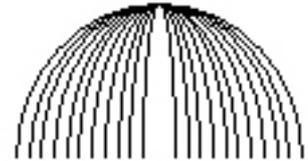
<i>flèche</i>	<i>corde</i>	<i>rappor</i> t <i>d'aspect</i>
$0.6^\circ < s < 5^\circ$	$1.2^\circ < c < 10^\circ$	$ar = \text{const} = 0.5$



Les arcs dérivés des ellipses à axe majeur vertical (*modèle 2*) ont tous flèche constante (5° de l'angle visuel), rapport d'aspect variable entre 0.5 et 4.2 et corde variable entre 1.2° et 9° de l'angle visuel.

Fig. 16 Modèle 2

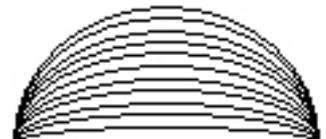
<i>flèche</i>	<i>corde</i>	<i>rappor</i> t <i>d'aspect</i>
$s = \text{const} = 5^\circ$	$1.2^\circ < c < 9^\circ$	$0.5 < ar < 4.2$



Les arcs dérivés des ellipses à axe majeur horizontal (*modèle 3*) ont tous corde constante (10° de l'angle visuel), flèche variable entre 0.6° et 4.5° de l'angle visuel et rapport d'aspect variable entre 0.06 et 0.5.

Fig. 17 Modèle 3

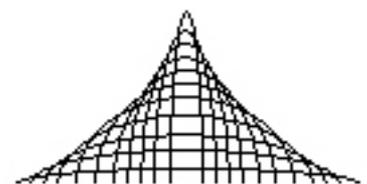
<i>flèche</i>	<i>corde</i>	<i>rappor</i> t <i>d'aspect</i>
$0.6^\circ < s < 4.5^\circ$	$c = \text{const} = 10^\circ$	$0.06 < ar < 0.5$



Les arcs dérivés de la combinaison d'ellipses à dominante horizontale et verticale (*modèle 4*) ont flèche variable entre 0.6° et 5° de l'angle visuel, corde entre 1.2° et 10° de l'angle visuel et rapport d'aspect entre 0.06 et 4.2.

Fig. 18 Modèle 4

<i>flèche</i>	<i>corde</i>	<i>rappor</i> t <i>d'aspect</i>
$0.06^\circ < s < 5^\circ$	$1.2^\circ < c < 10^\circ$	$0.06 < ar < 4.2$



Tous les arcs étaient définis par un contour d'une épaisseur d'un seul pixel. Leur luminance (constante à  $40 \text{ cd/m}^2$ ) a été déterminée à travers un photomètre (Minolta LS 110) utilisé pour le calibrage des niveaux de gris (combinaisons RGB) d'un carré d'un degré de l'angle visuel, allumé dans le centre de l'écran noir. La luminance du fond noir de l'écran sur lequel les arcs ont été présentés a été gardé constante à  $2 \text{ cd/ m}^2$ .

#### *2d. Procédure*

Pendant les séances expérimentales, on a fait asseoir chaque observateur confortablement dans une pièce pas trop éclairée et on lui a expliqué qu'il allait voir une série d'arcs, un à un, et qu'il lui serait demandé de proposer un numéro entre 0 et 10, pour rendre compte du niveau de courbure perçue spontanément quand chaque arc apparaîtrait sur l'écran. Au début de la séance, une ligne droite a été présentée pour avoir la certitude que chaque observateur aurait proposé 0 pour cette courbure, en démontrant ainsi d'avoir une bonne compréhension du principe de la procédure des échelles psychophysiques, même si aucun des observateurs ne connaissait exactement ce qu'est une échelle psychophysique. Par contre, on n'a pas présenté une courbe liée à la limite supérieure de l'échelle psychophysique (10, dans notre cas) pour éviter d'influencer les échelles internes des observateurs. Les 88 lignes courbes plus 12 lignes droites de longueur variable ont été présentés en ordre aléatoire, avec une séquence différente pour chaque observateur et en montrant chaque courbe une seule fois par séquence. La durée de la présentation n'a pas été limitée, mais les observateurs ont été encouragés à répondre au stimulus le plus vite possible; la pression de la touche "enter" faisait passer au stimulus suivant.

## II.1/3 RESULTATS

Dans les études précédentes sur le traitement visuel rapide de la courbure, conduites avec la méthode des seuils, la statistique de population basée sur la confrontation des moyennes a été appliquée pour déterminer laquelle des variables indépendantes testées répondait le mieux à la variation des seuils de discrimination des courbes [FOS93] [FOS02]. Dans notre cas, l'analyse de régression<sup>2</sup> a été utilisée pour déterminer la cohérence de liaison entre les niveaux physiques de valeur de la *flèche* et du *rapport d'aspect* et les niveaux subjectifs de magnitude de courbure, pour chacun des quatre modèles structuraux testés. Une telle analyse permet de déterminer le pouvoir prédictif d'une variable indépendante donnée, associé à un certain modèle géométrique, en se basant sur le modèle de régression qui fournit la meilleure correspondance statistique pour les données de perception individuelles ou moyennes.

Des analyses séparées ont été conduites sur les données des experts et des non experts et toutes les données ont été analysées individuellement avant de procéder aux analyses des données moyennes. Pour chaque groupe d'observateurs, experts et non-experts, nous avons d'abord analysé le niveau moyen de courbure en fonction des variables *flèche* et *rapport d'aspect*, indépendamment du modèle géométrique selon lequel les courbes ont été générées. Ensuite, des analyses séparées ont été conduites pour chacun des quatre modèles géométriques.

### 3a. Observateurs non-experts

Dans l'exploitation des résultats des non-experts, on ne présentera que les données moyennes, en raison du fait que l'on n'a pas remarqué des différences significatives entre les individus de ce groupe.

#### *Niveau subjectif de courbure en fonction des variables flèche et rapport d'aspect*

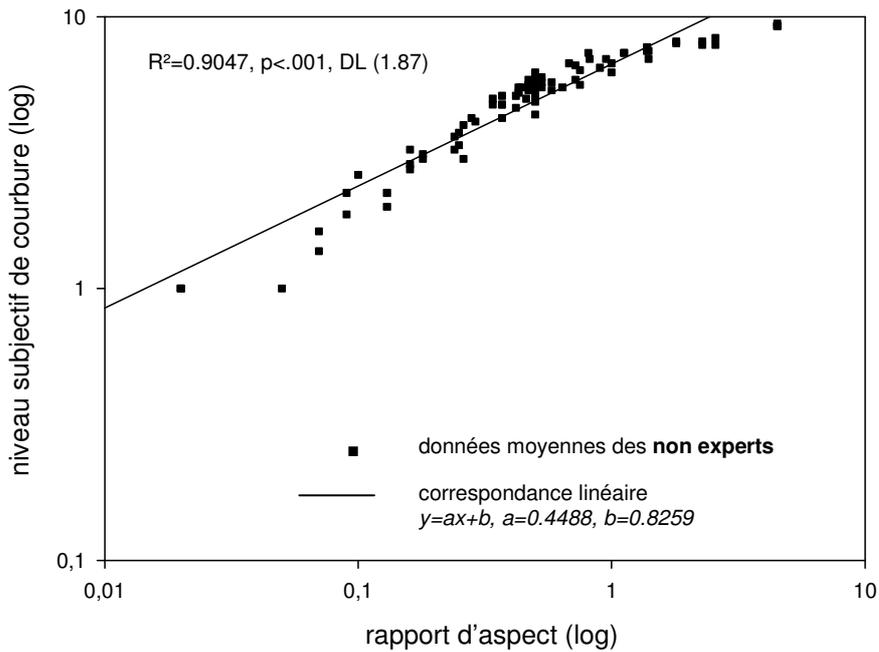
Les niveaux subjectifs de courbure ont été analysés en fonction de la *flèche* et du *rapport d'aspect* des 88 arcs présentés dans l'expérience. Nous avons conduit des analyses de régression sur les données moyennes projetés sur une échelle logarithmique: ces analyses révèlent une bonne relation linéaire entre niveau subjectif de courbure et *rapport d'aspect* (Tab. 1a) et une relation linéaire plus pauvre entre niveau subjectif de courbure et *flèche* (Tab. 1b). La fonction linéaire moyenne qui lie le niveau subjectif de courbure au *rapport d'aspect* produit un coefficient de corrélation notablement plus haut que la fonction moyenne obtenue pour la *flèche*. Les coefficients de corrélation des régressions linéaires pour les données individuelles ont montré une différence systématique entre *flèche* et *rapport d'aspect* pour les observateurs de ce groupe.

L'analyse statistique (t-test)<sup>3</sup> des coefficients de corrélation de la correspondance linéaire pour les données individuelles révèle une différence statistique significative ( $t(1.14) = 7.9254, p < 0.001$ ) entre les coefficients des fonctions de correspondance pour le *rapport d'aspect* et des fonctions de correspondance pour la *flèche*. Le tableau 1d montre les coefficients de corrélation des correspondances linéaires pour les données individuelles en fonction des initiales des noms des observateurs. La différence statistique entre les coefficients de corrélation révèle que le *rapport d'aspect* produit une meilleure correspondance linéaire aux sensations individuelles que la *flèche*.

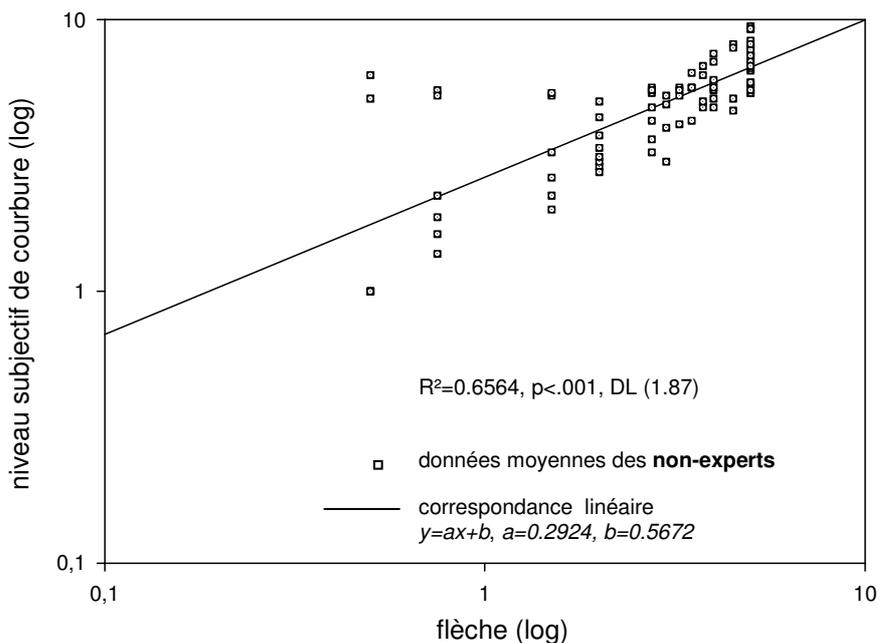
<sup>2</sup> L'analyse de régression est une analyse statistique utilisée pour déterminer la fonction qui décrit le mieux la relation entre deux variables données, ainsi que la cohérence de cette relation, à travers le coefficient de corrélation.

<sup>3</sup> Le t-test, ou test de Student, permet d'évaluer la signification statistique de la différence entre moyennes.

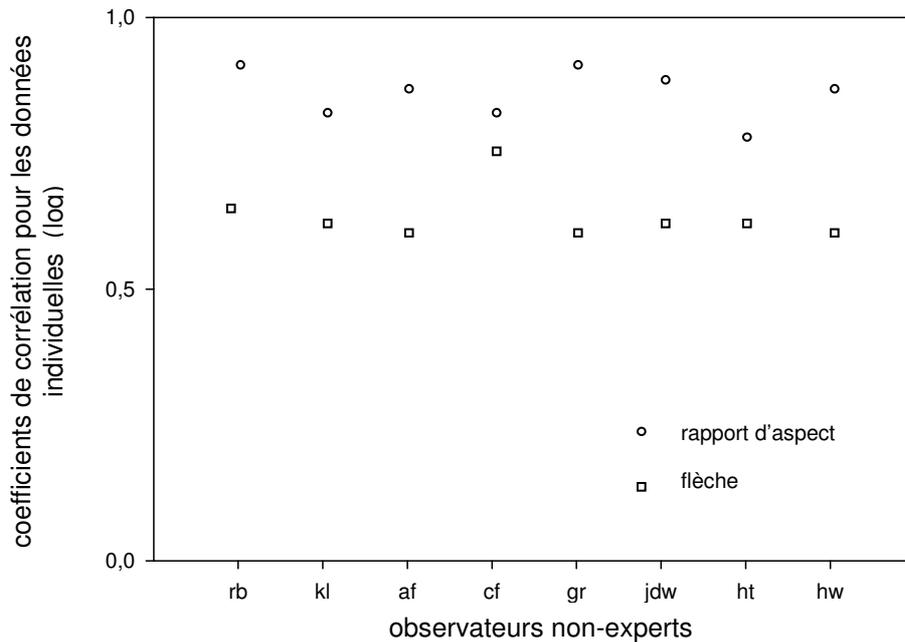
Mais, si dans les analyses on ne considère que les arcs avec les cordes le plus longues, la différence dans les effets de la flèche et du rapport d'aspect n'est plus significative : pour les stimuli avec les cordes entre 7° et 10° de l'angle visuel ([Fig.21] page 125), la flèche est un indicateur des niveaux individuels plus fiable que la rapport d'aspect (Tab. 1e et 1f). On explique ce phénomène par les particulières caractéristiques formelles assumées par les courbes qui présentent des cordes assez longues. Nous supposons qu'elles peuvent être approximées efficacement par des arcs avec courbure uniforme (des cercles), ce qui rendrait les deux indices corde et flèche équivalentes : dans ce cas, l'un seul des deux serait suffisant pour décrire la courbe dans son entier.



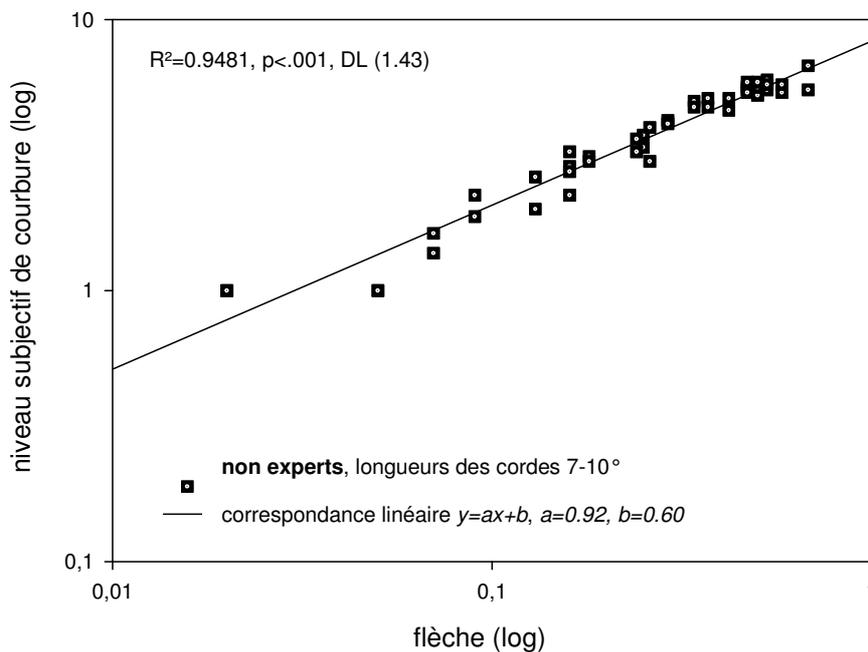
**Tab. 1a** *Non experts*: relation linéaire niveau subjectif de courbure (ordonnée) / rapport d'aspect (abscisse).



**Tab. 1b** *Non experts*: relation linéaire niveau subjectif de courbure (ordonnée) / flèche (abscisse).



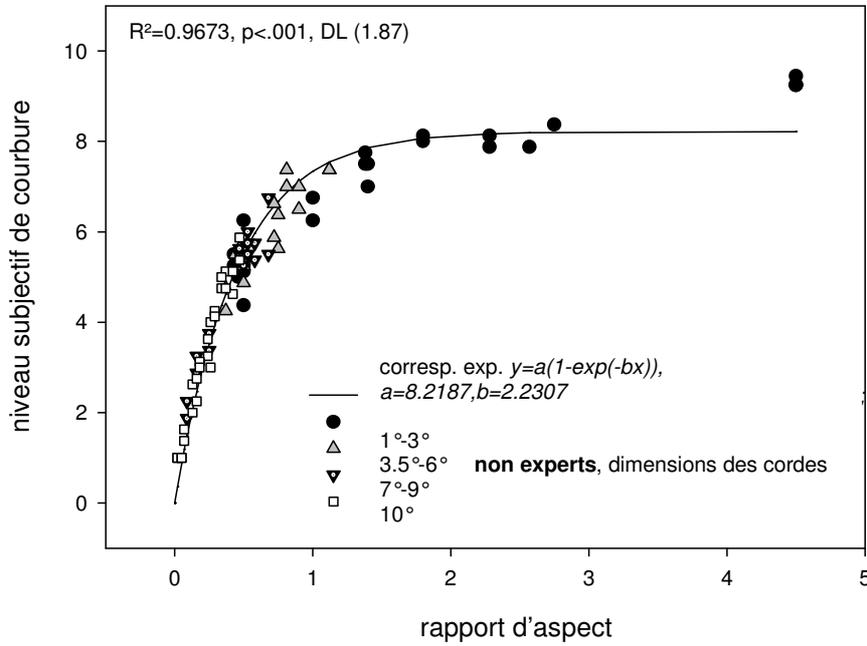
**Tab. 1c** *Non experts*: coefficients de corrélation pour les données individuelles: rapport d'aspect et flèche.



**Tab. 1d** *Non experts*: relation linéaire niveau subjectif de courbure (ordonnée) / flèche (abscisse) pour les courbes avec corde entre 7° et 10° de l'angle visuel.

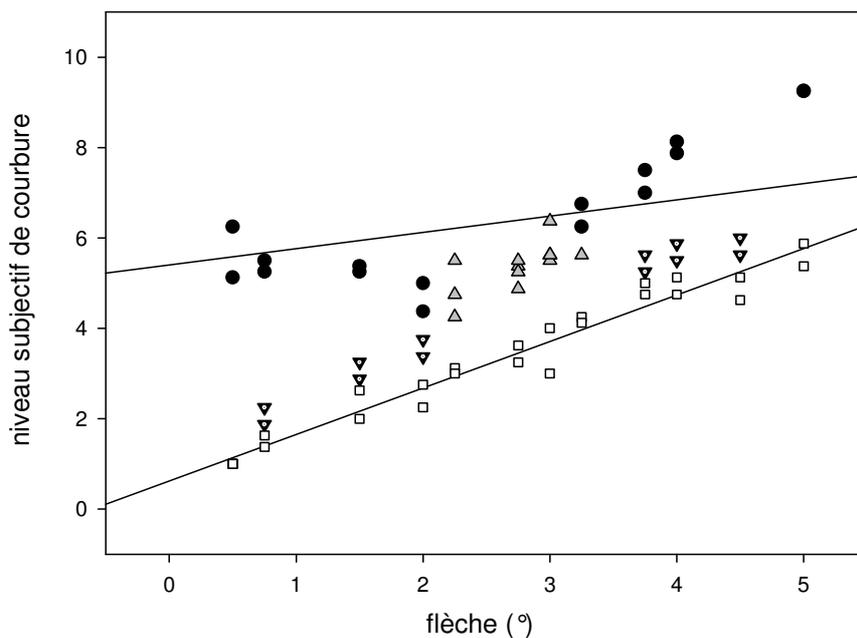
Les fonctions psychométriques ont été aussi mises en correspondance avec les données moyennes projetées sur une échelle linéaire. Ces analyses révèlent que c'est une fonction exponentielle qui fournit la meilleure correspondance pour le niveau subjectif de courbure en fonction du rapport d'aspect (Tab. 1g). Une fonction linéaire fournit une correspondance raisonnablement satisfaisante pour le niveau subjectif en fonction de la flèche, indépendamment de la dimension de la corde ( $R^2 = 0.7433$  ;  $p < 0.001$ , DF (1.87)), avec une correspondance notablement meilleure si on ne

considère que les courbes avec cordes de dimension entre 7° et 10° de l'angle visuel (Tab. 1e et 1f). Dans tous les cas, la comparaison des données globales pour la flèche et la rapport d'aspect montre que le niveau subjectif de courbure présente plus de dispersion en fonction de la flèche (Tab. 1b) qu'en fonction de la rapport d'aspect (1a).



**Tab. 1e Non experts:** une fonction exponentielle fournit la meilleure correspondance entre le niveau subjectif de courbure (ordonnée) et le rapport d'aspect (abscisse).

- 1°-3°  
corr. lin.  $y=ax + b$ , cordes 1-6°,  $a=5.39$ ,  $b=0.95$ ,  $R^2= 0.0209$ , NS
- △ 3.5°-6°
- ▼ 7°-9° **experts**, dimensions des cordes
- 10°
- corr. lin.  $y=ax + b$ , cordes 7°-10°,  $a=0.62$ ,  $b=0.95$ ,  $R^2= 0.9595$ ,  $p <.001$

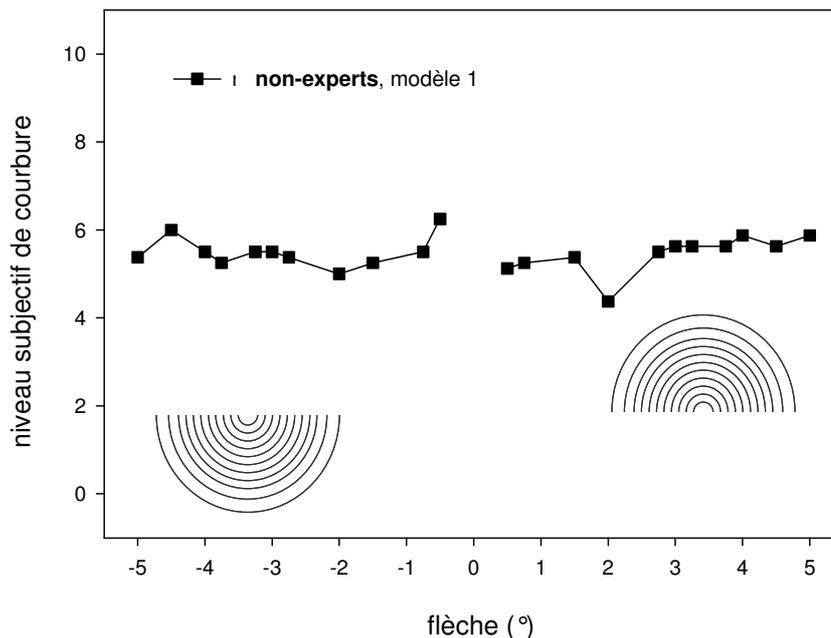


**Tab. 1f Non experts:** relation linéaire entre le niveau subjectif de courbure (ordonnée) et la flèche (abscisse) pour les différentes longueurs des cordes.

### Représentation de la courbure en fonction des quatre modèles géométriques

Les données moyennes des observateurs non-experts ont été analysées en fonction des quatre modèles géométriques selon lesquels on a généré les 88 arcs présentés comme stimuli.

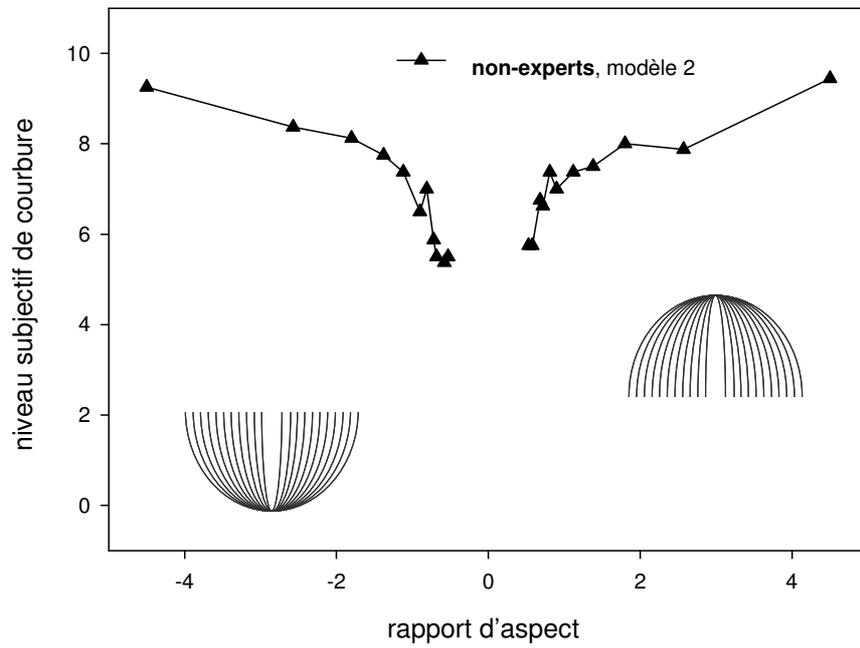
Le **modèle 1** constitué par les arcs dérivés des cercles concentriques : ces arcs ont rapport d'aspect constante et flèche variable. Les analyses du niveau subjectif de courbure en fonction de la flèche montrent que les arcs de cercles concentriques produisent un niveau constant de sensation de courbure dans la région moyenne de l'échelle psychophysique (Tab. 2a). Les arcs avec orientation différente (concavité vers le haut ou vers le bas) produisent des sensations de courbure symétriques.



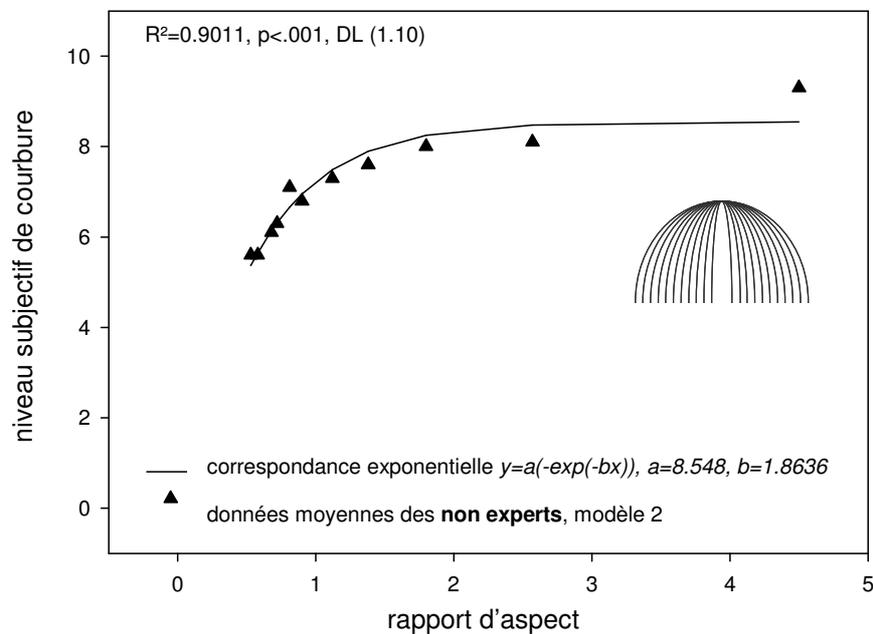
**Tab. 2a Non experts:** tous les arcs du modèle 1 produisent une sensation de courbure constante dans le milieu de l'échelle psychométrique.

Le **modèle 2** est constitué par les ellipses à dominante verticale : ces arcs ont flèche constante et rapport d'aspect variable. Pour ce modèle, le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmentation de la rapport d'aspect, symétriquement pour les arcs avec courbure « positive » ou « négative » ; cette augmentation couvre que la moitié supérieure de l'échelle psychophysique (Tab. 2b). La fonction qui mieux décrit la relation entre niveau subjectif de courbure et rapport d'aspect des arcs, indépendamment de l'orientation de la courbure (concavité vers le haut ou vers le bas), est une fonction exponentielle (Tab. 2c).

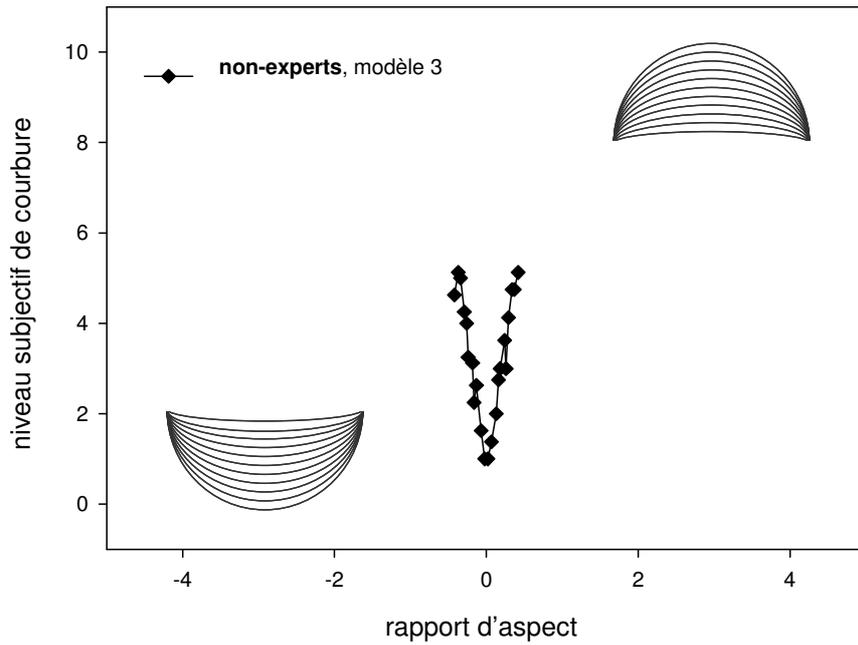
Le **modèle 3** est constitué par les ellipses à dominante horizontale : ces arcs ont tant la flèche que la rapport d'aspect variables. Pour ce modèle, le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmenter de la rapport d'aspect (Tab. 2d) mais aussi de la flèche (Tab. 2e), de façon symétrique pour les arcs avec orientations opposées; la variation de la sensation de courbure pour ce modèle ne couvre que la partie inférieure de l'échelle psychophysique. La fonction qui décrit le mieux la relation entre le niveau subjectif de courbure et la rapport d'aspect est une fonction exponentielle, indépendamment de l'orientation de la courbe (Tab. 2f) ; par contre la fonction qui décrit le mieux la relation entre le niveau subjectif de courbure et la flèche est une fonction linéaire (Tab. 2g).



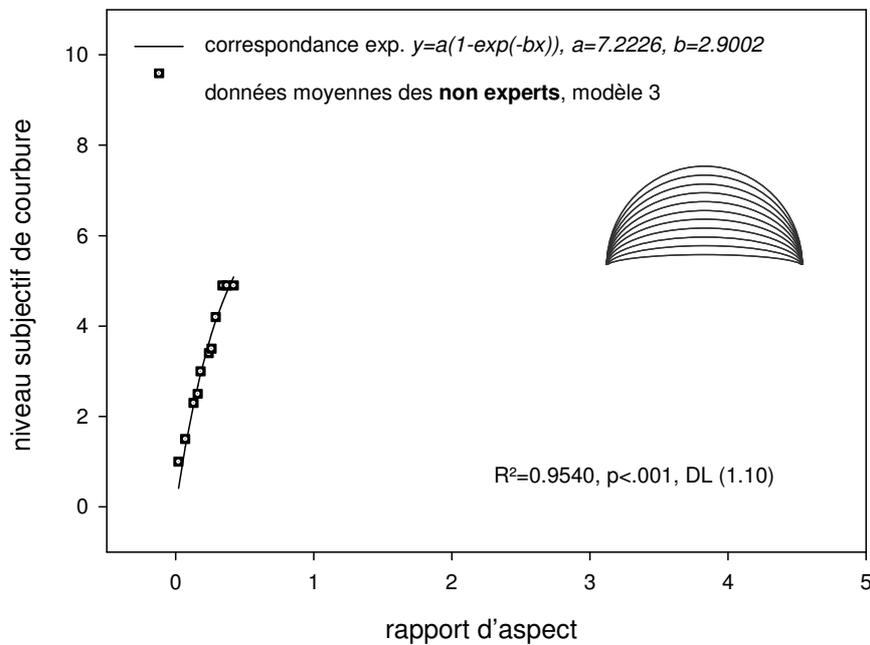
**Tab. 2b Non experts:** dans le modèle 2 le niveau subjectif de courbure augmente avec le rapport d'aspect, symétriquement pour les arcs avec orientations opposées (concavité vers le haut ou vers le bas).



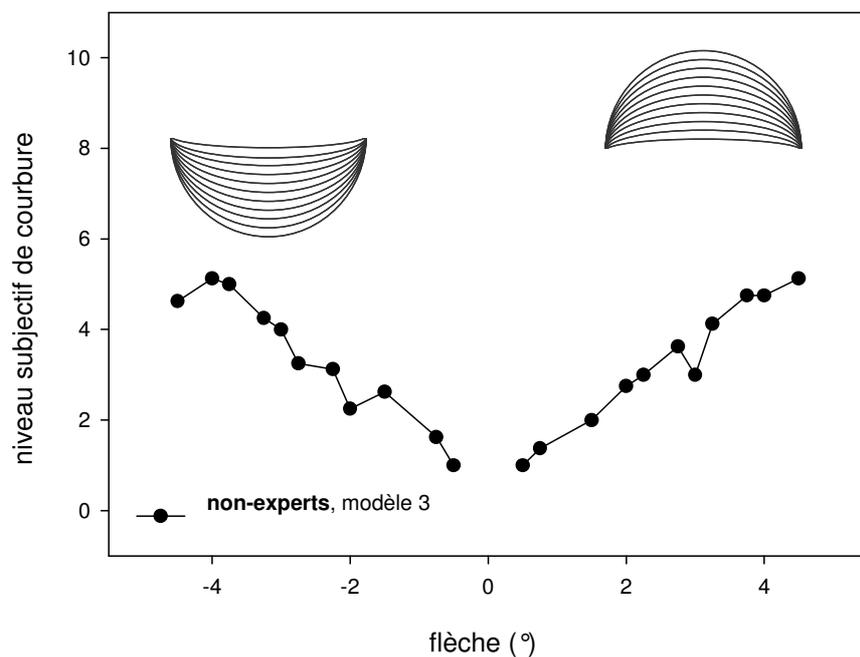
**Tab. 2c Non experts:** dans le modèle 2 la relation entre niveau subjectif de courbure et rapport d'aspect est bien représentée par une fonction exponentielle.



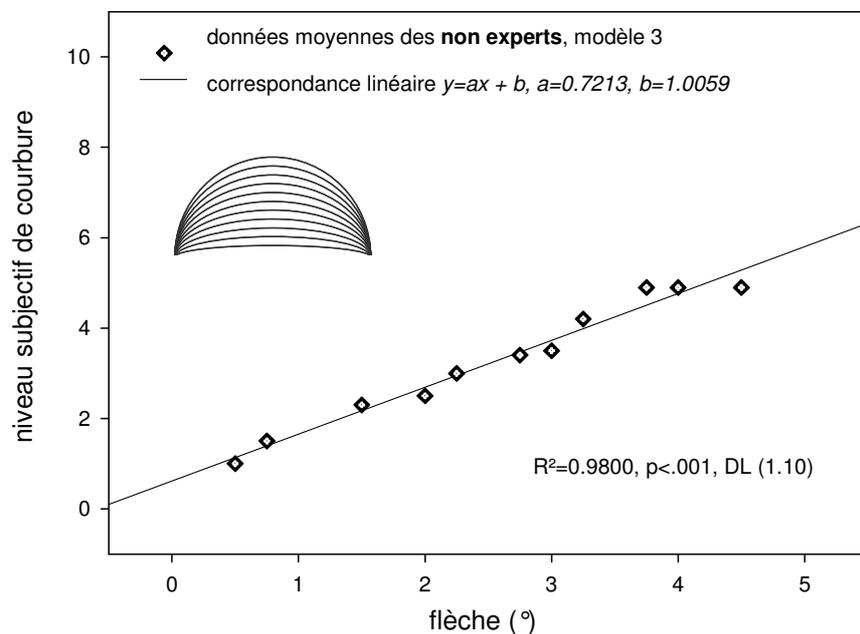
**Tab. 2d Non experts:** dans le modèle 3 le niveau subjectif de courbure augmente avec le rapport d'aspect (mais aussi avec la flèche, voir Tab. 2f).



**Tab. 2e Non experts:** dans le modèle 3 la relation entre la variation de la rapport d'aspect et la variation du niveaux de courbure est bien décrite par une fonction exponentielle.



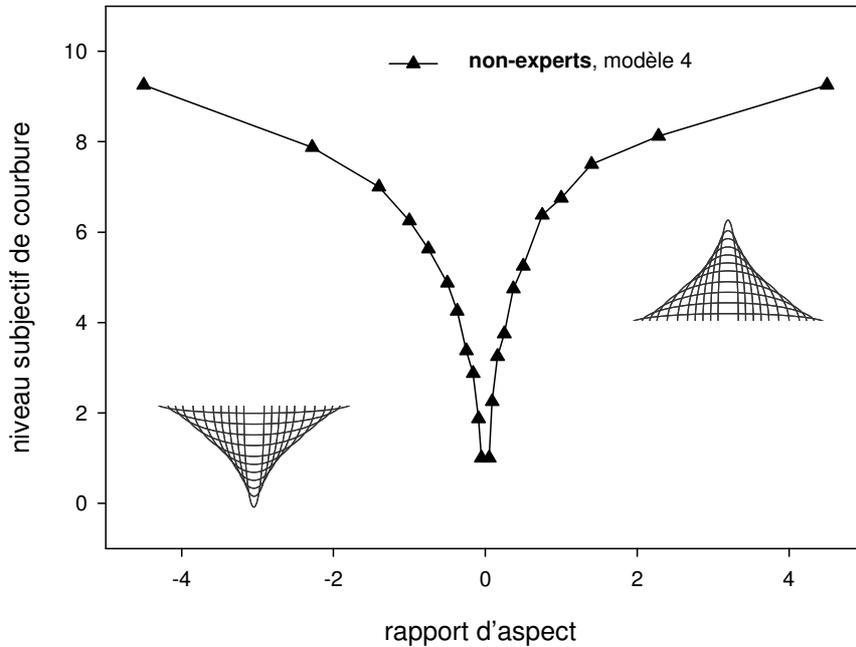
**Tab. 2f** *Non experts*: dans le modèle 3 le niveau subjectif de courbure augmente avec la flèche (mais aussi avec la rapport d'aspect, (voir Tab. 2d).



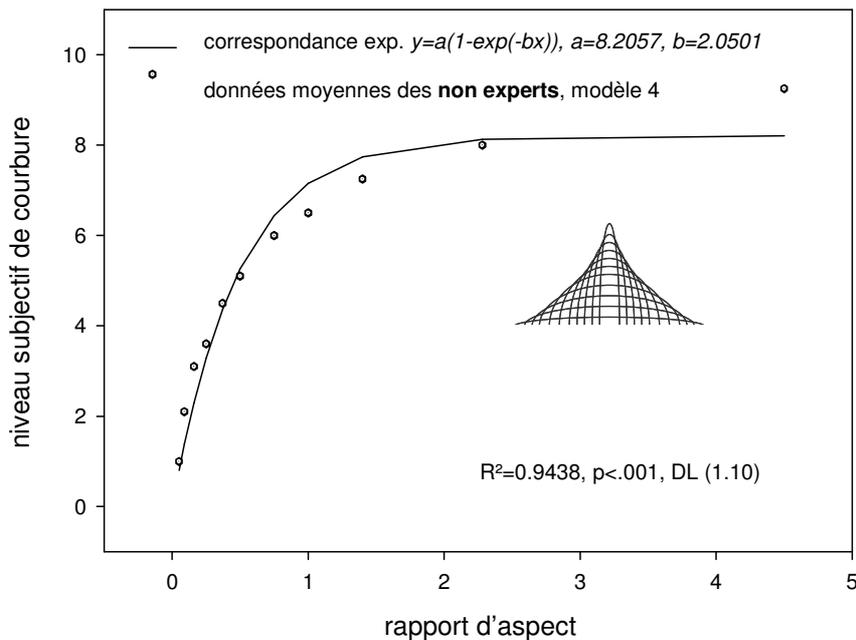
**Tab. 2g** *Non experts*: dans le modèle 3 la relation entre variation de la flèche et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction linéaire.

Le **modèle 4** est constitué par la combinaison des arcs d'ellipses horizontales et verticales: ces arcs ont tant la flèche que la rapport d'aspect variables et ces variations sont les seules, entre celles de tous les modèles géométriques, qui couvrent l'extension complète des valeurs considérés dans l'expérience. Pour les arcs de ce modèle, le niveau subjectif de courbure augmente tant avec l'augmentation de la flèche (Tab. 2i) que du

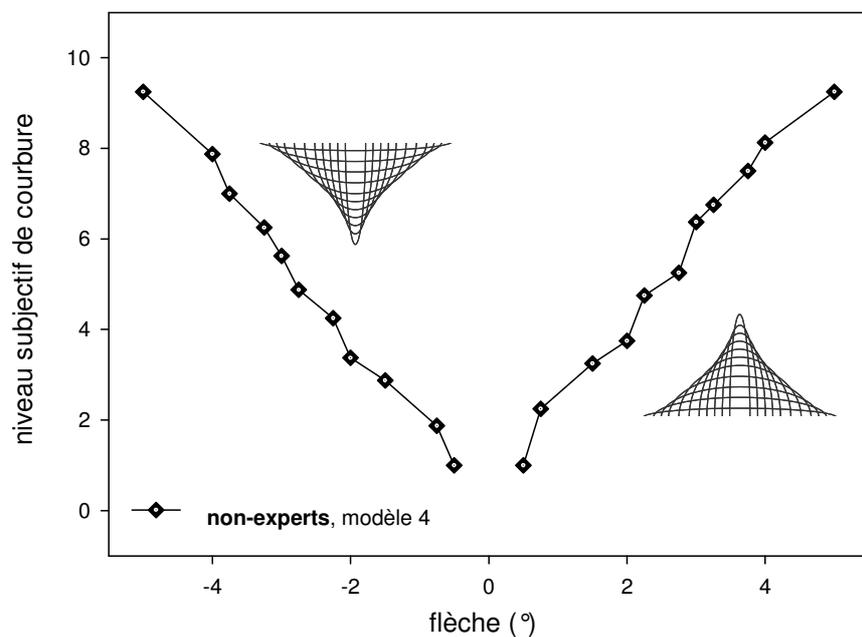
rapport d'aspect [Tab. 2h], indépendamment de l'orientation de la courbe; cette augmentation couvre l'extension complète de l'échelle psychophysique. Les fonctions qui décrivent le mieux la relation entre variation de niveau subjectif de courbure et variation des deux paramètres considérés sont, indépendamment de l'orientation de la courbe: une fonction exponentielle pour la rapport d'aspect (Tab. 2j) et une fonction linéaire pour la flèche (Tab.2k).



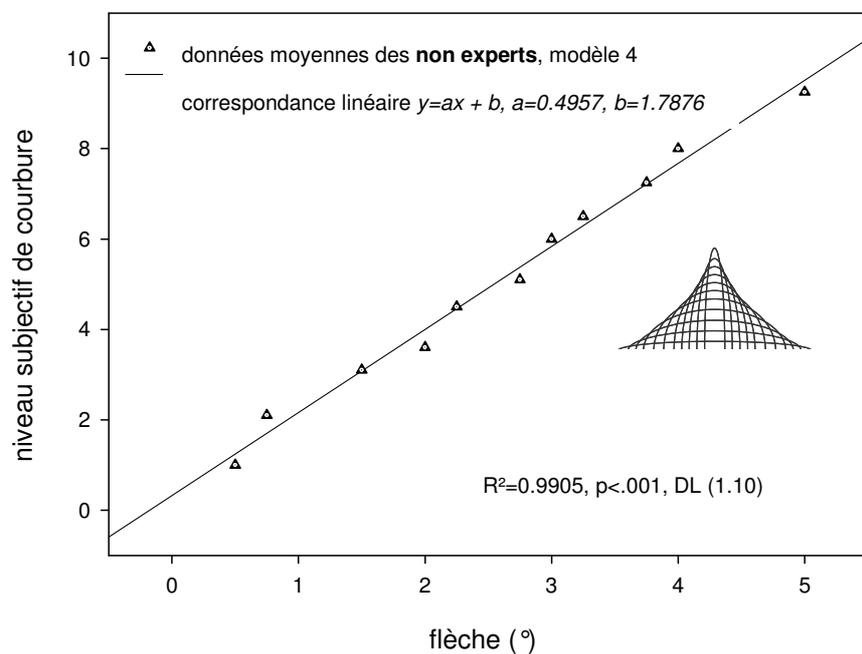
**Tab. 2h Non experts:** dans le modèle 4 le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmentation de la rapport d'aspect (mais aussi de la flèche, voir Tab. 2j).



**Tab. 2i Non experts:** dans le modèle 4 la relation entre la variation de la rapport d'aspect et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction exponentielle.



**Tab. 2j** *Non experts*: dans le modèle 4 le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmentation de la flèche (mais aussi de la rapport d'aspect, voir Fig. 2h).



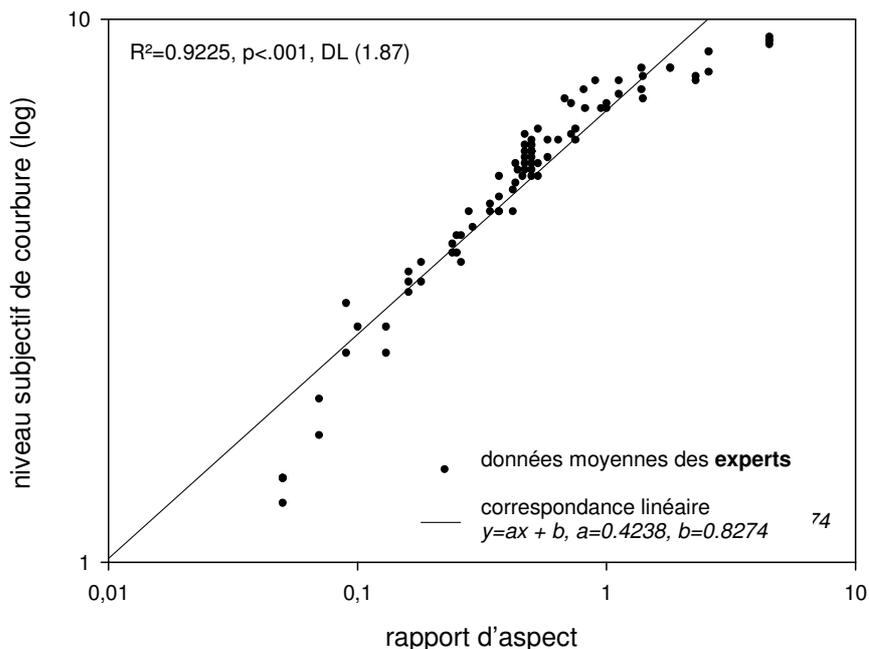
**Tab. 2k** *Non experts*: dans le modèle 4 la relation entre la variation de la flèche et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction linéaire.

### 3b. Observateurs experts

Les données des huit observateurs experts ont été analysées de la même façon que les données des non-experts. La comparaison des fonctions psychométriques individuelles n'a pas montré des différences remarquables entre sept des sujets de ce groupe : comme pour les observateurs non-experts, on ne présentera que les analyses sur leurs données moyennes. Les données de l'observateur expert qui ont produit des résultats très différents vis-à-vis aux autres seront présentées et discutées indépendamment.

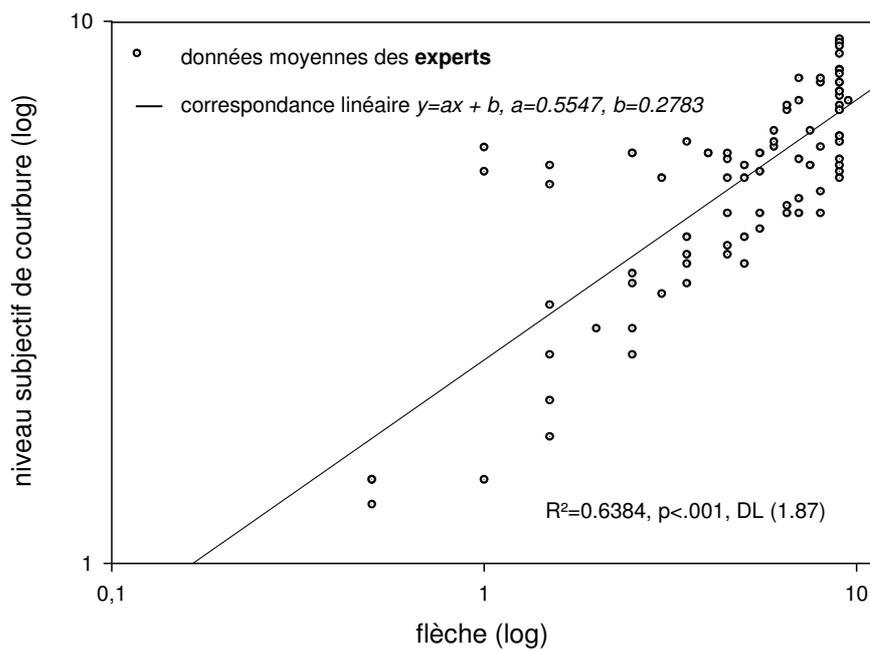
#### *Niveau subjectif de courbure en fonction des variables flèche et rapport d'aspect*

Les niveaux subjectifs de courbure de sept des huit observateurs experts ont montré des variations en fonction de la flèche et de la rapport d'aspect similaires dans tous leurs aspects aux données des observateurs non-experts. Les analyses de régression des données des experts projetées sur une échelle logarithmique révèlent une bonne relation linéaire entre les niveaux subjectifs de courbure et la rapport d'aspect [Tab. 3a] et une plus pauvre relation linéaire entre les niveaux subjectifs et la flèche [Tab. 3b].

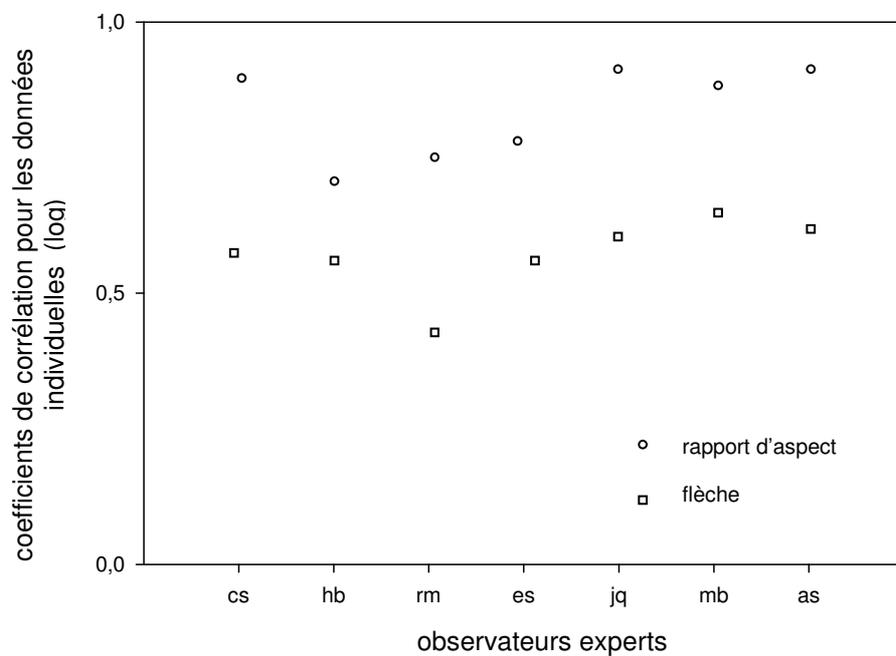


**Tab. 3a Experts:** relation linéaire entre niveau subjectif de courbure (ordonnée) et rapport d'aspect (abscisse).

La fonction linéaire qui relie les niveaux subjectifs au rapport d'aspect produit, comme pour les observateurs non-experts, un coefficient de corrélation notablement plus haut que la fonction obtenue pour la flèche. L'analyse statistique (t-test) des coefficients de corrélation des correspondances linéaires pour les données individuelles des sept experts révèle une différence statistiquement significative ( $t(1,12) = 6.0556, p < 0.001$ ) entre les coefficients de corrélation pour la rapport d'aspect et les fonctions adaptées pour la flèche [Tab. 3c].

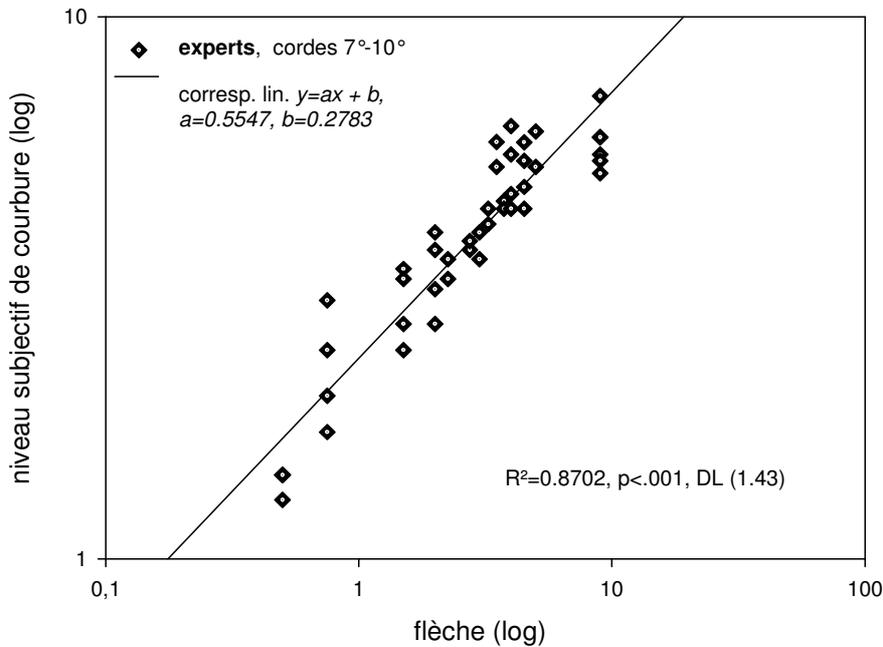


**Tab. 3b Experts:** relation linéaire niveau subjectif de courbure (ordonnée) / flèche (abscisse).

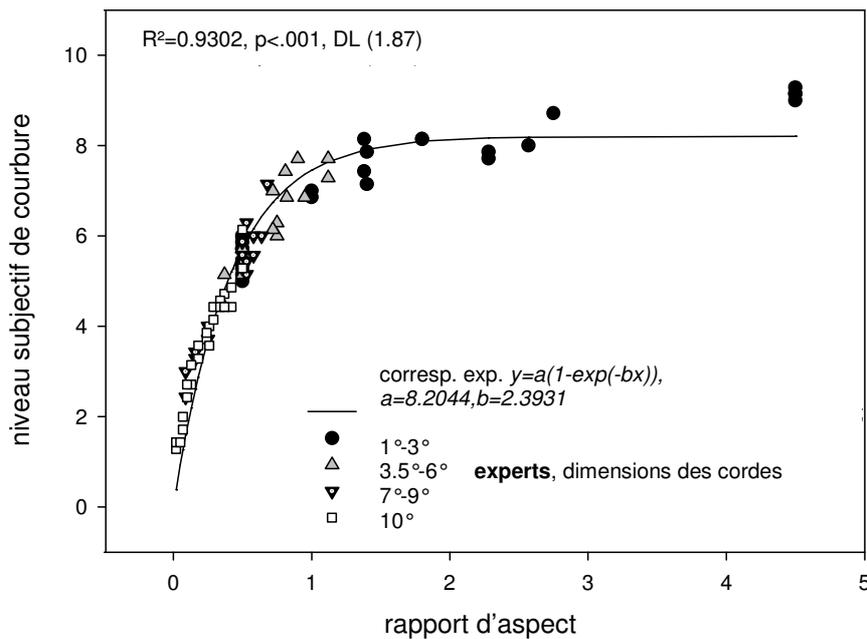


**Tab. 3c Experts:** coefficients de corrélation pour les données individuelles: rapport d'aspect (haut) et flèche (bas).

Comme pour les non-experts, la rapport d'aspect produit une correspondance linéaire aux niveaux subjectifs de courbure statistiquement meilleure que la flèche si on considère les cordes de toutes les longueurs, mais, encore, cette différence n'est plus significative dans le cas des courbes avec les cordes les plus longues [Tab. 3d] et [Tab.3e]. Comme pour les données des non-experts, on peut expliquer ces résultats à la lumière de l'effet formel globale qui résulte de certaines dimensions de la corde (voir la présentation des résultats des non-experts).



**Tab. 3d Experts**  
relation linéaire niveau subjectif de courbure (ordonnée) /flèche (abscisse) pour les courbes avec corde entre 7° et 10° de l'angle visuel.



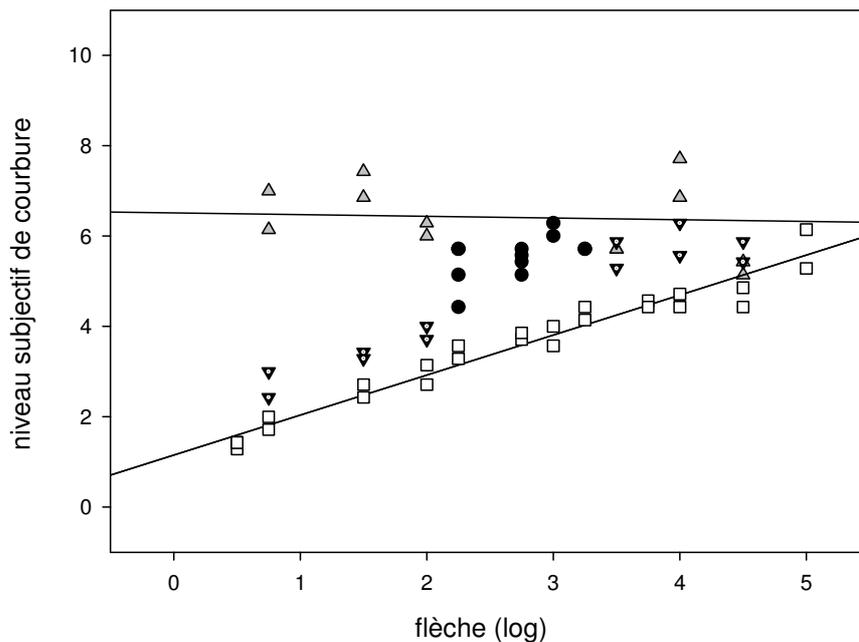
**Tab. 3e Experts:**  
la relation entre niveau subjectif de courbure (ordonnée) et rapport d'aspect (abscisse) est une fonction exponentielle.

Les fonctions psychométriques pour les données moyennes projetées sur une échelle linéaire [Tab. 3e] et [Tab. 3f] révèlent que une fonction exponentielle produit la meilleure correspondance pour le niveaux subjectif de courbure en fonction de la rapport d'aspect [Tab. 3f]. Une fonction linéaire produit une correspondance raisonnablement satisfaisante pour les niveaux subjectifs en fonction de la flèche, indépendamment de la dimension de la corde ( $R^2 = 0.6149$ ,  $p < 0.001$ ,  $DF(1.87)$ ), avec un résultat notablement meilleur si on ne considère que les stimuli avec les cordes les plus longues [Tab. 3e]. Encore une fois, si on compare les données relatives à la rapport d'aspect [Tab. 3a] et à la flèche [Tab. 3b] on remarque une dispersion plus importante dans les données relatives à la flèche que dans ceux relatifs à la rapport d'aspect.

- 1°-3°
- ▲ 3.5°-6° **experts**, dimensions des cordes  
corr. lin.  $y=ax + b$ , cordes 1à-6°,  $a=6.51$ ,  $b=0.03$ ,  $R^2= 0.0209$ , NS

---

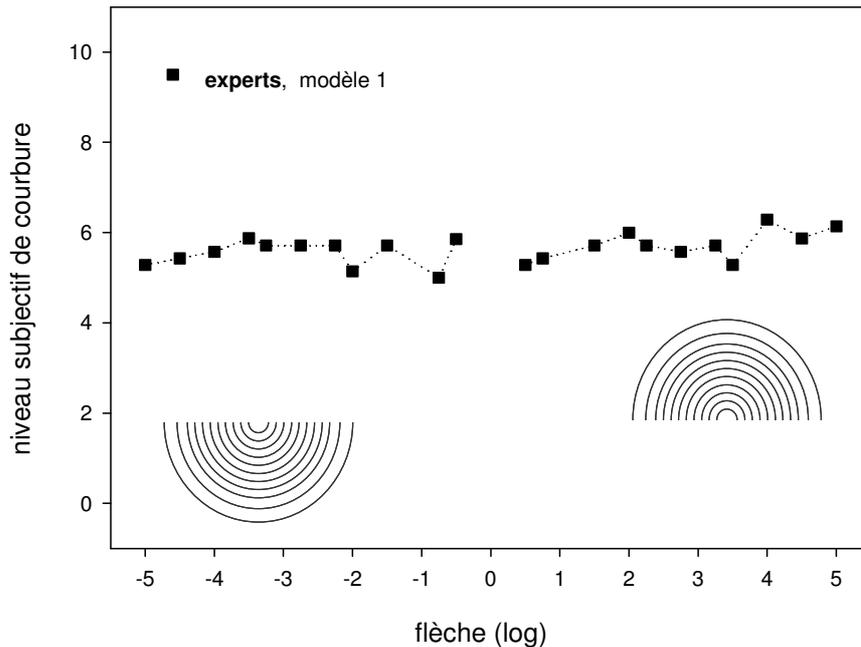
- ▼ 7°-9° **experts**, dimensions des cordes
- 10°  
corr. lin.  $y=ax + b$ , cordes 7°-10°,  $a=1.15$ ,  $b=0.88$ ,  $R^2= 0.9553$ ,  $p < .001$



**Tab. 3f Experts:** relation linéaire entre le niveau subjectif de courbure (ordonnée) et la flèche (abscisse) pour les différentes longueurs des cordes.

*Représentation de la courbure en fonction des quatre modèles géométriques*

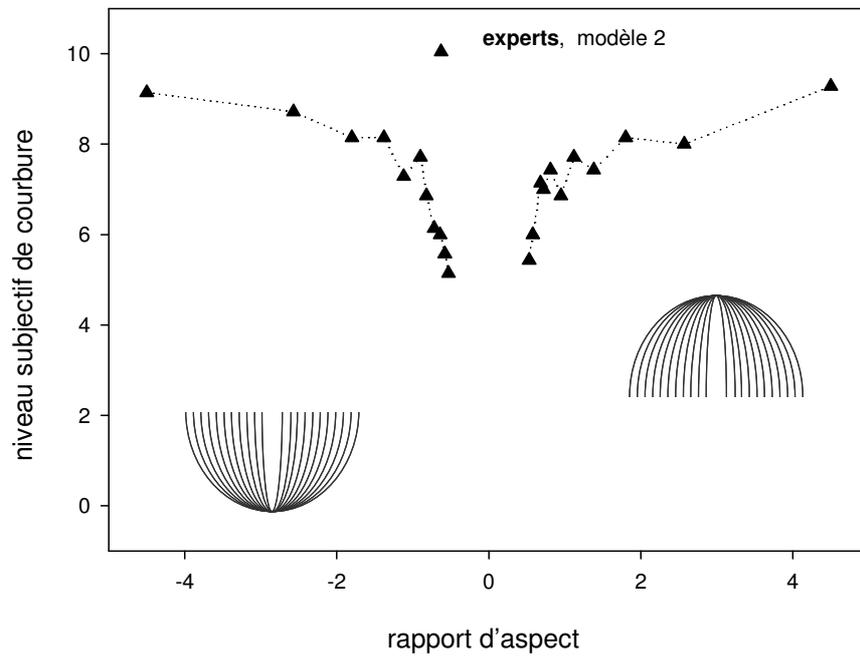
Les données moyennes des observateurs experts analysées en fonction des quatre modèles géométriques montrent que les arcs dérivés des cercles concentriques (**modèle 1**) produisent un niveau constant de courbure dans la région moyenne de l'échelle psychophysique, le même résultat que l'on avait trouvé pour les non-experts. A nouveau, les arcs avec orientations opposées (concavité vers le haut ou vers le bas) produisent des données symétriques [Tab.4a].



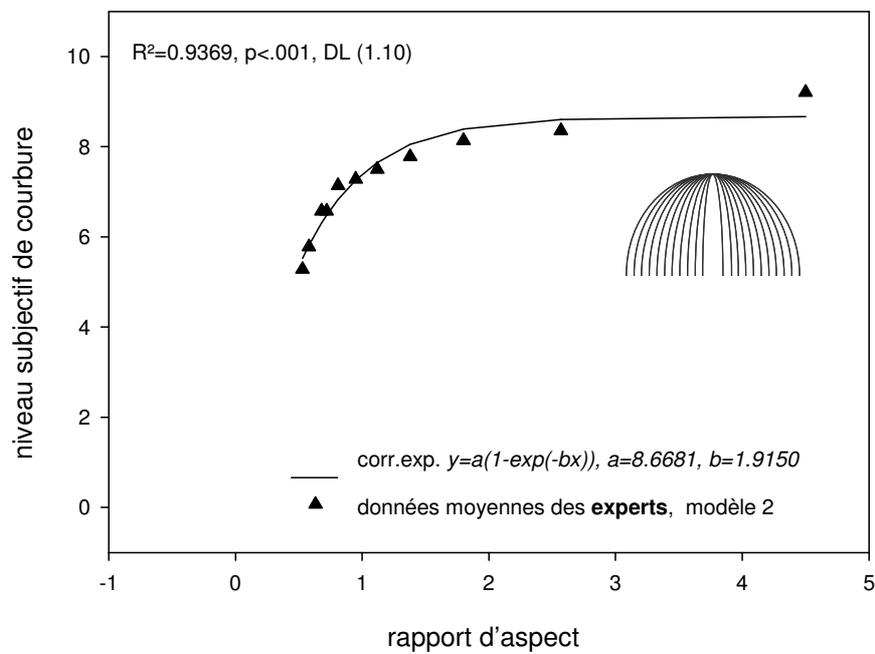
**Tab. 4a Experts:** tous les arcs du modèle 1 produisent une sensation de courbure constante dans le milieu de l'échelle psychométrique.

Pour les arcs d'ellipse à dominante verticale (**modèle 2**), le niveau subjectif de courbure augmente avec la rapport d'aspect, de façon symétrique pour les arcs avec orientations opposées [Tab. 4b]; cette augmentation ne concerne que la moitié supérieure de l'échelle psychophysique, comme on l'avait trouvé pour les observateurs non-experts. La fonction qui décrit le mieux la relation entre la variation de la sensation subjective de courbure et la variation de la rapport d'aspect est, cette fois encore, une fonction exponentielle [Tab. 4c].

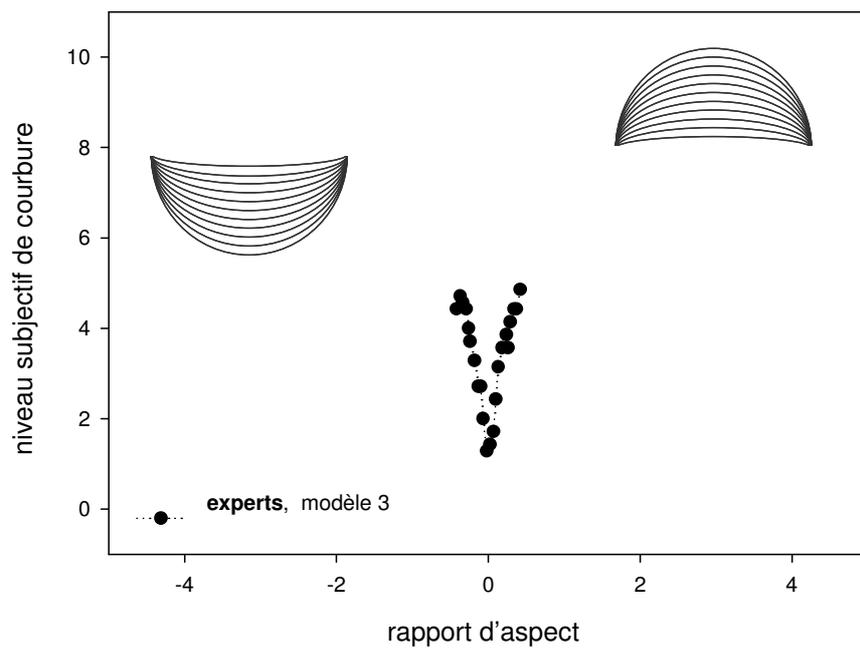
Pour les arcs d'ellipse à dominante horizontale (**modèle 3**), le niveau subjectif de courbure augmente tant avec la rapport d'aspect [Tab. 4d] que avec la flèche [Tab. 4e], de façon symétrique pour les arcs avec orientation opposée; encore un fois, comme pour les non-experts, cette augmentation ne concerne que la moitié inférieure de l'échelle psychophysique. La fonction qui décrit le mieux la relation entre la variation du niveau subjectif de courbure et la variation de la rapport d'aspect est, comme pour les non-experts, une fonction exponentielle (Tab. 4f) et la fonction qui lie les niveaux subjectifs de courbure et la flèche est une fonction linéaire (Tab.4g).



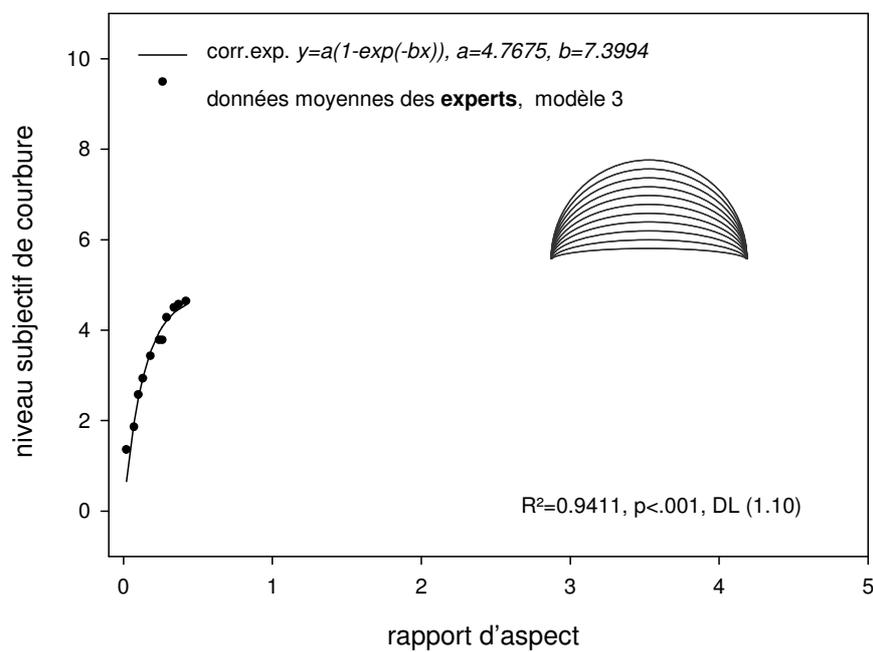
**Tab. 4b Experts**  
 Pour les arcs du modèle 2 le niveau subjectif de courbure augmente avec le rapport d'aspect, symétriquement pour les arcs avec orientations opposées (concavité vers le haut ou vers le bas).



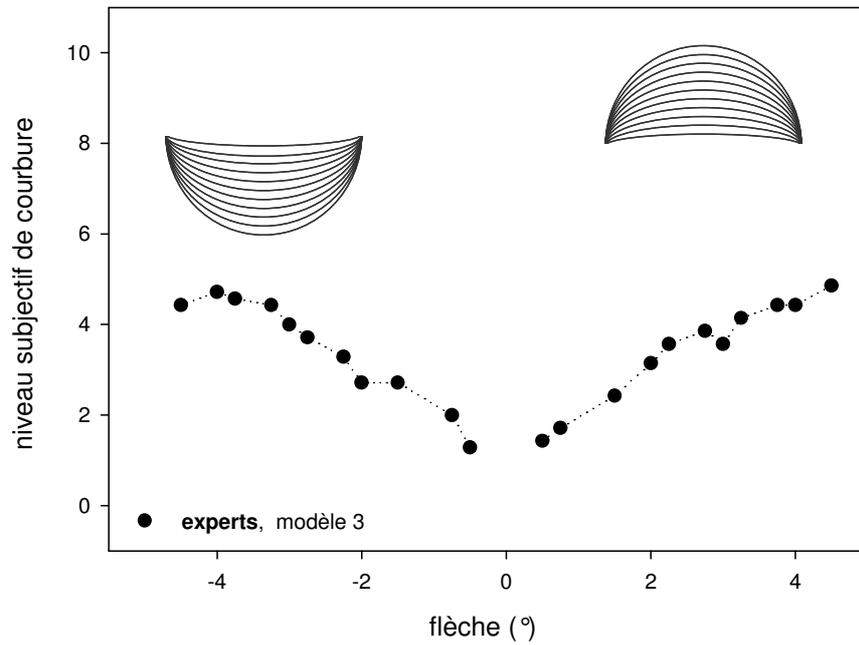
**Tab. 4c Experts:**  
 dans le modèle 2 la relation entre niveau subjectif de courbure et rapport d'aspect est bien représentée par une fonction exponentielle.



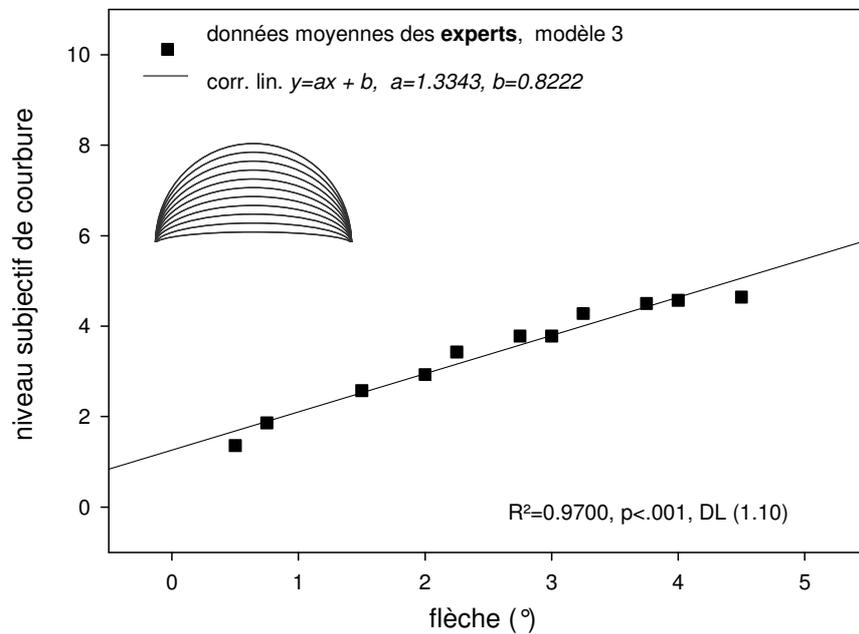
**Tab. 4d Experts :** pour les arcs du modèle 3 le niveau subjectif de courbure augmente avec le rapport d'aspect.



**Tab. 4e Experts:** dans le modèle 3 la relation entre la variation du rapport d'aspect et la variation du niveaux de courbure est bien décrite par une fonction exponentielle.

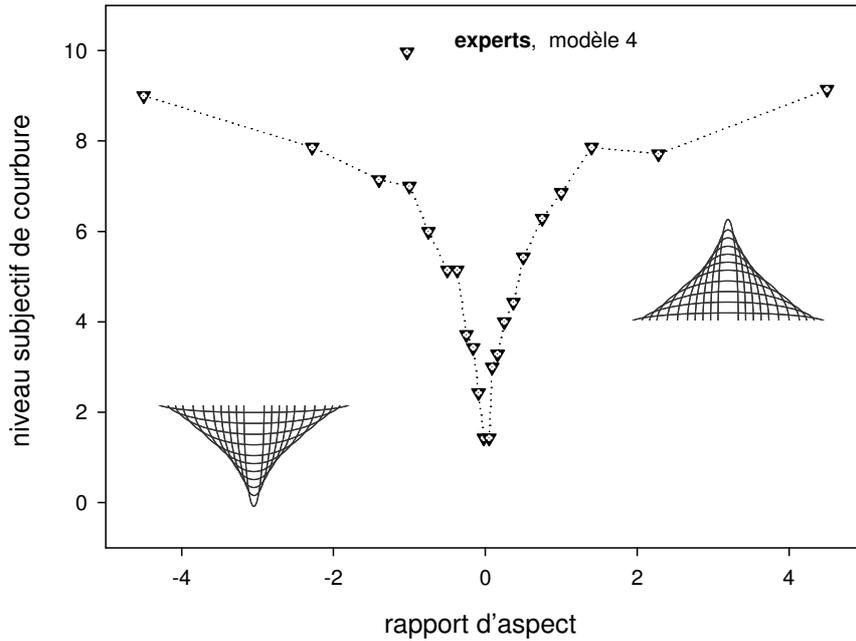


**Tab. 4f Experts :**  
pour les arcs du modèle 3 le niveau subjectif de courbure augmente avec la flèche (mais aussi avec le rapport d'aspect, (voir Tab. 4d).

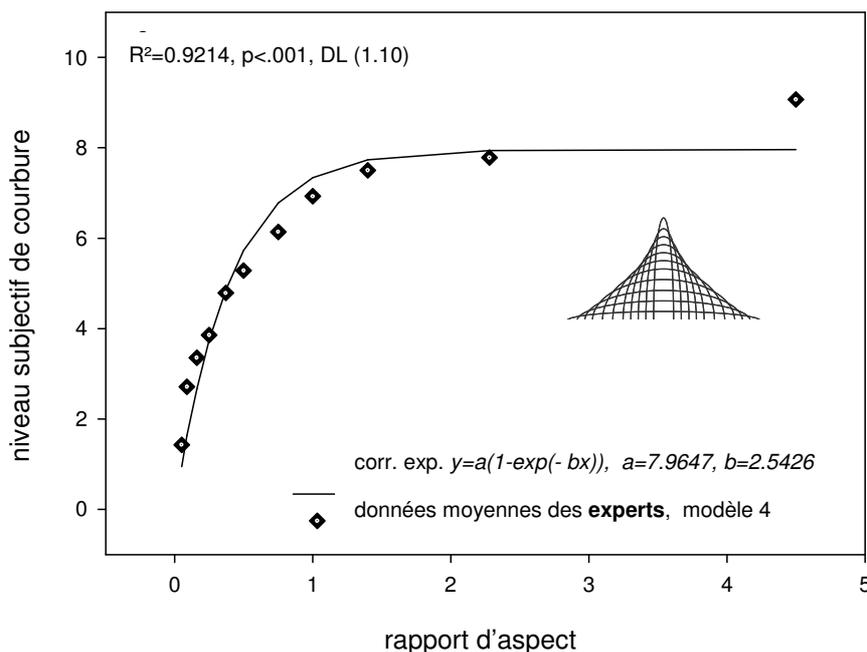


**Tab. 4g Experts :**  
Pour les arcs du modèle 3 la relation entre la variation de la flèche et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction linéaire.

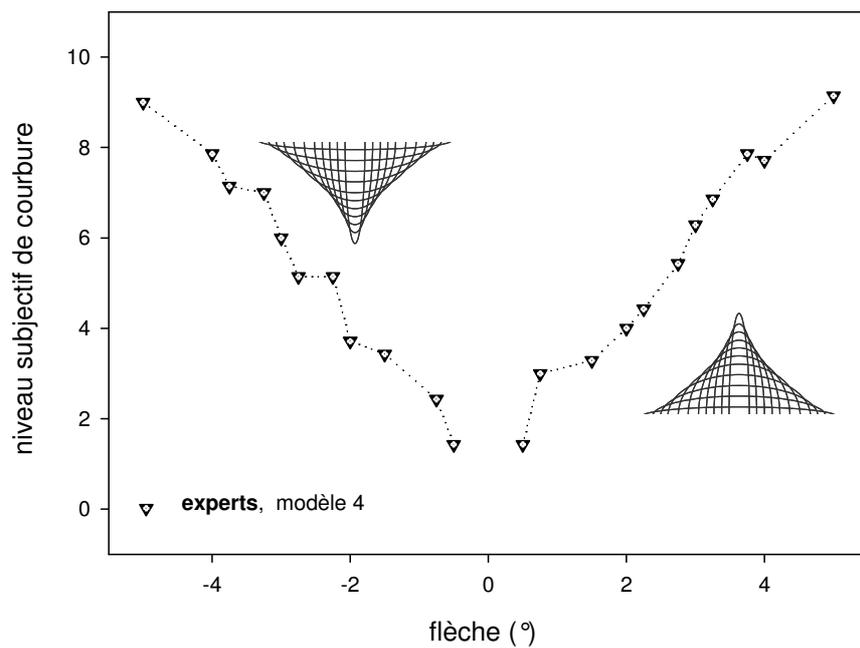
Pour les arcs obtenus comme combinaison d'ellipses à dominante horizontale et verticale (**modèle 4**) le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmenter tant du rapport d'aspect [Tab. 4h] que de la flèche [Tab. 4i] et cette augmentation, comme pour les non experts, couvre l'extension complète de l'échelle psychométrique. La fonction qui décrit le mieux la relation entre la variation de la rapport d'aspect et la variation du niveau subjectif de courbure est, cette fois encore, une fonction exponentielle [Tab. 4j] et la fonction qui décrit la relation entre niveau de courbure et flèche est une fonction linéaire [Tab. 4k].



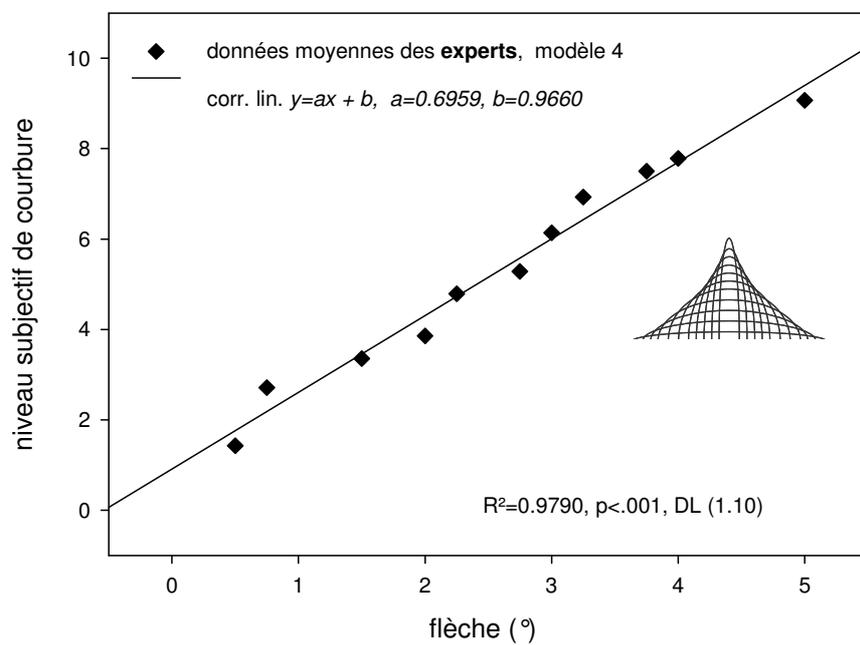
**Tab. 4h Experts :** pour les arcs du modèle 4 le niveau subjectif de courbure augmente proportionnellement à l'augmentation du rapport d'aspect.



**Tab. 4i Experts:** dans le modèle 4 la relation entre la variation du rapport d'aspect et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction exponentielle.



**Tab. 4 j** Experts dans le modèle 4 le niveau subjectif de courbure augmente à l'augmentation de la flèche (mais aussi de la rapport d'aspect, voir Fig. 4h).



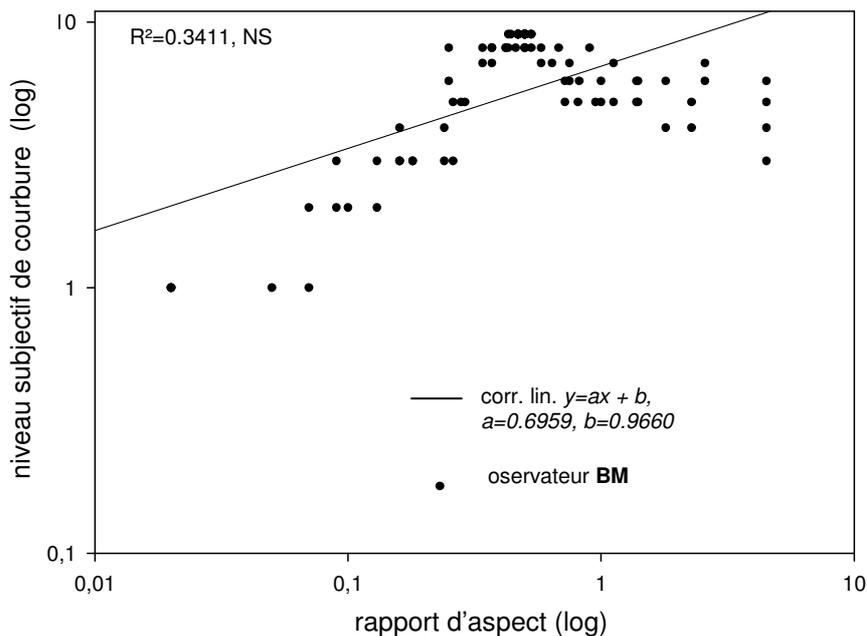
**Tab. 4 k** Experts: dans le modèle 4 la relation entre la variation de la flèche et la variation du niveau subjectif de courbure est bien approximé par une fonction linéaire.

### 3c. Un cas exceptionnel: l'observateur expert « BM »

L'observateur expert BM est un ingénieur civil et chercheur, expérimenté dans les mathématiques et géométries complexes et en particulier dans l'analyse théorique du couplage formes forces dans la conception architecturale. Ses données montrent une différence significative par rapport à tous les autres observateurs.

*BM : niveau subjectif de courbure en fonction des variables flèche et rapport d'aspect*

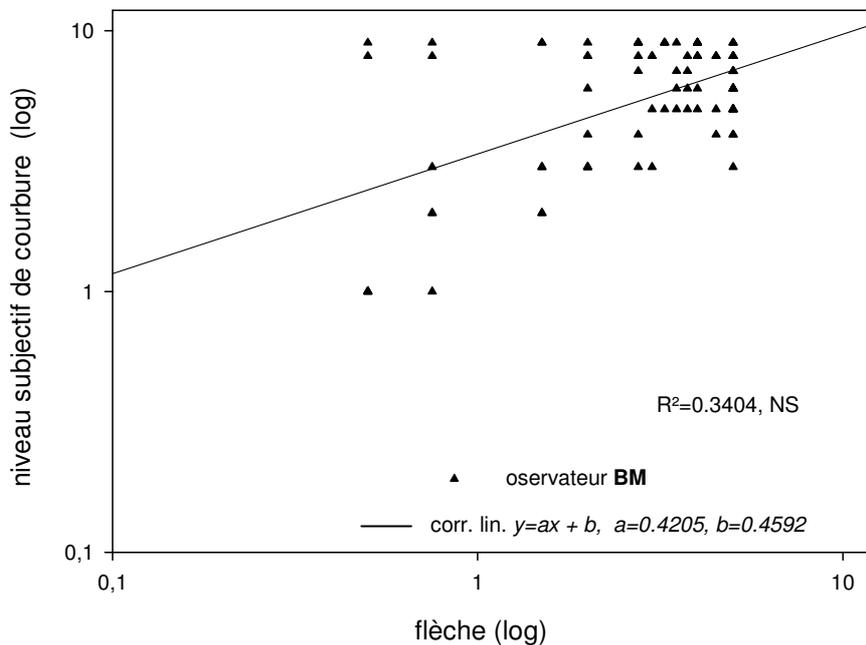
Les sensations visuelles de courbure de l'observateur BM, représentées à travers les niveaux subjectifs de courbure représentées en fonction du rapport d'aspect et de la flèche, apparemment, ne révèlent pas de variation de la sensation de courbure en fonction des deux variables testées. Les analyses de régression des données de l'observateur BM projetées sur une échelle logarithmique ne révèlent pas des relations significatives entre le niveau subjectif de courbure et le rapport d'aspect [Tab. 5a] ni entre le niveau subjectif de courbure et la flèche [Tab. 5b]. Aucune fonction psychométrique adaptée n'a pas pu être trouvée pour les données globales de l'observateur BM représentées sur une échelle linéaire [Tab. 5 e] et [Fig.5f].



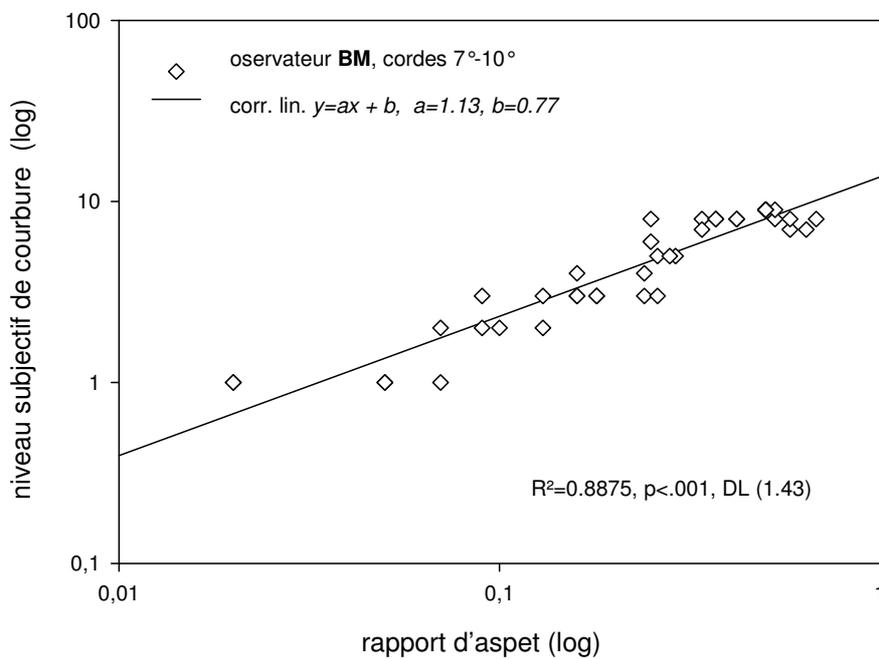
**Tab. 5a Observateur BM**  
Aucune relation significative n'a été trouvée entre la variation du niveau subjectif de courbure (ordonnée) et le rapport d'aspect (an abscisse).

Des analyses ultérieures en fonction des longueurs des cordes des stimuli ont révélé une relation linéaire significative entre les niveaux subjectifs de courbure de l'observateur BM et la flèche des arcs avec cordes d'une dimension comprise entre  $7^\circ$  et  $10^\circ$  de l'angle visuel [Tab.5d] et [Tab.5f] et entre les niveaux de courbure et la rapport d'aspect des arcs avec cordes d'au moins  $7^\circ$  de l'angle visuel [Tab.5c] et [Tab.5e]. Dans ce cas, les données de l'observateur BM révèlent une dépendance entre la flèche et la longueur de la corde similaire à la dépendance rencontrée pour les autres observateurs. Par contre, les résultats de l'observateur BM montrent une

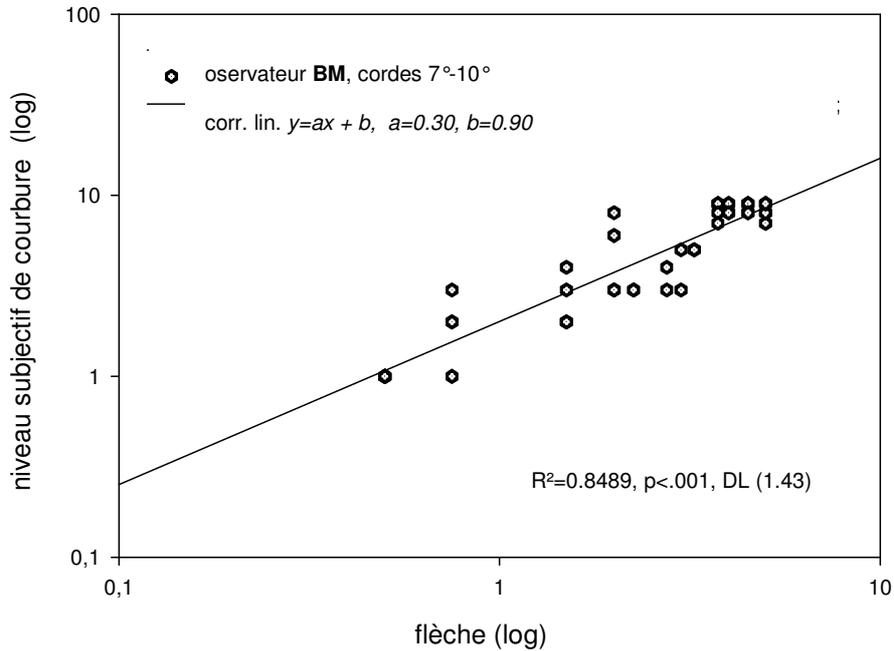
dépendance de ce genre aussi entre la rapport d'aspect et la longueur de la corde, différemment de tous les autres observateurs.



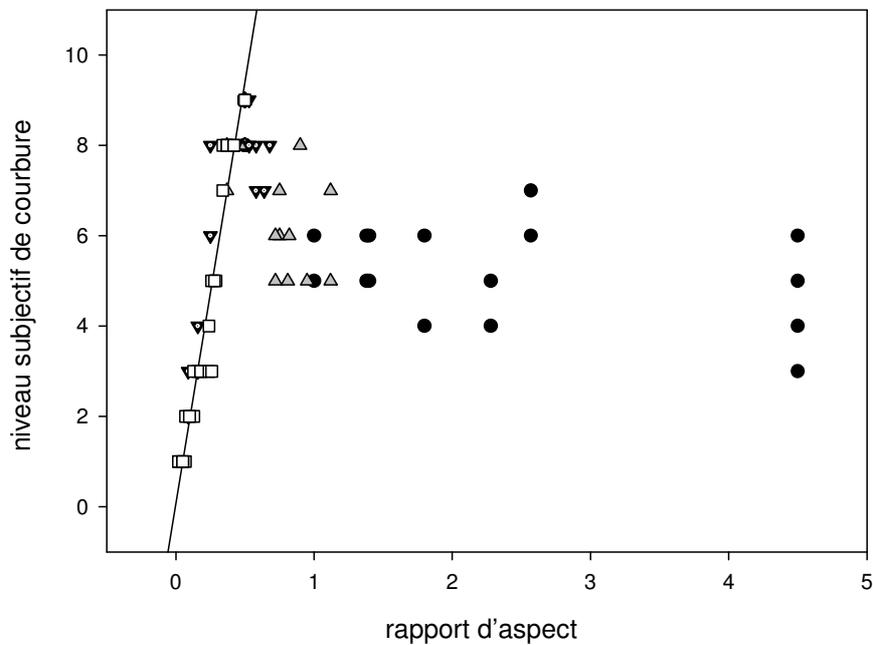
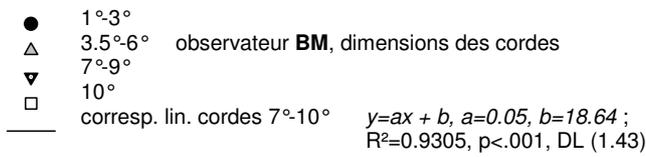
**Tab. 5b** *Observateur BM*  
Aucune relation significative n'a été trouvée entre la variation du niveau subjectif de courbure (ordonnée) et la variation du rapport d'aspect (abscisse).



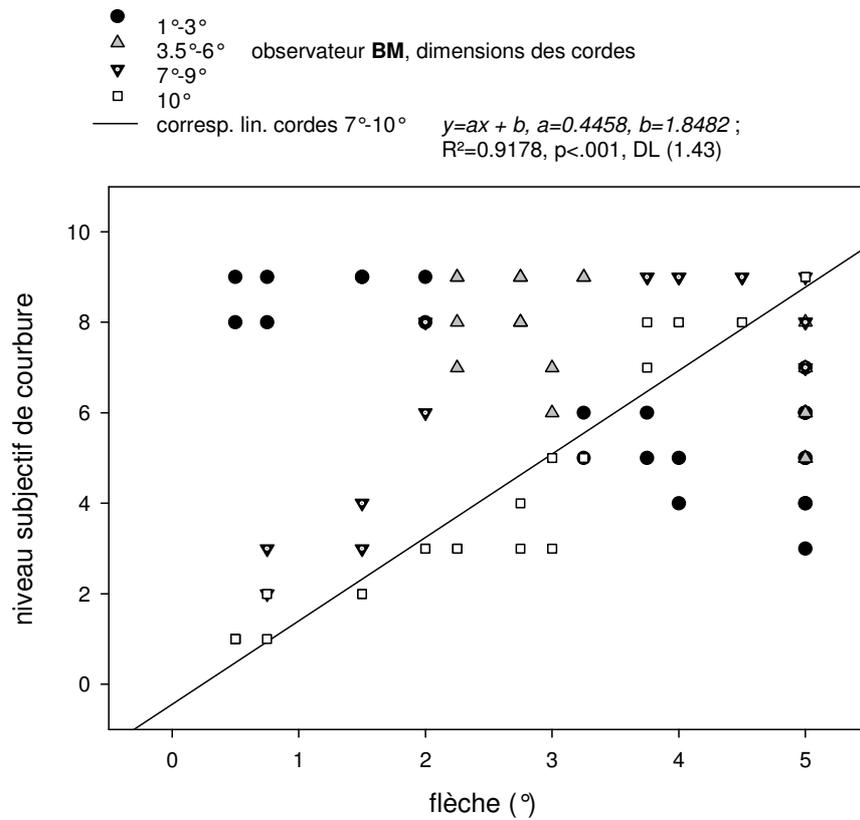
**Tab. 5c** *Observateur BM*  
La relation entre la variation du niveau subjectif de courbure et le rapport d'aspect est bien représentée par une fonction linéaire pour les arcs avec cordes entre 7° et 10° de l'angle visuel.



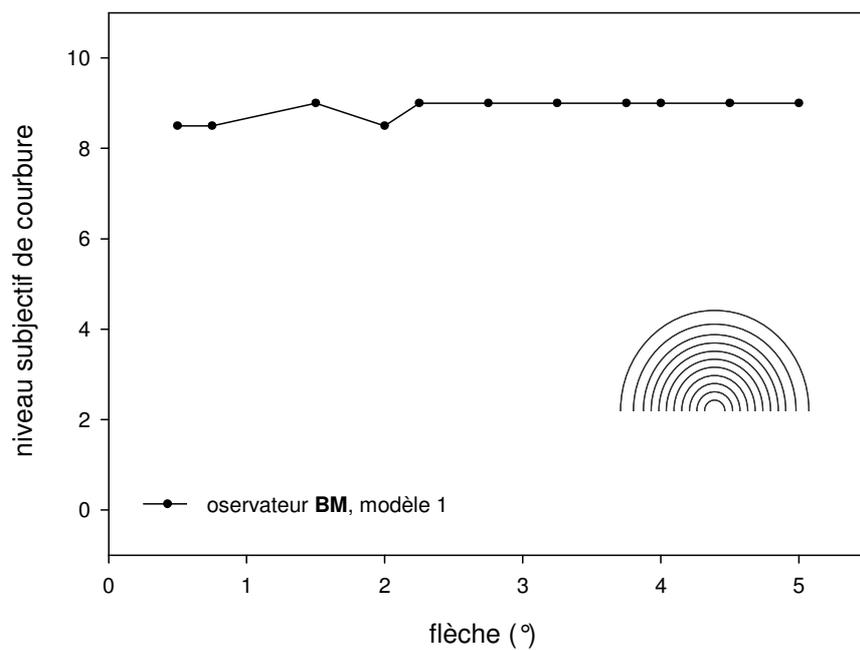
**Tab. 5d Observateur BM :** la relation entre la variation du niveau subjectif de courbure et la flèche peut être représentée par une fonction linéaire pour les arcs avec cordes entre 7° et 10° de l'angle visuel.



**Tab. 5e Observateur BM :** relation entre la variation du niveau subjectif de courbure et le rapport d'aspect pour les différentes longueurs des cordes.



**Tab. 5f** Observateur **BM** : relation entre la variation du niveau subjectif de courbure et la flèche pour les différentes longueurs des cordes.



**Tab. 6a** Observateur **BM** : Tous les arcs du modèle 1 produisent une sensation constante de courbure dans la partie haute de l'échelle psychométrique (courbure perçue très importante).

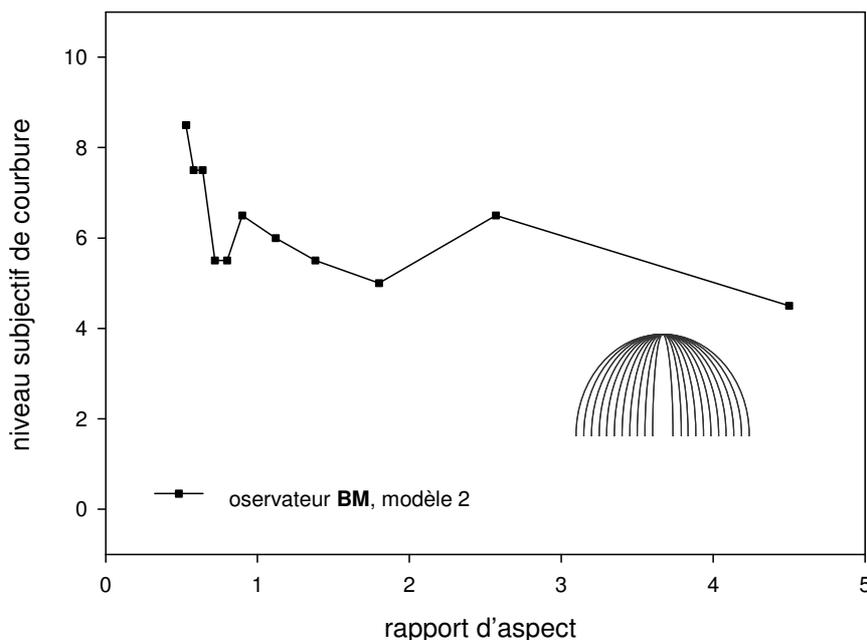
*BM : représentation de la courbure en fonction des quatre modèles géométriques*

Comme pour les autres observateurs, les données de l'observateur BM révèlent des sensations symétriques pour les arcs avec orientations opposées.

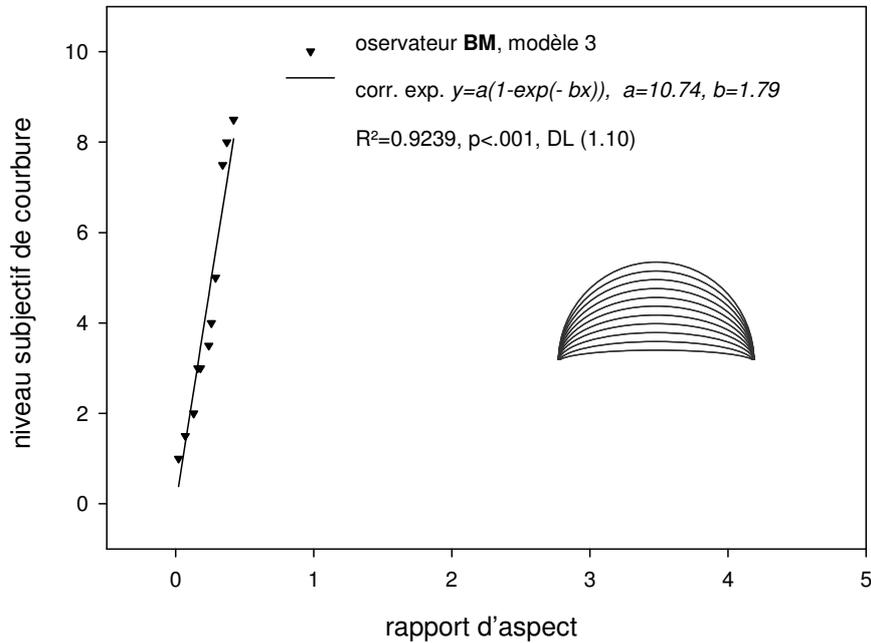
Les arcs dérivés des cercles concentriques (**modèle 1**) produisent, comme pour tous les autres observateurs, un niveau subjectif de courbure constante en fonction des variations de la flèche, mais avec la remarquable différence que les niveaux de sensation de l'observateur BM sont concentrés dans l'extrême région supérieure de l'échelle psychophysique [Tab. 6a], à la différence de tous les autres observateurs, qui ont présenté des niveaux constants de sensation dans la région moyenne de l'échelle.

Pour les arcs d'ellipses à dominante verticale (**modèle 2**) le niveau subjectif de courbure de l'observateur BM diminue à l'augmenter de la rapport d'aspect, tant pour les arcs orientés avec la concavité vers le haut que pour ceux orientés vers le bas [Tab. 6b] ; les données de tous les autres observateurs, experts ou non, ont montré pour ce modèle un augmentation exponentielle de la sensation.

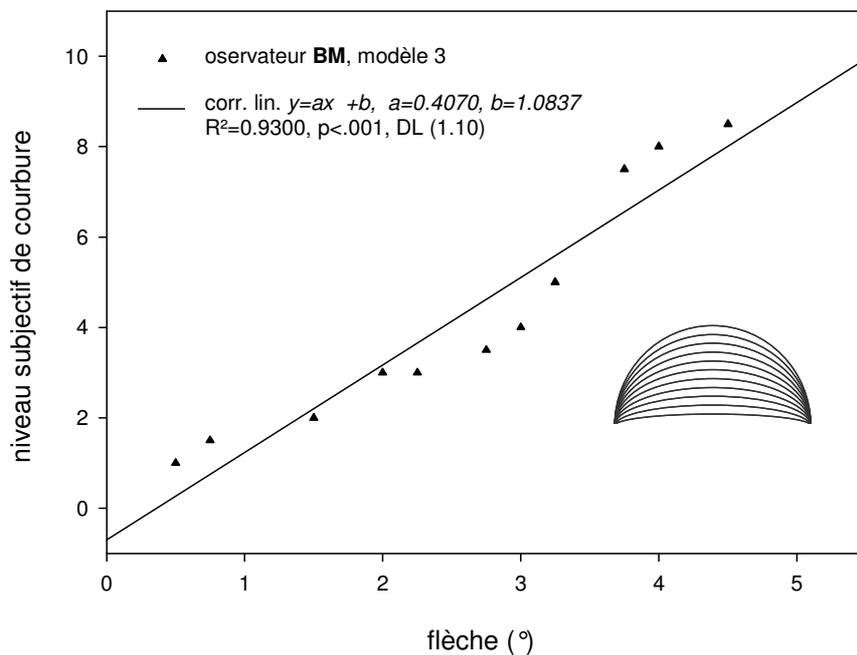
Pour les arcs d'ellipses à dominante horizontale (**modèle 3**) le niveau subjectif de courbure de l'observateur BM augmente à l'augmenter tant de la flèche [Tab. 6c] que de la rapport d'aspect [Tab. 6d] et cet augmentation couvre la totalité de l'échelle psychophysique, alors que pour tous les autres observateurs l'augmentation de la sensation ne couvrait que la moitié inférieure de l'échelle psychophysique. Comme pour tous les autres observateurs, la fonction qui décrit le mieux la relation entre le niveau subjectif de courbure de l'observateur BM et la rapport d'aspect des arcs du modèle 3 est une fonction exponentielle [Tab.6c] et la fonction qui décrit le mieux la relation entre le niveau subjectif de courbure et la flèche est une fonction linéaire [Tab. 6d].



**Tab. 6b** Observateur BM : pour les arcs du modèle 2, le niveau subjectif de courbure diminue à l'augmenter du rapport d'aspect.



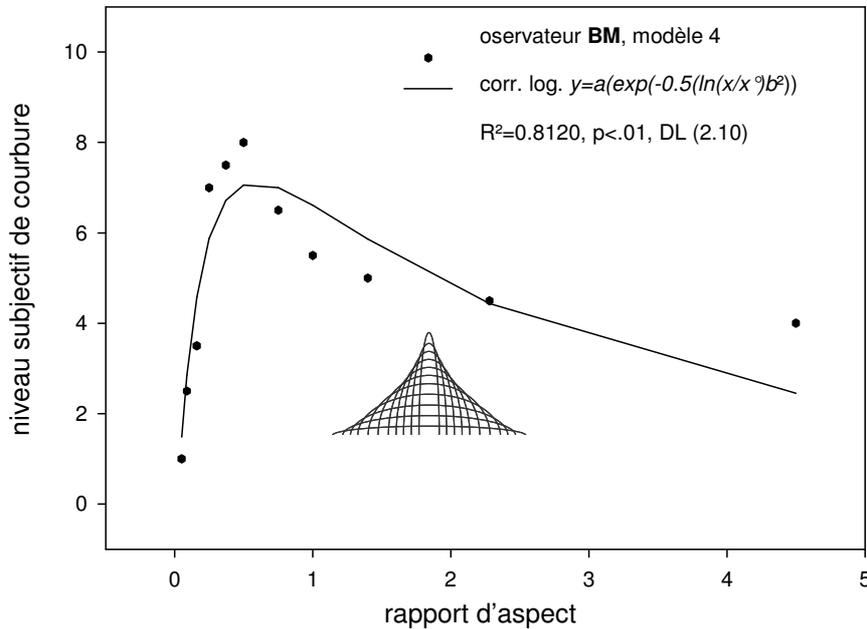
**Tab. 6c** *Observateur BM* : pour les arcs du modèle 3, le niveau subjectif de courbure augmente avec le rapport d'aspect et il couvre toute l'extension de l'échelle psychophysique, de 0 (courbure min.) à 10 (courbure max) ; la fonction capable de représenter la relation entre les deux variables est une fonction exponentielle.



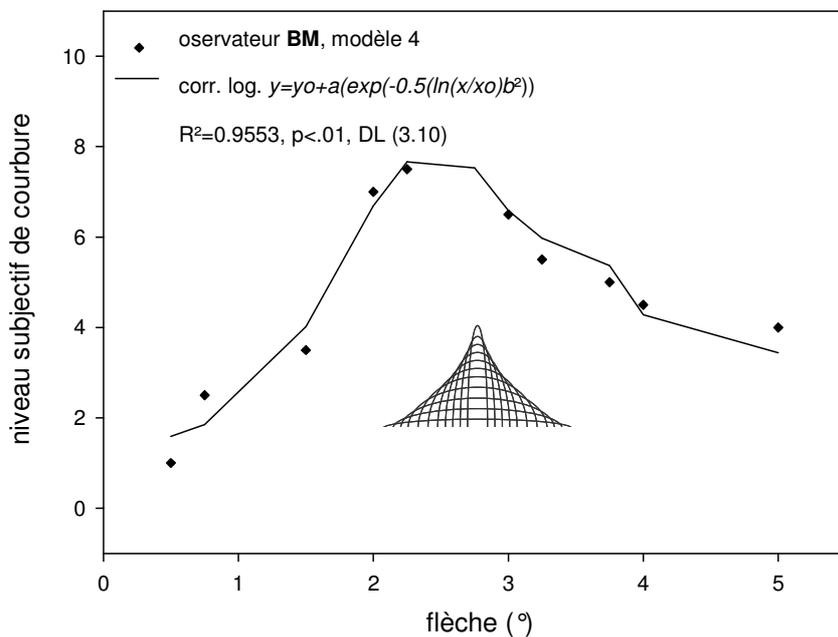
**Tab. 6d** *Observateur BM* : pour les arcs du modèle 3, le niveau subjectif de courbure augmente avec la flèche et il couvre tout l'extension de l'échelle psychophysique ; une fonction linéaire décrit la relation entre les deux variables.

La combinaison des arcs d'ellipses horizontales et verticales (**modèle 4**) génère, pour l'observateur BM, des niveaux subjectifs de courbure qui produisent une fonction en forme de U tant pour l'augmentation de la rapport d'aspect [Tab.6e] que de la flèche [Tab.6f], un résultat très différent des

résultats obtenus pour tous les autres observateurs avec ce modèle géométrique.



**Tab. 6e** Observateur BM : les arcs du modèle 4 produisent une variation de la sensation de courbure en fonction du rapport d'aspect qui décrit une courbe à forme de « U » (augmentation et diminution, avec un max pour le rapport d'aspect autour de 0.5).



**Tab. 6 f** Observateur BM : les arcs du modèle 4 produisent une variation de la sensation de courbure en fonction de la flèche qui décrit une courbe à forme de « U ».

La fonction qui décrit le mieux la relation entre les niveaux subjectifs de courbure de l'observateur BM et la rapport d'aspect des arcs du modèle 4 est une fonction logarithmique à trois paramètres avec adaptation normale [Tab.6e] et la fonction qui décrit le mieux la relation entre niveaux subjectifs et flèche est une fonction logarithmique à deux paramètres avec adaptation normale [Tab. 6f]. A la lumière de ces données il apparaît très clairement que la courbe la plus « forte » en termes de courbure est, pour l'observateur BM, l'arc de cercle, indépendamment de la dimension de la flèche et de la corde.

Pour tous les autres observateurs la sensation de courbure plus « forte » est celle suscitée par une ellipse verticale très étroite.

### 3d. La perception de la courbure 2d et la loi de Stevens

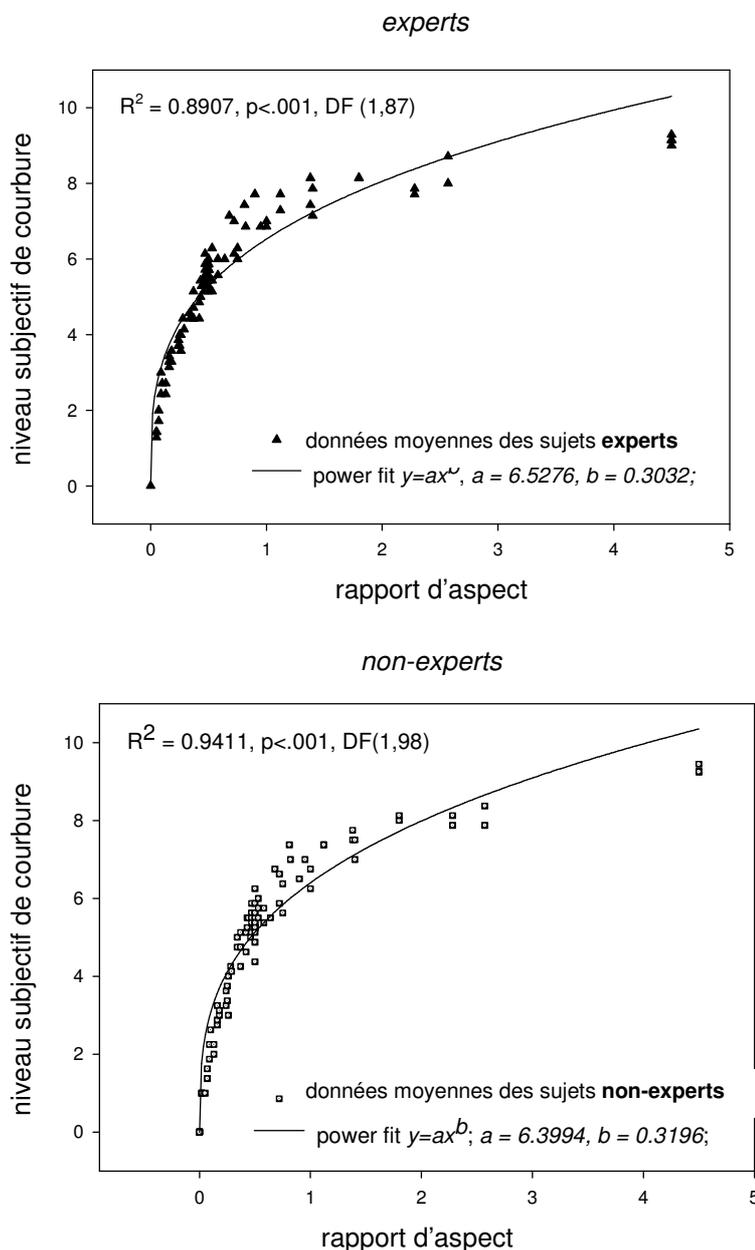
Dans les données de notre expérience on a vérifié que une seule lois psychophysique est capable de prédire la courbure perçue dans des contours bidimensionnels pour des sujets experts et non experts, sauf un [SIL07]. Cette loi est la rapport d'aspect, est significativement fournie par une fonction exponentielle, la *Lois de Stevens*, une des lois fondamentales de la psychophysique, largement utilisée dans plusieurs domaines (la psycho acoustique, l'esthétique, la médecine, par exemple) comme lois de référence pour étudier les représentations mentales des sons, des odeurs, des goûts, le plaisir, la douleur, etc. L'intérêt de cette lois réside dans le fait qu'elle est capable de prédire les sensations perçues (et donc les représentations mentales relatives) des sons, odeurs, etc., en partant de leur caractéristiques physiques les plus élémentaires.

Loi de Stevens :

$$R = a S^b$$

R = réponse au stimulus  
S = dimension physique du stimulus

a, b = constantes



Tab. 7a et 7b Une fonction exponentielle est capable de prédire fidèlement la variation de la courbure perçue pour tous les sujets, experts (en haut) et les non-experts (en bas), sauf un.

## II.1/ 4 DISCUSSION

Les résultats de cette étude fournissent de nouvelles connaissances sur les processus perceptifs qui génèrent des représentations formelles 3d sur la base des propriétés figuratives d'arcs bidimensionnels, comme par exemple dans les images de la Figure 19. D'abord, ces résultats clarifient l'importance des indices géométriques locaux dans la représentation perceptive des qualités formelles globales, comme la courbure perçue. Si on considère une simple vue 2d d'une courbe isolée, l'importance du rôle des indices géométriques locaux dans la perception des formes peut n'être pas assez évident. Mais, quand deux courbes parallèles à courbure variable sont combinées, cela devient évident, comme dans la figure 20, qui illustre comment la force de la perception formelle globale, ou sensation de forme, peut augmenter avec la flèche ou les rapports d'aspect locaux. Dans nos données, tant le rapport d'aspect que la flèche représentent bien la sensation globale de forme en termes de niveaux de courbure perçue. Le rapport d'aspect, en particulier, a montré être l'indice de prévision le plus fiable.

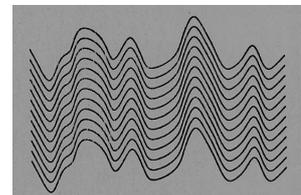
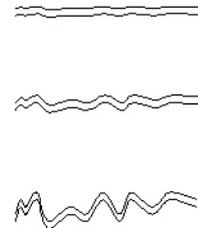
### 4a. Indices géométriques locaux et indépendance de l'échelle

L'analyse visuelle rapide de petits segments courbes, présentés pour un temps relativement court, implique un mode d'élaboration discrète [FER86] [WAT87], alors que la sensibilité visuelle augmente avec la durée de présentation du stimulus. Un mode d'élaboration discret et rapide privilège l'utilisation de l'indice disponible le plus immédiat, la flèche, qui en fait fournit une mesure strictement locale de la hauteur relative dans le champ visuel d'un point précis d'une courbe donnée, son sommet. En fait, dans des conditions où les stimuli sont plus petits qu'un degré d'angle visuel et la durée de l'exposition inférieure à une seconde, la flèche a fourni un meilleur rendu que le rapport d'aspect pour la variance observé dans les seuils de discrimination [FOS93] [FOS02]. Au contraire, d'autres études basées sur les seuils, avec des courbes d'une largeur bien plus importante (jusqu' à 4.2 degrés de l'angle visuel) ont produit des résultats selon lesquels le rapport d'aspect semble fournir le meilleur indice [WHI98]. Il apparaît que dans le cas des stimuli de dimension plus importante et/ou d'une durée de l'exposition plus longue, une analyse de la courbure plus globale et continue soit privilégiée [FER86] [WAT87]. Une telle analyse globale pourrait impliquer une élaboration des propriétés formelles basée sur un indice plus intégré et probablement indépendant de l'échelle : la rapport d'aspect. La rapport d'aspect transmet un' information sur la surface totale couverte par la courbe et donc il semble être l'indice idéal pour la perception des propriétés formelles globales. Les résultats obtenus dans notre étude, avec des stimuli relativement longs et une durée d'exposition non limité, supportent une telle interprétation.

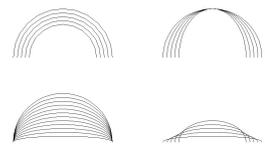
Si le rapport d'aspect rend compte avec fiabilité, et indépendamment de l'échelle, des représentations perceptives de la courbure, la caractérisation par la flèche est elle, au contraire, dépendante de la dimension de la corde des courbes. Pour des cordes d'une longueur entre 1 et 6 degrés de l'angle visuel, la variation de la flèche ne présente pas de correspondance significative avec la variation du niveau de courbure perçue, au contraire pour des cordes d'une longueur entre 7 et 10 degrés, la flèche devient un indice aussi fiable que le rapport d'aspect. Au niveau formel, ces courbes peuvent être approximés par des arcs de cercle, car elles présentent une courbure locale assez uniforme. Il semblerait que, pour approximer des courbes uniformes un seul indice suffirait, alors que dans le cas de formes moins régulières, un indice supplémentaire est nécessaire pour une évaluation suffisamment soignée. Des tels résultats supportent l'hypothèse d'une tendance en faveur de la flèche pour les jugements immédiats et les



**Fig. 19** La courbure des lignes bidimensionnelles est un indice puissant pour générer des représentations formelles 3d. B. Riley, *Fragment n.5* (1965)



**Fig. 20** La sensation de tridimensionnalité est très évidente quand plusieurs courbes sont rapprochées. De plus, à l'augmenter des flèches ou des rapports d'aspect locaux, la tridimensionnalité apparente devient plus marquée.



**Fig. 21** arcs avec des cordes entre 7° et 10° de l'angle visuel.

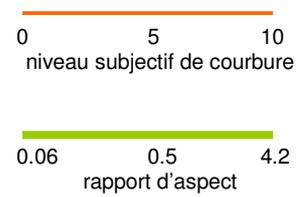
formes plus petites [FOS93] et une tendance en faveur du rapport d'aspect pour les formes de grandeur moyenne.

L'évaluation des grandeurs de cette étude révèle un aspect fonctionnel important dans les élaborations perceptives qui génèrent des représentations formelles comme la courbure: l'indépendance d'échelle. Par exemple, bien que les arcs circulaires du notre modèle structurel 1 aient des dimensions différentes et flèche variable, ils ont tous le même rapport d'aspect et ils produisent tous des niveaux de courbure identiques. Le rapport d'aspect, en étant une mesure adimensionnelle, est invariant vis-à-vis de l'échelle et en fait il ne donne pas des informations sur les dimensions absolues des courbes mais sur le rapport entre ses parties. Du plus, le pouvoir informatif du rapport d'aspect s'est démontré indépendante de la dimension des cordes des courbes, à différence de la flèche. Le système perceptif humain présente une tendance générale à privilégier l'utilisation des représentations invariantes vis-à-vis de l'échelle et une telle préférence peut être déjà présente aux niveaux précoces de l'élaboration visuelle, comme le suggèrent en fait les mesures des seuils dans certaines expériences sur la discrimination des courbes [WHI98].

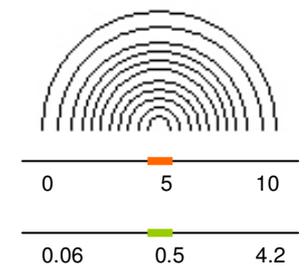
*4b. Quel modèle géométrique répond-t-il mieux à la perception de la courbure pour des contours linéaires bidimensionnels?*

Notre model géométrique 1 [Fig.22a], la famille d'arcs de cercle, produit un niveau de sensation de courbure constante pour tous les observateurs testés. Plusieurs courbes de ce modèle approchées proposent une configuration formelle qui ne suggère pas forcément des propriétés spatiales tridimensionnelles, à la différence des autres trois modèles considérés. Dans ces modèles, le rapprochement de plusieurs courbes propose des configurations formelles qui suggèrent immédiatement des propriétés spatiales qui peuvent être retrouvés dans des objets 3d du monde physique (voir figures dans le paragraphe II.1/1). Ce ne sont que ces derniers trois modèles qui ont produit des variations dans le niveau subjectif de courbure cohérentes avec la variation de l'indice rapport d'aspect, de la part de tous les observateurs, experts ou non, sauf l'observateur BM. Les courbes du modèle 2 [Fig.22b], des arcs d'ellipse à dominante verticale, produisent une variation des niveaux subjectifs de courbure directement proportionnelle à la variation du rapport d'aspect. Cette variation ne couvre que la partie supérieure de l'échelle psychophysique, en cohérence avec la variation du rapport d'aspect des arcs de ce modèle, qui ne prend en compte que les valeurs le plus importantes parmi les valeurs considérées. Les courbes du modèle 3 [Fig.22c], des arcs d'ellipses à dominante horizontale, produisent une augmentation subjective de la courbure exclusivement dans la partie inférieure de l'échelle psychophysique, en cohérence avec la variation du rapport d'aspect, qui, elle aussi, ne concerne pour ce modèle que les valeurs les plus basses parmi les valeurs considérées. Les meilleures fonctions psychométriques, avec des variations dans la sensation subjective qui couvrent toute l'étendue de l'échelle psychophysique utilisé, sont les courbes du modèle 4 [Fig.22d]. Si on représente les arcs du modèle 4 superposés entre eux, on obtient une figure qui rappelle un maillage irrégulier et qui suggère fortement des propriétés tridimensionnelles d'un objet réel 3d. On peut conclure que les représentations perceptives des formes 2D, objets de notre étude avec des mesures de perception de la courbure, ont leur origine dans une relation statistique entre les propriétés des images 2D des arcs du modèle 4 et leurs contre parties tridimensionnelles dans les objets réels.

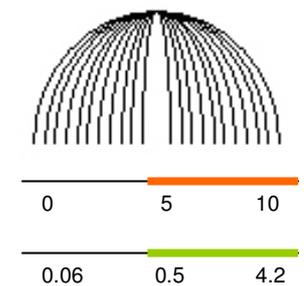
**Fig.22** Schéma de la variation du niveau subjectif de courbure et du rapport d'aspect pour les quatre modèles géométriques.



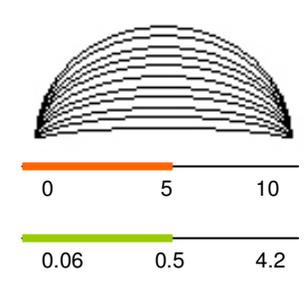
**Fig.22a** Modèle 1



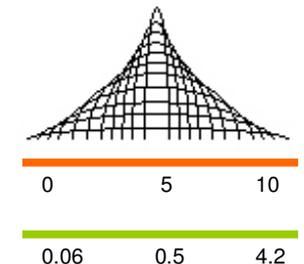
**Fig.22b** Modèle 2



**Fig.22c** Modèle 3



**Fig.22d** Modèle 4



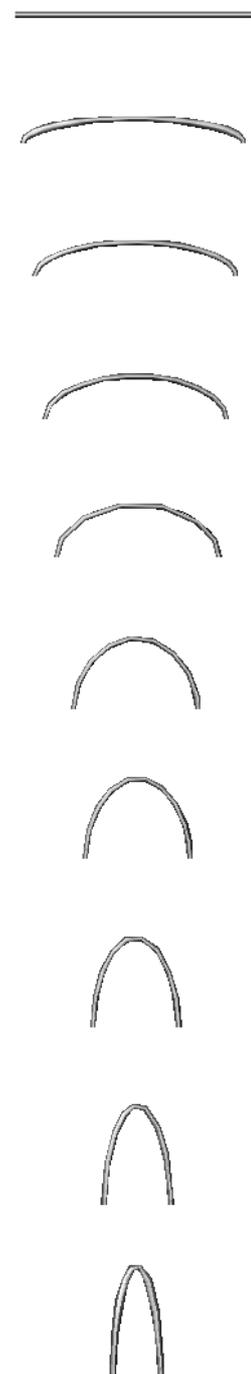
#### 4c. Un "modèle de la barre pliée" pour les représentations mentales des objets courbes?

Les résultats psychophysiques obtenus dans notre expérience peuvent être expliqués par la présence d'un modèle "naturel" qui permet d'établir un parallèle entre les caractéristiques des nos stimuli et une possible source physique dans le monde réel 3d [HOW05]. Nous proposons une comparaison des représentations internes de la courbure révélées par les données de notre expérience avec une source physique externe qui consiste dans une action apprise sur un objet réel: le pliage d'une barre [Fig.23].

Dans notre expérience, nous avons obtenu les meilleures fonctions psychométriques à partir des données du modèle structural 4: si on dispose les courbes de ce modèle dans une séquence ordonnée, en commençant avec la courbe caractérisée par le rapport d'aspect et par la flèche les plus petites pour finir avec la courbe caractérisée par le rapport d'aspect et par la flèche les plus grandes, on peut comparer la séquence obtenue aux différentes configurations assumées par une barre horizontale qui est progressivement fléchie, ou pliée. Même si les observateurs n'ont jamais vu une telle séquence dans l'expérience (les courbes ont été présentées en ordre aléatoire en choisissant parmi tous les modèles), les représentations internes qui correspondent à cette action ont été apprises et réactivées dans plusieurs situations différents, actives ou passives depuis notre enfance. A la lumière de ces considérations il n'est pas surprenant que cette référence « naturelle » pour la variation de la courbure 2d soit apte à fournir un bon modèle pour les représentations structurelles ou morphologiques à l'origine des sensations de 15 des 16 observateurs testés dans l'expérience. La ligne droite au début de la série ne produit aucune sensation de courbure, la dernière ligne courbe à la fin de la série produit un niveau maximal de courbure pour la plupart des observateurs.

#### 4d. Caractéristiques formelles 2d et apprentissage perceptif

La plupart des observateurs testés (15 sur 16) dans notre expérience semblent utiliser automatiquement et fidèlement une représentation interne de la courbure qui montre des liens avec l'action matérielle de « rendre courbe », une opération que nous apprenons spontanément à exécuter à partir de la petite enfance. Un seul sujet, l'observateur BM, semble fonder sa sensation de courbure sur un modèle assez différent: dans ses données, le modèle 3 (ellipses à axe majeure horizontale) produit une augmentation de la sensation de courbure, en correspondance avec l'augmentation de la flèche et du rapport d'aspect, en couvrant toute l'extension de l'échelle psychophysique. Pour ce modèle, l'augmentation de la sensation de courbure en fonction de l'augmentation du rapport d'aspect est bien représentée par une fonction exponentielle; l'augmentation en fonction de la flèche est bien représentée par une fonction linéaire. Si on considère les résultats de l'observateur BM, ni le rapport d'aspect ni la flèche ne semblent produire un indice valable pour la sensation de courbure perçue, car on n'a trouvé aucune fonction qui corresponde aux données de cet observateur, alors que pour tous les autres sujets elles ont produit des modèles prédictifs parfaitement satisfaisantes. Par contre, si on conduit une analyse en fonction de la longueur des cordes des courbes, on découvre que les indices flèche et rapport d'aspect peuvent prédire fidèlement les performances de l'observateur BM dans le cas des courbes avec les cordes les plus longues. Ses résultats révèlent donc une dépendance entre les indices flèche et corde, de la même façon que pour tous les autres sujets, mais en plus ils présentent aussi une dépendance de cette nature entre rapport d'aspect et corde. Ceci est un résultat curieux car pour tous les autres observateurs, experts ou non, le rapport d'aspect apparaît comme un indice fiable de la sensation de courbure perçue. Evidemment, l'observateur BM utilise, pour sa représentation interne de la courbure, un



**Fig.23** Le "modèle de la barre pliée" : nous supposons que le modèle géométrique qui structure l'élaboration perceptive de la qualité formelle de courbure peut être issu d'un parallèle avec l'action réelle de plier une barre. Plus courbe signifierait dans ce cas plus « courbé ».

modèle qui est radicalement différent du modèle utilisé par tous les autres. A la lumière des données il apparaît que la courbe qui donne la sensation de courbure la plus forte, pour l'observateur BM, est celle qui a une courbure constante, l'arc de cercle, indépendamment des valeurs des indices flèche et rapport d'aspect [Fig. 24]. Pour tous les autres observateurs, la courbe perçue comme ayant la courbure la plus forte, ou comme étant « la plus courbe », est celle qui correspond à une ellipse étroite à axe majeur vertical et la sensation de courbure perçue diminue en fonction de la décroissance de la valeur de la flèche et du rapport d'aspect. Au contraire, pour l'observateur BM, la courbure perçue diminue pour les courbes qui s'approchent de cette ellipse verticale très étroite. Ces résultats suggèrent qu'une expertise perceptive spécifique, qui est essentiellement un processus d'apprentissage, peut transformer les représentations mentales plus « naturelles » ou plus « spontanées » des formes courbes dans des représentations spécifiques, qui exploitent la géométrie bidimensionnelle d'une façon différente, plus analytique. Sinha et Poggio [SIN86] ont montré que le système visuel adulte est capable d'apprendre des nouvelles associations entre des figures 2d et des projections 3d cohérentes et que la structuration de la perception même repose sur des telles associations apprises : on sait par exemple qu'un cube vue de côté est un carré, ce qui nous permet, quand on perçoit un carré, de savoir qu'il *peut* être (parmi les autres hypothèses) un cube vue de côté, sans besoin d'informations ultérieures. Les données de l'observateur BM peuvent être expliquées par un tel genre d'association spécifique, apprise à travers l'étude et surtout la manipulation des concepts de la géométrie analytique de niveau supérieur.

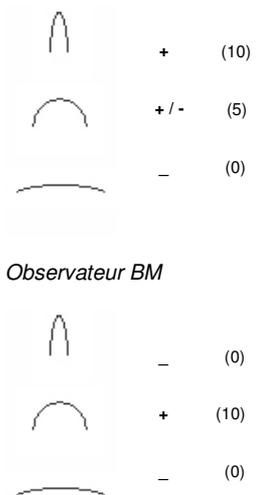
#### 4f. Représentation mentale de la courbure 2d et architecture à forme libre

Les résultats de cette étude se révèlent intéressants dans le domaine de l'architecture Non-Standard en raison de l'éclairage qu'ils peuvent donner sur deux questions fondamentales :

a. La première concerne le fait, comme on a vu et expliqué en proposant le modèle de la barre pliée, que la courbure semble mettre en place, pour sa perception, des modalités d'élaboration perceptive très archaïques, et que les stimuli de courbure sont élaborés par notre système visuel à travers les mécanismes les plus précoces dont nous disposons (les mécanismes dénommés par James J. Gibson "écologiques" [GIB66]). On peut supposer donc que les espaces courbes seront lus selon ce même genre de mécanismes. Une confirmation supplémentaire pour cette hypothèse se situe dans la correspondance entre les coefficients des fonctions dans nos résultats et ceux de la loi de Stevens, une loi psychophysique qui concerne les mécanismes les plus élémentaires de perception de la réalité (goût, odorat, etc.). L'élaboration perceptive de la qualité formelle de courbure pourrait reposer elle aussi sur les mêmes mécanismes élémentaires et probablement universels.

2. La deuxième question surgit des résultats de l'observateur BM et de leur signification pour ce qui concerne les expériences perceptives apprises. Ces résultats peuvent démontrer que, même si la perception spontanée de la courbure repose sur les mécanismes spontanés et « écologiques » dont on a parlé, des expériences apprises (ou, peut être, l'"objectif" spécifique qui est à la base de chaque processus d'élaboration visuelle) peuvent profondément changer notre façon de percevoir et donc de se représenter intérieurement tous les objets, à partir des plus simples. Un tel constat ne doit pas être oublié quand on s'intéresse aux processus multidisciplinaires centrés sur la collaboration entre individus avec des expertises spécifiques (comme c'est le cas dans la conception de l'architecture Non-Standard).

#### Experts et non-experts



**Fig. 24** La sensation globale de courbure pour les experts et les non-experts suit le même modèle structural : la courbure la plus « forte » est celle d'une étroite ellipse verticale ; pour l'observateur BM le modèle est différent : la courbure la plus « forte » est celle qui est moyenne et constante, celle d'un arc de cercle.

II. 2

## FORMES COMPLEXES, APPRENTISSAGE ET OUTILS DE REPRESENTATION



## II.2/ 1 PRELIMINAIRES

### 1a. Technologies numériques et communication visuelle

La communication visuelle et donc l'apprentissage perceptif visuel sont en train de jouer un rôle de plus en plus important dans un monde contemporain sous l'emprise du numérique. Les technologies des images de synthèse et les dispositifs de réalité virtuelle ont pris la place des précédents outils d'échange d'informations, basés sur l'écriture et la parole, dans plusieurs domaines comme l'éducation, la santé ou la navigation [KAT06] [STE06]. Comme on l'a expliqué dans la Partie I, dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie et du design, l'emploi des outils numériques est devenu fondamental dans la pratique contemporaine ; en particulier, dans le cas de l'architecture *Non-Standard*, plusieurs critiques suggèrent que le « paradigme virtuel » est l'élément constitutif de ce courant [BOR07] [KOL03] [OXM06], qui est en fait souvent nommé *Digital Architecture* (en français, architecture digitale). N'importe quel processus de conception d'objets dans l'espace physique 3d repose sur la capacité des concepteurs à manipuler efficacement les représentations mentales de ce même espace 3d, à travers des outils de modélisation et représentation qui sont essentiellement visuels, comme le dessin ou les maquettes. Dans l'architecture *Non-Standard*, les outils numériques ont pris une place dominante parmi les moyens de représentation, d'apprentissage et de communication des qualités spatiales 3d, à travers des nouvelles formes d'interaction entre les êtres humains et les environnements numériques. Les logiciels de modélisation et animation 3d (Rhino, Catia, 3d Studio, etc.) utilisés couramment dans la conception en architecture et ingénierie permettent, par exemple, de créer des environnements virtuels capables de reproduire fidèlement plusieurs caractéristiques formelles mais aussi logiques et procédurales, du monde physique 3d. Au niveau formel, la grande opportunité fournie par les outils virtuels est celle de permettre la modélisation et donc la visualisation de formes géométriquement très complexes, qui seraient presque impossible à dessiner à la main dans des temps raisonnables pour le déroulement d'un processus de conception. De plus, avec ce genre d'outils, la manipulation immédiate des formes modélisées est possible en agissant directement sur des paramètres purement formels pouvant oublier complètement les questions analytiques, qui restent gérées « sans transparence » par les algorithmes qui caractérisent les différents logiciels. Dans ce contexte, il est clair que l'élaboration visuelle des informations fournies sur l'écran 2d, qui sont les seules informations disponibles au niveau immédiat, est déterminante dans l'interaction de l'homme avec les environnements virtuels.

A ce jour, on a une connaissance très limitée des processus perceptifs visuels à travers lesquels les données virtuelles peuvent guider l'élaboration des informations, par rapport aux données réelles, en particulier pour ce qui concerne la gestion des qualités spatiales des objets à forme complexe. Des études sur les programmes de formation et d'acquisition de compétence dans l'entraînement chirurgical, par exemple, ont montré que l'apprentissage et la pratique de la chirurgie « minimalement invasive » à travers des outils d'imagerie numérique améliore notablement les capacités techniques des chirurgiens, en permettant une transmission de compétences plus rapide et généralisée par rapport aux méthodes d'entraînement dans le monde réel [GAL05]. Par rapport à la capacité potentielle de transmission des informations visuelles, on peut parler de la réalité virtuelle en termes de « réalité augmentée ». Le terme « augmentée » fait référence au fait que la réalité virtuelle est capable de reproduire des environnements perceptifs visuels enrichis, libres des contraintes à la quantité d'information disponible présentes dans le monde réel, qui est limité par l'espace et le temps effectifs de la réalité physique [DAR96]. Des études expérimentales sur les processus

cognitifs d'apprentissage et de mémoire [MAT07] ont montré que l'apprentissage peut avancer plus vite grâce aux images 3d virtuelles qu'au moyen travers d'objets réels, qui sont limités par la contrainte d'une observation partielle, dans l'espace et dans le temps. Pour un intervalle limité de temps, les outils virtuels permettent en fait de générer un nombre plus important d'informations visuelles potentiellement significatives, par rapport aux objets réels et aux outils analogiques, comme peuvent l'être un dessin ou une maquette dans la conception architecturale [BOR07]. Un exemple de contrainte, dans ce cas, peut être celui de l'échelle : un dessin ou une maquette ne donnent que des informations « visibles » à une échelle choisie ; pour représenter ou transmettre des informations plus (ou moins) détaillées il est nécessaire de réaliser un nouveau dessin ou une nouvelle maquette. Au contraire, un modèle numérique permet de gérer rapidement et en même temps des informations à des échelles différentes, et, ce qui est très important, ces informations sont effectivement contenues dans le modèle virtuel, ce qui signifie qu'elle ne doivent pas être modélisées de nouveau en entier, comme dans le cas d'un dessin, si un changement partiel se rends nécessaire. On a déjà observé, par exemple dans le cas de la courbure, que la géométrie d'un modèle virtuel semble capable de fournir les informations visuelles essentielles pour la compréhension spatiale d'un objet, aussi bien pour des experts que pour des novices [DRE07]. De plus, l'appréhension au moyen d'objets réels semble mettre plus à contribution et solliciter plus directement l'expérience et les connaissances préalables des individus, ce qui n'est pas toujours positif, spécialement dans des domaines créatifs comme la conception spatiale.

Afin de comprendre la façon dont le système perceptif humain élabore la structure spatiale visuelle des objets, un certain nombre d'études expérimentales ont comparé la précision et la vitesse avec lesquelles des observateurs humains reconnaissent des aspects locaux des formes tridimensionnelles, en relation avec des conditions de présentation différentes ou avec différentes informations disponibles [NOR04]. Dans ce contexte, notre expérience concerne le rôle des descripteurs perceptifs à base géométrique pour des objets abstraits, explorés réellement ou virtuellement par des observateurs, qui n'ont jamais vu ces objets précédemment, et qui présentent différents niveaux d'expertise en géométrie et en formes complexes.

### *1b. Apprentissage perceptif visuel : les opérations d'appariement*

L'apprentissage perceptif de nouvelles informations visuelles sur les qualités spatiales peut être approché en partant d'un ensemble de concepts issus du domaine de l'Intelligence Artificielle<sup>1</sup>, et en particulier de l'apprentissage des machines<sup>2</sup> et de l'acquisition de compétences par des agents<sup>3</sup>, comment le concept d'*appariement de représentations (representation matching)* [CAR91] [WHI91] ou celui des « mondes partiellement observables » [SIN96a]. On considère qu'un agent, homme ou machine, est capable de

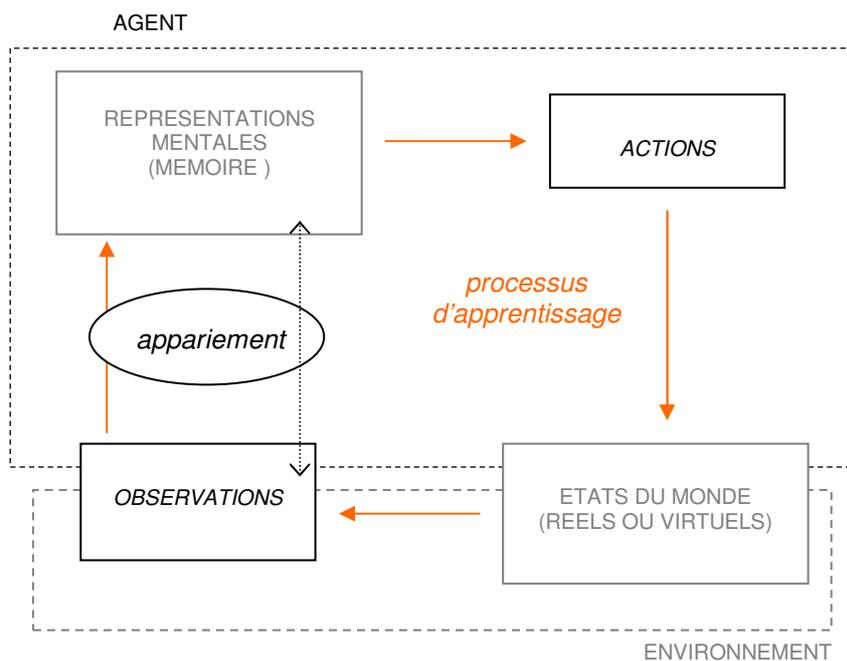
---

<sup>1</sup> L' *Intelligence Artificielle* (appelée aussi Intelligence Computationnelle) peut être définie comme l'étude et la conception d'agents intelligents (ou agents rationnels) ; un agent intelligent est un système qui perçoit son environnement et qui entreprends des actions pour maximiser ses chances de réussite. Plus en général, elle est souvent décrite comme une science et un ensemble de technologies (principalement liés à l'ingénierie) finalisées à la création de machines intelligentes. Ce domaine est la conséquence du constat que la caractéristique centrale des êtres humains, l'intelligence, peut être décrite avec une telle précision qu'elle peut être reproduite par une machine.

<sup>2</sup> L'*apprentissage des machines* est un concept, issue du domaine de l'Intelligence Artificielle, qui peut être défini de façon générale comme la capacité d'identifier des patterns, ou des régularités, dans un flux d'information ; dans le cadre de notre étude, nous considérons en particulier une forme d'apprentissage défini « supervisé », qui comprends, par exemple, les opérations de *classification*, qui est la capacité de déterminer à quelle catégorie appartient un certain objet, après avoir observé un certain nombre d'exemples appartenant à différentes catégories.

<sup>3</sup> Un *agent* (ou agent intelligent) est défini comme un système qui perçoit son environnement et qui entreprends des actions pour maximiser ses chances de réussite.

communiquer avec et d'apprendre d'après son environnement, que ceci soit virtuel ou réel, sur la base d'actions perceptives non verbales [Fig.1]. Une action perceptive décrit une opération formelle ou mentale à travers laquelle des états du monde réel ou virtuel (stockés dans la mémoire à sous la forme de représentations mentales) sont mis en correspondance, ou appariés, avec des observations de ce même monde. Par exemple, la reconnaissance des objets peut être expliquée par une opération d'appariement de ce qu'on voit avec la correspondante représentation mentale déjà présente dans notre mémoire. Les opérations d'appariement sont habituellement liées à des actions : déplacer le curseur sur l'écran d'un ordinateur dans une situation de réalité virtuelle, tirer la poignée pour ouvrir un tiroir dans une situation du monde réel. Dans le cadre de notre étude, deux opérations d'appariement sont concernées : l'appariement biunivoque et l'appariement multivoque [WHI91].



**Fig. 1** Action perceptive, opération d'appariement et apprentissage : un agent peut communiquer avec son environnement, virtuel ou réel, à travers des opérations mentales exclusivement visuelles. Dans ce genre d'opérations, dites *opérations d'appariement*, des observations sont mises en relation avec des représentations mentales archivées dans la mémoire. Ce processus d'apprentissage permet l'action dans des états du monde physique en constant changement, dans lesquels un grand nombre d'informations doivent être traitées de façon rapide en réaction à l'évolution de l'état de ce monde.

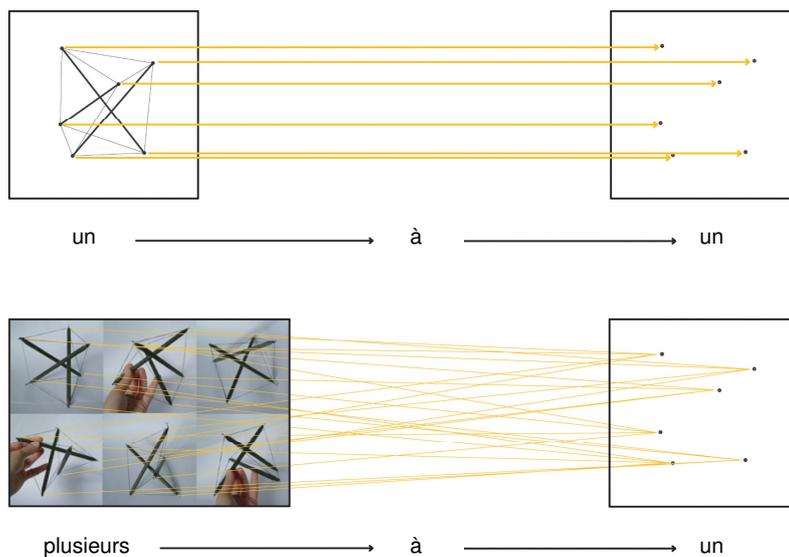
#### *Appariement biunivoque*

Dans l'opération d'*appariement biunivoque* [Fig.2], une observation unique est mise en correspondance avec un et un seul état du monde physique. Dans le contexte du monde réel, une opération d'appariement biunivoque peut être celle de faire correspondre la façade d'un bâtiment observé dans une promenade en ville à l'image du même bâtiment présentée dans un guide touristique, par exemple. Dans un contexte de réalité virtuelle, on retrouve la même opération, par exemple, dans la situation de faire correspondre le couloir d'un modèle 3d d'un bâtiment au seul couloir connu en raison de l'expérience antérieure. Une telle opération d'appariement peut être ensuite suivie par l'action d'entrer dans ce même couloir. Dans le cas de l'*appariement biunivoque par catégorie*, un agent (homme ou machine) utilise, pour accomplir l'opération de mise en correspondance, un seul critère, comme par exemple la couleur du couloir représenté sur l'écran, ou plusieurs critères, comme la couleur et les dimensions (hauteur, largeur, longueur).

#### *Appariement multivoque*

Dans l'opération d'*appariement multivoque* [Fig. 2], plusieurs observations sont mises en correspondance avec un et un seul état du monde physique. Dans le contexte du monde réel, une opération de *appariement multivoque*

peut être celle d'un expert d'art qui reconnaît, par exemple au milieu d'un ensemble de pièces dans une enchère, plusieurs œuvres comme produites par le même artiste. Dans le cas d'un contexte de réalité virtuelle, la même opération serait utilisée par l'expert en partant des représentations des œuvres dans une galerie virtuelle. Les critères pour une opération d'appariement multivoque peuvent être multiples (le thème préféré de l'artiste + la technique utilisée + le style + la période estimée, par exemple) ou singulières, comme dans le cas d'un appariement basé sur le seul critère du thème préféré de l'artiste. La mise en correspondance efficace de plusieurs observations avec un seul et unique état du monde requiert la connaissance (c'est à dire une expertise) de certains critères, afin de pouvoir créer des rapprochements possibles.



**Fig. 2** Opérations d'appariement :  
 1. *appariement biunivoque* (un à un) : une observation unique est mise en correspondance avec un et un seul état du monde physique  
 2. *appariement multivoque* (plusieurs à un) : plusieurs observations sont mises en correspondance avec un et un seul état du monde physique.

Nous considérons que des opérations de correspondance de ce genre forment la base des processus de haut niveau d'apprentissage perceptif, à travers lesquels la connaissance sur la configuration spatiale d'objets visuels complexes inconnus devient accessible dans la cognition humaine. Le critère pour accomplir des opérations d'appariement entre des états du monde physique représentés dans la mémoire de travail et des nouvelles observations (dans le domaine des sciences cognitives appelé *critère d'apprentissage perceptif*) correspond à ce que les chercheurs du domaine de l'apprentissage des machines ont défini comme *traces d'éligibilité* [SIN96a]. Les traces d'éligibilité sont des données de la mémoire de travail qui présentent une valeur spécifique au niveau heuristique ou diagnostique, sous la forme de représentations d'évènements (simples ou complexes), transformations ou actions. Les traces d'éligibilité pour les opérations de mémoire de travail dans l'apprentissage perceptif d'un objet visuel totalement inconnu et abstrait sont forcément des traces figuratives et formelles, car ce sont les seules informations disponibles. Au contraire, dans le cas d'objets familiers, dont on connaît, par exemple, le nom ou l'usage, des traces de nature multiple, pas exclusivement formelle, peuvent être utilisées.

### 1c. Observation et exploration à travers la vision et le toucher

Ils existent des facteurs formels et géométriques plus importants que d'autres pour la construction efficace de la représentation mentale d'un objet ou d'une structure spatiale. Par exemple, il a été démontré que la symétrie

est un facteur important dans l'élaboration visuo-spatiale d'objets virtuels observés sur un écran. Une seule vue virtuelle significative peut suffire à reconnaître un objet visuel, qui est ensuite présenté d'un point de vue différent, si l'objet présente une symétrie bilatérale. Dans ce cas, on sait que les observateurs humains sont capables d'associer des représentations d'autres vues à partir de la seule vue significative présentée, à travers des opérations de transformation symétrique [VET94].

Un facteur déterminant dans l'élaboration visuo-spatiale d'une structure semble être la modalité sensorielle à travers laquelle la structure est explorée. Les premières études sur ce sujet, comme celles de Gibson [GIB62] [GIB63] [GIB66], considéraient les explorations visuelle et tactile comme des moyens équivalents, dans la mesure où elles rendent accessible à l'observateur le même genre d'information. C'est à dire que l'exploration visuelle et tactile d'un objet inconnu ne fournirait pas plus d'information que la simple exploration visuelle. D'autres études plus récentes suggèrent une hypothèse différente, issue d'expériences de reconnaissance des formes, pendant lesquelles il a été découvert que les observateurs reconnaissent certaines formes/cibles, présentées au milieu d'autres formes, de façon significativement meilleure si la cible avait été explorée par la vue et le toucher plutôt que par la seule vue [NOR04]. L'élaboration des informations formelles pourrait donc être facilitée quand les observateurs sont capables non seulement de voir un objet mais aussi de le toucher et de le manipuler.

Dans la reconnaissance des objets, il a été vérifié que l'élaboration des informations spatiales est *dépendante du point de vue* pour des objets familiers : dans ce cas, la reconnaissance visuelle est meilleure quand les objets sont vus d'en face et la reconnaissance tactile est meilleure quand c'est l'arrière des objets qui est exploré manuellement [NEW01]. L'axe de rotation constitue l'un des facteurs critiques dans la détermination de la dépendance du point de vue dans le cas de l'exploration en modalité visuelle. Cette dépendance du point de vue est abolie par l'apprentissage perceptif (par exemple, la connaissance de la structure relationnelle entre l'objet réel 3d et plusieurs vues 2d de celui-ci), ou à travers l'interaction répétée avec des environnements virtuels [CHR99]. La reconnaissance visuo-tactile est indépendante du point de vue, même dans le cas d'objets peu familiers [LAC07], ce qui est cohérent avec l'idée que les représentations multimodales<sup>4</sup> des objets sont formées à travers des processus cognitifs complexes qui vont au delà de la simple perception.

Dessiner un objet de mémoire sollicite entièrement les processus décrits ci-dessus. Des études récentes ont montré que l'acte de dessiner est un moyen puissant pour accéder à, activer et consolider les représentations de la connaissance sur les propriétés des objets. Ces représentations sont archivées dans les structures de mémoire de l'hémisphère droit du cerveau, touchant les régions fonctionnelles les plus importantes pour l'apprentissage et la communication, comme la zone de Brodman [HAR06]. Dessiner efficacement de mémoire un objet inconnu, ou des parties de celui-ci, met en jeu des processus cognitifs d'ordre supérieur, liés à l'attention et à la mémoire de travail.

#### *1d. Attention et mémoire de travail visuo-spatiale*

Des limites bien définies de la capacité de l'attention et de la mémoire de travail ont été découvertes sur la base d'études sur la mémoire visuelle [OBE28] [MIL56] [PAR99] [VOG01]. Elles ont montré que n'importe quel adulte humain est capable d'atteindre un maximum moyen de sept (7 +/- 2) représentations et de le retenir dans sa mémoire de travail pour quelques minutes ou plus longtemps [POT93]. Les représentations stockées dans la mémoire de travail peuvent correspondre à des fragments visuels ou à des scènes visuelles entières, à des nombres uniques ou à des groupes de

---

<sup>4</sup> La perception multimodale est la perception issue de plusieurs modalités perceptives différentes, comme la vue, le toucher, l'audition.

nombres (en anglais appelés « chunks » ou « clusters »), comme dans un code, et enfin à des mots ou à des phrases entières. La structure de ces représentations dépend du système de mémorisation qui est sollicité par une certaine tâche et des stratégies d'élaboration des informations qui peuvent être activées en conséquence. En regardant l'architecture fonctionnelle de la mémoire de travail visuelle, comme on a expliqué dans le chapitre 1.3, il est communément admis que cette forme spéciale de mémoire implique un « *exécutif central* » et un « *calepin visuo-spatial* » [BAD03], tout comme le système de mémoire central. Les traces d'éligibilités géométriques, nécessaires pour accomplir les opérations d'appariement dans le cas des qualités spatiales d'un objet, sont construites dans le calepin visuo-spatial de la mémoire de travail.

### *1e. Effets de genre et facteurs culturels*

Des facteurs liés à l'éducation et à la culture peuvent influencer les stratégies cognitives à différents niveaux de l'élaboration des informations. De la même façon, des mesures de performance relatives à l'élaboration d'informations visuo-spatiales de la part de sujets de sexe masculin et féminin sur des tâches dans lesquelles il est demandé, par exemple, de retourner mentalement un objet, ou de le reconnaître après une rotation, ont montré un avantage masculin statistiquement significatif, notamment dans des tâches qui impliquent la rotation mentale d'images tridimensionnelles [VOY95] [CRU98]. D'autres études ont montré plus récemment que de telles différences de genre ne concernent pas les aptitudes visuo-spatiales dans leur généralité mais elles peuvent largement dépendre des conditions spécifiques de l'exercice proposé [SEU04]. Une étude relativement récente a montré aussi que dans le cas de sujets à haute performance, ou très compétentes [UNT00], les différences de genre dans l'élaboration visuo-spatiale ne sont pas significatives.

Des données sur la résolution des problèmes visuo-spatiaux, collectées dans un groupe isolé d'indigènes d'Amazonie [DEH06] fournissent une preuve d'un grand intérêt de l'hypothèse que certains concepts géométriques élémentaires constituent une connaissance basique et universelle, présente chez tous les adultes humains normalement développés, indépendamment du genre, de l'éducation ou du degré de scolarisation. Les concepts géométriques qui semblent être universels, car présents aussi dans les réponses des sujets non-scolarisés, sont des concepts qu'on pourrait définir « topologiques », comme les différences entre interne et externe ou proche et loin. Le rôle de l'apprentissage et donc l'influence des études ou de la formation professionnelle sur les concepts géométriques choisis dans l'élaboration perceptive et donc dans la construction de la représentation mentale fait encore objet à débat. La géométrie analyse, explore et décrit des relations spatiales. Elle constitue aussi un domaine spécifique de la mathématique et de la pensée spatiale abstraite, qui remonte loin dans l'histoire de la pensée humaine. Il est vraisemblable que l'analyse « géométrique » soit fortement associée à la perception et à la cognition de l'homme. Elle permet une meilleure compréhension de l'information issue de la perception et contribue à la cognition spatiale de l'environnement de l'homme.

### *1f. Elaboration visuo-spatiale d'une structure abstraite et inconnue*

En partant des concepts et des arguments qu'on vient d'introduire, nous avons conçu une expérience pour mettre en évidence les éléments qui aident des individus, intelligents et avec des expertises spécialisées différentes, dans le processus d'élaboration cognitive finalisé à la construction de la représentation mentale d'une structure spatiale visuelle qu'ils n'ont jamais vue auparavant. L'expérience propose une tâche qui concerne la mémoire de travail visuo-spatiale, dans laquelle les observateurs

doivent reproduire des parties d'une structure dans un cadre de référence 2d, en les dessinant de mémoire, tout de suite après l'avoir exploré. L'exploration est conduite en trois modalités différentes: 2d (image 2d unique), 3d virtuel (modèle numérique observé sur l'écran 2d de l'ordinateur), 3d réel (maquette).

Les questions principales qui sont soulevées dans cette expérience concernent :

**a.** L'équivalence de multiples vues bidimensionnelles (sur un écran) d'un objet virtuel 3d et de l'exploration d'un objet réel 3d chez une population d'experts avec des capacités visuo-spatiales particulièrement développées. Des études précédentes ont démontré que des observateurs experts sont plus efficaces dans l'exploration visuelle virtuelle que des novices [CHR99]. On peut donc s'attendre que des concepteurs experts, entraînés à la manipulation et à l'observation des modèles numériques, soient capables de mieux conduire l'analyse spatiale dans une condition virtuelle que des observateurs qui ne sont pas familiers des représentations virtuelles. A l'autre côté, des études ont montré que, dans le cas d'observateurs non experts, l'exploration multimodale active (observation et manipulation) de la structure d'un objet fournit un avantage pour l'élaboration des informations spatiales par comparaison avec la simple exploration visuelle [NOR04]. Est-ce que les observateurs experts, dotés de capacités visuelles fortement entraînées, bénéficient quand même d'un certain « avantage tactile » ?

**b.** La différence entre la quantité de ressources de la mémoire de travail employés dans différentes modalités d'exploration d'un même objet : exclusivement visuelle ou multimodale active (observation et manipulation)

Dans notre étude, les observateurs doivent représenter dans leur mémoire de travail une structure abstraite inconnue et dessiner certaines parties de celle-ci dans un cadre de référence 2d. Dans la condition d'exploration multimodale (visuelle et tactile) du modèle physique 3d réel, les traces d'éligibilité potentielles reconnues en trois dimensions doivent être transformées, dans le calepin visuo-spatial de la mémoire de travail, dans un croquis 2d, en relation au cadre de référence spatial 2d fournit pour dessiner la réponse. Le coût d'exécution qui requière cette opération pourrait limiter la généralisation de l'effet d' « avantage tactile », découvert par des études précédentes avec des stimuli moins abstraits [NOR04].

### 1g. Objet d'exploration : le « simplex »

Le simplex est la plus élémentaire des structures d'une famille caractérisée par sa complexité géométrique et mécanique: les *structures en état de tensegrité* [MOT03] [Fig.3]. La géométrie de ces structures est issue de la combinaison complexe d'éléments linéaires (des barres et des câbles), disposés dans l'espace selon des formes qui ne peuvent pas être directement associées à une seule forme élémentaire, mais qui sont le résultat d'opérations complexes de répétition, rotation, translation, symétrie, etc. Au niveau mécanique, leur comportement est basé sur le principe d'un réseau continu de câbles tendus, qui travaille en synergie avec des barres comprimées, qui ne se touchent jamais mais qui sont connectées exclusivement à ces câbles. La présence d'une tension active dans les câbles est à l'origine d'un état mécanique définit d'« autocontrainte », ce qui permet la résistance de la structure. Un tel état peut être obtenu exclusivement à travers certaines configurations géométriques spécifiques des barres et des câbles.

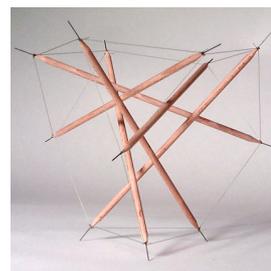


Fig. 3a Tétrahèdre tronqué

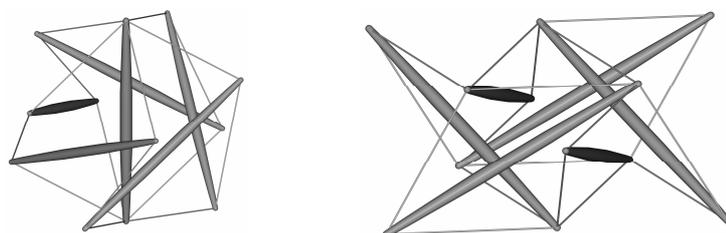


Fig. 3b (gauche) Spinning Icosahedron

Fig. 3c (droite) Stella Octangula

La géométrie et le comportement mécanique particulier des structures en état de tensegrité est à l'origine d'une évidente « contradiction perceptuelle » : les barres rigides ne se touchent jamais entre elles, car elles ne sont connectées que par le biais des câbles tendus, ce qui est en ouverte contradiction avec nos connaissances apprises sur les structures les plus communes du monde physique, basées sur le principe de la gravité, qui impose aux éléments comprimés d'être toujours en contact entre eux afin de transmettre les poids vers le sol. Dans les structures en état de tensegrité les éléments comprimés apparaissent comme flottant dans l'air, ce qui nous écarte des standards perceptifs qui nous sont familiers.

Fig. 3 Structures en état de tensegrité, caractérisées par une complexité géométrique ainsi que mécanique.

Le *simplex* [Fig. 4] peut être considéré la plus simple des structures en état de tensegrité ; il est constitué de trois barres rigides comprimées, connectées par un réseau continu de neuf câbles tendus et il est caractérisé par une composition spécifique à symétrie de rotation d'ordre 3 [SNE65]. Le simplex est donc un objet abstrait, issu d'un processus de conception, caractérisé par une géométrie complexe, qui ne peut pas être associée à une forme élémentaire unique, mais en même temps assez simple pour être aisément maîtrisé par la mémoire de travail qui, on a expliqué (voir chap. 1.3) a une capacité limitée de gestion de 7 (+ ou - 2) regroupements d'informations. Pour ces raisons nous avons choisi le simplex comme objet d'expérimentation afin d'obtenir des données sur la structuration perceptuelle des formes complexes en relation à l'outil employé pour leur représentation.

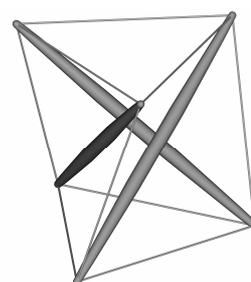


Fig.4 Le *simplex* : la plus simple des structures en état de tensegrité.

## II.2/ 2 EXPERIENCE

Notre deuxième expérience consiste dans une étude sur la mémoire de travail visuo-spatiale en relation aux outils de représentation et elle est menée sur deux populations d'observateurs : une population d'experts dans le domaine de la conception spatiale (architectes et ingénieurs) et une population de non experts. Chaque population est divisée en trois groupes, qui observent une structure spatiale complexe et abstraite (le simplex, qu'on a décrit précédemment), chacun dans une modalité de exploration différente : une représentation 2d, une maquette réelle, un modèle virtuel. Le simplex est proposé soit en monochrome soit en couleur. Après observation, le simplex est enlevé et les observateurs doivent dessiner de mémoire trois éléments de la structure à la main sur deux cadres de référence 2d contenant des informations sur l'organisation spatiale de l'objet.

### *2a. Observateurs*

Les observateurs qui ont participé à cette expérience sont 48 volontaires, choisis par rapport à leur motivation et à leur capacité de se concentrer sur un problème abstrait. Les observateurs appartiennent à deux populations différentes : des experts dans le domaine de la conception spatiale et des non-experts dans ce domaine, mais du même niveau d'études et avec les memes capacités intellectuelles.

Les 24 sujets **non-experts** sont 16 hommes et 8 femmes, adultes, ayant au moins un diplôme de maîtrise (en philosophie, science du langage ou biologie), de haut niveau dans leur spécialité et issus d'un contexte ethnique et culturel homogène. Pour les non-experts on a vérifié qu'ils ne soient pas utilisateurs habituels de jeux vidéo ou de logiciels de modélisation et visualisation 3d.

Les 24 sujets **experts** sont 22 hommes et 2 femmes, professionnels de la conception spatiale (architectes ou ingénieurs), tous ayant au moins un diplôme de maîtrise, de haut niveau dans leur spécialité et issus d'un contexte ethnique et culturel homogène. Tous les experts sont des utilisateurs habituels d'outils numériques de modélisation 3d (par exemple AUTOCAD, 3D STUDIO or CATIA), ayant au moins cinq ans d'expérience avec ce genre de logiciels.

Aucun des sujets (ni expert ni non-expert) ne connaissait le simplex avant cette expérience.

Six autres observateurs (**super-experts**), tous des hommes, ingénieurs spécialisés dans la conception de structures de tensegrité, dont le simplex est l'exemple le plus élémentaire, ont été testés afin d'obtenir des données sur les performances de sujets qui connaissent bien et qui manipulent couramment ce genre de structures, abstraites et complexes. Cinq sujets de ce dernier groupe ont une expérience d'au moins huit ans avec les outils virtuels de modélisation 3d et un sujet (TB) n'a aucune expérience avec ces outils.

## 2b. Matériels

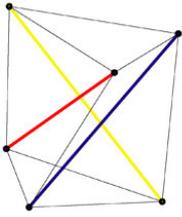


Fig. 5a Condition expérimentale vue 2d unique.

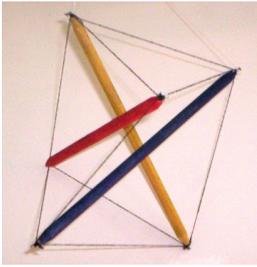


Fig. 5b Condition expérimentale 3d réel.

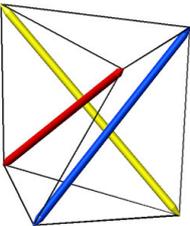


Fig. 5c Condition expérimentale 3d virtuel.

Trois différentes **modalités de représentation** du simplex (qui correspondent aux *trois conditions expérimentales*) sont proposées au sujets :

**2d** : [Fig. 5a] dans cette condition d'observation et exploration une seule **vue 2d** est proposée aux sujets sur une feuille de papier A4 ; cette vue correspond exactement à celle qu'on retrouve dans le cadre de référence de la feuille de réponse.

**3d réel** : [Fig. 5b] dans cette condition d'observation et exploration une **maquette réelle** est présentée aux sujets, qui peuvent l'explorer à travers l'observation et la manipulation (en modalité multimodale active). Les maquettes réelles sont constituées de trois baguettes en bois identiques (longueur 17 cm ; diamètre 0,5 cm), connectées par neuf câbles en fil synthétique (longueur 12 cm).

**3d virtuel** : [Fig. 5c] dans cette condition d'observation et exploration un **modèle virtuel** est présenté sur l'écran 2d d'un ordinateur ; les observateurs peuvent l'explorer librement en agissant sur la souris pour le faire tourner dans l'espace virtuel 3d et obtenir ainsi des images multiples sur l'écran 2d .

Le modèle utilisé a été créé avec *Autocad Architectural Desktop 2006* et pour son exploration les observateurs ont utilisé la commande « 3d orbite », qui permet de tourner et bouger librement l'objet dans toutes les directions de l'espace virtuel et obtenir ainsi un nombre infini de vues 2d sur l'écran.

Deux versions du simplex sont proposées dans chaque condition expérimentale : une en monochrome (barres et câbles noir) et une en couleur (câbles noirs ; barres rouge, jaune et bleu).

Les **feuilles de réponse** (papier en format A4) [Fig. 6] contiennent un **cadre de référence spatial** fournissant des informations sur la structure visuo-spatiale de l'objet : elles représentent certains éléments d'une vue 2d du simplex, la même qui est proposée dans la condition expérimentale 2d. Deux cadres de référence sont présentées de façon indépendante: l'une qui ne contient que des informations *positionnelles*, ou *ponctuelles* (les *nœuds* aux extrémités des barres) et l'autre qui contient aussi des informations *organisationnelles* sur les *liaisons* entre ces points (la position des câbles).

## 2c. Procédure

Les 24 observateurs experts et les 24 non-experts sont partagés en 6 groupes indépendants de 8 sujets (3 groupes pour chaque population). Dans chaque population, chaque groupe observe le simplex dans une seule des trois conditions expérimentales (*2d* ou *3d réel* ou *3d virtuel*) deux fois, une en version monochrome et une en version couleur. Pour éviter les possibles effets de sérialité, la moitié des sujets examinent la version en couleur en première et la monochrome en deuxième et vice-versa. En début de l'essai on explique aux sujets que ils devront dessiner des parties de l'objet de mémoire, sans leur préciser quelles parties. Après que les sujets aient observé et, éventuellement, manipulé le simplex sans aucune limite de temps, l'objet est enlevé et ils doivent dessiner de mémoire les trois barres à la main sur les feuilles de réponse dans deux cadres de référence différents, l'un avec des informations ponctuelles sur la position des *nœuds* et l'autre avec en plus des informations sur les *liaisons* entre les nœuds. Pour les feuilles de réponse, l'ordre de présentation entre informations ponctuelles et information sur les liaisons, est inversé afin d'éviter des effets de série.

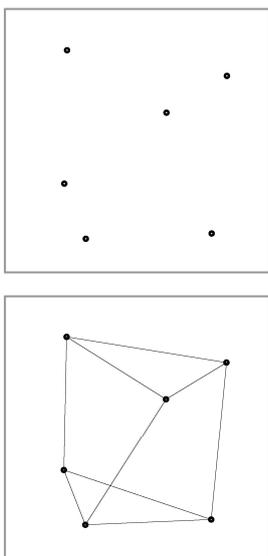
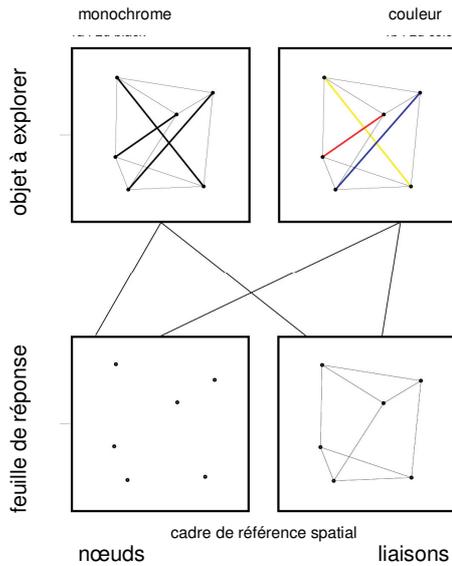
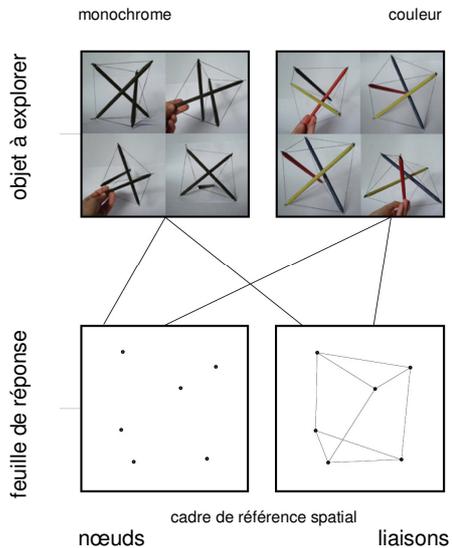


Fig. 6 Feuille de réponse : cadre de référence spatial *nœuds* (en haut) et *liaisons* (en bas).

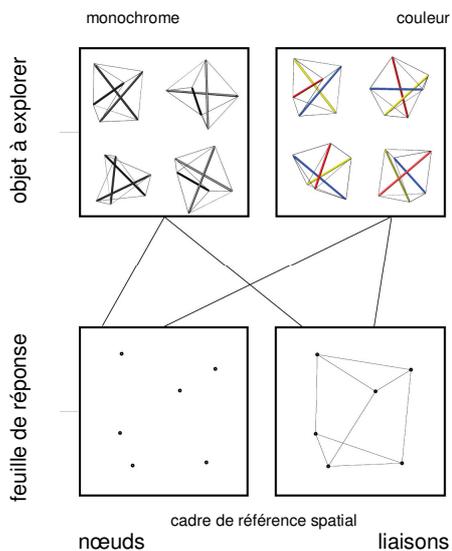
**condition 1:  
2d**



**condition 2:  
3d réel**



**condition 3:  
3d virtuel**



**Fig. 7** Procédure : pendant l'expérience, les sujets doivent dessiner les trois barres de l'objet dans les cadres de référence proposés dans la feuille de réponse (nœuds ou liaisons, un à la fois), après l'avoir exploré dans l'une des trois modalités (2d, 3d réel, 3d virtuel), en couleur et en noir et blanc.

**Fig. 7a** Condition expérimentale **2d** : une seule vue 2d est proposée aux sujets sur une feuille de papier A4.

**Fig. 7b** Condition expérimentale **3d réel** : une maquette réelle est présentée aux sujets, qui peuvent l'observer et la manipuler (exploration multimodale active).

**Fig. 7c** Condition expérimentale **3d virtuel** : un modèle tridimensionnel virtuel est présenté sur l'écran 2d d'un ordinateur ; les observateurs peuvent l'explorer librement en agissant sur la souris pour le tourner dans l'espace virtuel 3d et obtenir ainsi des multiples vues 2d sur l'écran.

Pour chaque essai, le temps (T) employé par les sujets pour dessiner de mémoire les trois barres est mesuré à l'aide d'un chronomètre et le nombre d'erreurs dans le positionnement des barres est enregistré. On compte une erreur (E) pour chaque barre dessinée dans une mauvaise position par rapport au cadre de référence contenu dans la feuille de réponse, ce qui signifie qu'on peut avoir un maximum de trois erreurs pour chaque essai.

Dans la Fig. 8 on montre les modèles du simplexe dans les trois conditions expérimentales (2d, 3d réel, 3d virtuel), en version monochrome et couleur, et les deux feuilles de réponse (cadre de référence « nœuds » et « liaisons ») [Fig. 7].

## 2d. Variables

Les variables prises en compte dans notre expérience sont quatre en tout, dont deux principales (population d'étude et modalité d'exploration) et deux variables additionnelles (couleur et cadre de référence spatiale), introduites pour évaluer le rôle de l'attention dans la tâche proposée.

Les deux variables principales dont on veut comprendre les interactions sont les **deux populations d'étude** (*experts et non-experts*) et les **trois conditions expérimentales**, c'est à dire les trois modes de représentation/exploration du simplexe (*2d, 3d réel, 3d virtuel*).

Dans la condition *2d*, la présentation d'une seule image en 2d permet l'*appariement biunivoque* direct de cette vue du simplexe avec la même vue partiellement représentée dans le cadre de référence de la feuille de réponse.

Dans la condition *3d réel* les sujets doivent échantillonner dans leur mémoire de travail l'ensemble des multiples représentations 3d de la structure, obtenues à travers l'observation et la manipulation de la maquette réelle, pour les faire correspondre à la vue unique contenue dans la feuille de réponse : une opération d'*appariement multivoque* est nécessaire pour dessiner les trois barres centrales dans le cadre de référence. Les *traces d'éligibilité* doivent être transformées du 3d dont elles sont issues vers une représentation 2d afin de les retrouver dans la feuille de réponse. Dans la condition *3d virtuel*, les observateurs doivent élaborer l'ensemble des multiples vues 2d obtenues sur l'écran à travers la manipulation du modèle virtuel du simplexe, pour les faire correspondre, à travers une opération mentale d'*appariement multivoque*, avec la vue unique 2d de la feuille de réponse.

Les deux variables additionnelles sont introduites afin de vérifier si (et dans quelle mesure) des processus dépendant de l'attention visuelle peuvent influencer les performances dans la tâche de mémoire spatiale proposée. La première de ces variables est la **couleur** des barres du simplexe. On sait que la couleur présente une forte puissance d'attraction ou distraction dans les processus d'attention sélective [YAN91]. Afin de vérifier si des variations dans l'attention sélective peuvent influencer la tâche de notre étude, on présente à tous les observateurs deux versions de la structure, une avec les trois barres en noir et l'autre avec les barres de trois couleurs différents (rouge, bleu, jaune). L'ordre de présentation des deux versions est inversé (monochrome ou couleur en première) entre les observateurs de chaque groupe. La deuxième variable additionnelle est le **cadre de référence** spatial proposé dans la feuille de réponse, sur laquelle les observateurs vont dessiner. Deux cadres de référence différents sont présentés à chaque observateur, qui va dessiner sur les deux. Un cadre de référence ne contient que des informations *positionnelles*, ou *ponctuelles* (exclusivement les extrémités des trois barres), l'autre contient aussi des informations sur les *liaisons* entre les points (les extrémités plus les lignes qui les joignent, les câbles), qui sont des informations *organisationnelles* ou structurelles, c'est à dire qui concernent la structure visuo-spatiale de l'objet. De la même façon que pour la couleur, pour les deux cadres de référence aussi l'ordre de présentation est inversé entre les observateurs de chaque groupe.

## II.2/ 3 RESULTATS

Les résultats sont calculés sur la base du temps utilisé (T) pour dessiner les trois barres de mémoire et du nombre d'erreurs (E) dans le positionnement des barres. Pour (T), nous avons considéré les temps moyens, exprimés en secondes, et leurs déviations standard<sup>5</sup>, dans chaque condition expérimentale. Les erreurs (E) correspondent aux barres dessinées dans la mauvaise position : E varie donc entre 0 (toutes les trois barres dessinées dans la position correcte) et 3 (toutes les trois barres dessinées dans une position incorrecte) pour chaque essai. Avec 192 essais, un nombre total de  $3 \times 192 = 576$  erreurs peut être produit dans l'expérience.

### *3a. Plan expérimental*

Chacun des trois groupes indépendants (G3) de huit sujets (S8), dans les deux populations d'étude (P2) observe le simplex dans une modalité unique de représentation (V1), en deux modalités couleur (C2), chacune suivie de deux essais de dessin (T2), un pour chaque cadre de références proposé. Le plan expérimental conséquent est  $G8 \times S8 \times P2 \times V1 \times C2 \times T2$ , ce qui produit un total de 192 observations pour T et 192 observations pour E. Pour chacun des six groupes indépendants de huit sujets des deux populations d'étude (trois groupes pour chaque population)  $S8 \times C2 \times T2$ , on obtient un nombre total de 32 observations pour T et 32 observations pour E et pour chaque population d'étude on obtient un nombre total de 96 observations pour T et 96 observations pour E. Les effets des mesures répétées à l'intérieur de chaque population d'étude (experts et non-experts) sont analysés en premier. Les moyennes de T et E des deux populations sont comparées en fonction de la couleur des barres (couleur ou monochrome) et en fonction de l'information contenue dans le cadre de référence fourni pour le dessiner la réponse (nœuds ou liaisons). Ensuite, elles seront comparées en fonction de la modalité d'exploration (2d, 3d réel, 3d virtuel).

### *3b. Couleur et cadre de référence spatial*

Pour ce qui concerne les effets de la couleur, le fait que les observateurs voient la structure en couleur d'abord, suivie par la monochrome, ou, à l'inverse, la monochrome d'abord suivie par celle en couleur, ne produit aucun effet systématique sur T ou E dans les deux populations d'étude [Tab 1a et 1b]. De la même façon, l'information fournie dans les deux cadres de référence spatiale (nœuds ou liaisons) proposés pour le dessin de la réponse ne produit aucun effet systématique sur T ou E, tant dans le cas où les observateurs dessinent dans le cadre « nœuds » d'abord et dans le cadre « liaisons » après, tant dans le cas inverse [Tableaux 2a et 2b]. Les valeurs de T et leur déviation standard à l'intérieur de chaque population montrent des différences petites et non significatives en fonction de la couleur des barres et du cadre de référence spatial proposé pour la réponse; de la même façon des variations petites et non systématiques dans E sont obtenues en relation à la couleur des barres et en relation au cadre de référence spatial.

Le Tab. 2 montre les distributions des données individuelles pour T, en ordre croissant, dans les deux populations d'étude.

---

<sup>5</sup> La déviation standard est une mesure statistique qui permet d'évaluer la dispersion des données par rapport à la moyenne.

<b>NON EXPERTS</b>	<i>noir en premier</i>		<i>couleur en premier</i>	
	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>
noir (N=48)	43.5 méd: 30 $\sigma=30.6$	15	41.6 méd: 20 $\sigma=31.2$	22
couleur (N=48)	51.4 médian: 35 $\sigma=40.8$	15	44.6 médian: 31 $\sigma=36.9$	29

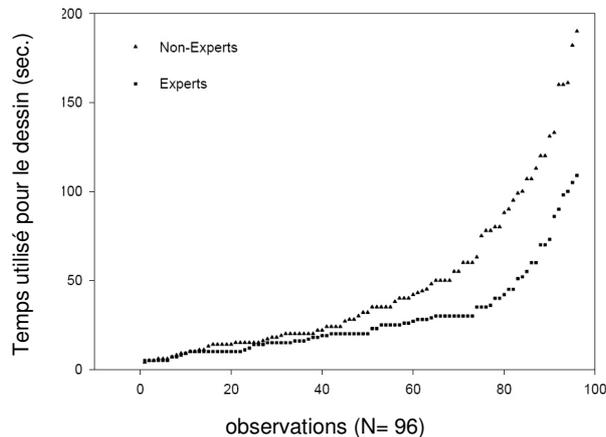
<b>EXPERTS</b>	<i>noir en premier</i>		<i>couleur en premier</i>	
	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>
noir (N=48)	27.4 median: 21 $\sigma=26$	7	26.8 median: 20 $\sigma=24.3$	2
couleur (N=48)	27.8 median: 18 $\sigma=26.7$	3	30.5 median: 24 $\sigma=24.9$	5

<b>NON EXPERTS</b>	<i>« liaisons » en premier</i>		<i>« points » en premier</i>	
	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>
liaisons (N=48)	44.2 median: 26 $\sigma=34.2$	18	46.6 median: 29 $\sigma=39.1$	19
points (N=48)	47.2 median: 31 $\sigma=30.4$	21	49.0 median: 25 $\sigma=37$	23

<b>EXPERTS</b>	<i>« liaisons » en premier</i>		<i>« points » en premier</i>	
	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>
liaisons (N=48)	31.3 median: 24 $\sigma=26.8$	2	24.5 median: 17 $\sigma=21.9$	6
points (N=48)	29.0 median: 20 $\sigma=25.9$	4	30.1 median: 23 $\sigma=28.2$	5

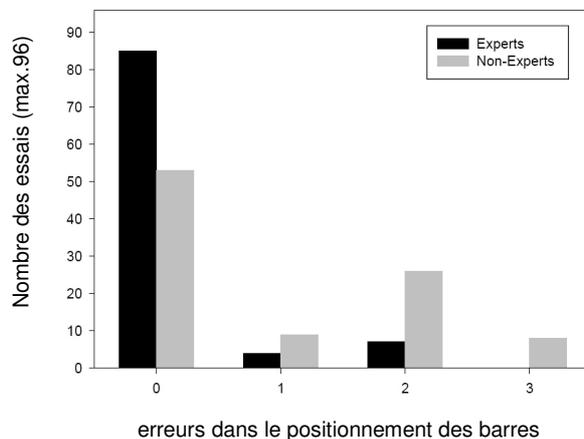
**Tab. 1a, 1b et 2a, 2b**  
Temps moyens utilisés pour dessiner de mémoire (T), médianes des distributions, déviations standard ( $\sigma$ ) et nombre d'erreurs commises (E) pour les deux populations d'étude, indépendamment de la condition d'exploration. Ces données sont calculées en fonction de la couleur de la structure explorée (1a et 1b) et en fonction du cadre de référence proposée pour dessiner la réponse après l'exploration (2a et 2b).

L' *analyse de la variance* (ANOVA)<sup>6</sup> pour les mesures répétées de T dans un plan expérimental 24 x 2 x 2 x 2 (24 observateurs x 2 populations d'étude x 2 conditions de couleur x 2 mesures répétées dans des cadres de référence différents) a révélé, comme on s'y attendait, un *effet statistiquement significatif de la population d'étude* ( $F(1, 16) = 6.029, p < .01$ ) et des *effets non significatifs de la couleur* ( $F(1, 16) = 0.432, NS$ ) et du *cadre de référence spatial* ( $F(1, 16) = 0.328, NS$ ).



**Tab. 2** Distribution, en ordre ascendant, des temps individuels (en sec) employés pour dessiner de mémoire les trois barres par les observateurs des deux populations d'étude.

A la lumière des données résumées dans les tableaux 1 et 2 on peut conclure que, comme c'était prévisible, les experts ont fait moins d'erreurs positionnelles que les non experts en dessinant les barres. Par contre, on n'observe pas de différence systématique dans E ni en fonction de la couleur des barres de la structure observée, ni en fonction du cadre de référence donné pour dessiner la réponse.



**Tab. 3** Distribution des erreurs positionnelles pour un nombre total de 96 essais (avec un nombre maximum de trois erreurs possibles pour essai) en fonction des deux populations d'étude.

Le tableau 3 montre le nombre d'essais dans lesquels les sujets des deux populations d'étude ont fait zéro, une, deux ou trois (sur un maximum de trois) erreurs positionnelles dans le dessin des barres. La distribution des erreurs positionnelles montre que les experts n'ont fait aucune erreur dans

<sup>6</sup> L'analyse de la variance (ou ANOVA) est une analyse statistique qui permet de comparer les moyennes de plusieurs facteurs ou populations d'étude (dans notre expérience, deux populations d'étude, 3 modalités de représentation, deux couleurs et deux cadres de référence spatiale). Il s'agit de l'équivalent, pour des variables qualitatives, de la régression linéaire (que nous avons utilisée, par exemple, dans l'analyse des données de notre expérience sur la perception de la courbure). L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence des interactions significatives entre les facteurs.

85 essais sur un total de 96 ; les non-experts n'ont fait aucune erreur dans 53 des 96 essais. Le nombre maximum de trois erreurs n'a été produit que dans 9 cas sur 96 essais, dans la population des non-experts. Ces résultats révèlent assez clairement que les observateurs ont fourni une bonne performance, ce qui signifie que pour sa réalisation, les limites du potentiel de capacité de la mémoire de travail n'ont pas été dépassées, même si la tâche a été perçue comme « difficile » par la plupart d'entre eux.

En raison des variations non significatives sur T et E en fonction de la couleur de la structure observée et du cadre de référence donné pour le dessin, nous avons calculé une mesure moyenne de performance basée sur les quatre mesures répétées d'un observateur donné (T/4 et E/4). Toutes les analyses suivantes ont été conduites sur ces mesures moyennes.

Des différences remarquables ont été trouvées entre les deux populations d'étude, avec des T considérablement plus courts (29 secondes,  $\alpha=25$  vs 47 secondes,  $\alpha=35$ ) et un nombre moindre de E (17 vs 81) dans la population d'experts, comme on pouvait s'y attendre. Les effets des différentes modalités de représentation (ou conditions expérimentales) à l'intérieur de et entre les deux populations d'étude ont été analysés par la suite.

### 3c. Modalité de représentation (2d, 3d réel, 3d virtuel)

Dans la condition expérimentale d'exploration *2d simple*, les deux populations d'étude (experts et non-experts) ont eu des performances de même qualité, comme on pouvait s'y attendre. La condition expérimentale qui a donné le plus de différences entre les deux populations d'étude est la condition expérimentale d'exploration *3d virtuel* (vues virtuelles multiples). Les meilleures performances, par rapport aux valeurs les plus courtes de T et au nombre minimum d'erreurs E, ont été produites dans la condition expérimentale de représentation 3d virtuelle par le groupe de sujets experts. Les performances les plus pauvres ont été produites dans la condition expérimentale 3d réel (exploration visuelle + tactile) par le groupe des non-experts.

	<i>2d</i>		<i>3d réel</i>		<i>3d virtuel</i>	
	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>E</b>
<b>EXPERTS</b>	22.7 min: 5 median: 15 max: 35 <b><math>\sigma=18.6</math></b>	0	43.3 min: 7 median: 20 max: 109 <b><math>\sigma=27.3</math></b>	3.5	18.6 min: 9 median: 14 max: 50 <b><math>\sigma=11.5</math></b>	1
<b>NON EXPERTS</b>	19.0 min: 4 median: 5 max: 13 <b><math>\sigma=6.9</math></b>	2.25	59.12 min: 15 median: 43 max: 160 <b><math>\sigma=51.4</math></b>	11.25	57.00 min: 14 median: 35 max: 190 <b><math>\sigma=18.6</math></b>	7.75

**Tab. 4** Données moyennes de T et E en fonction de la population d'étude et des conditions expérimentales d'exploration.

Le tableau 4 résume les valeurs moyennes pour T, le minimum, le maximum et les médianes des distributions et leur déviation standard, ainsi que les valeurs moyennes de E dans les trois groupes différents de 8 observateurs des deux populations d'étude (un groupe pour chaque condition expérimentale). Les données montrent que le bénéfice de l'exploration virtuelle sur le temps (T) utilisé pour dessiner de mémoire les barres par les experts, par rapport avec l'observation et la manipulation de la structure 3d réelle, est approximativement de 50%, ce qui est considérable. Le nombre moyen d'erreurs (E) révèle un bénéfice remarquable dans la précision qui va dans la même direction. Les performances des non-experts dans la condition 3d réel (multimodale active) et 3d virtuel montrent assez clairement que les non-experts ne gagnent pas d'avantages, comme on pouvait l'attendre, dans l'exploration multimodale active de l'objet réel par rapport à l'exploration visuelle d'un modèle 3d sur l'écran. En fait, pour les non-experts, les performances tendent à être légèrement plus lentes et moins précises dans la condition 3d réel (multimodale active). Cet effet va dans la même direction que celui observé dans le cas des experts, mais sans le même remarquable avantage que semble présenter l'exploration virtuelle pour les experts.

L' ANOVA pour un plan expérimental 16 x 3 (16 observateurs x 3 groupes/modalités de représentation) a révélé un effet du facteur groupe (condition expérimentale/ modalité d'exploration) statistiquement significatif sur T ( $F(2, 13) = 4.531, p < .01$ ).

Dans l'étape suivante, nous avons vérifié dans les données la présence ou non d'effets significatifs dus au genre sexuel (masculin ou féminin).

### 3d. Absence d'effets du genre

Les résultats pour la condition expérimentale dans laquelle nous avons testé des observateurs de genre sexuel différent ont été analysés afin de découvrir de possibles effets dus à cette différence. Les groupes d'observateurs concernés sont ceux qui ont exploré la vue 2d simple et le 3d réel (vision + toucher). Aucun effet significatif du genre n'a été trouvé dans ce résultat. Les valeurs moyennes de T et E pour les sujets hommes et femmes, dans les conditions où sont tous les deux présents, sont synthétisés dans le tableau 5.

	2d		3d réel	
	T	E	T	E
<b>EXPERTS F</b>			39.2 (n=2) $\sigma=24.6$	0.75
<b>EXPERTS M</b>			47.5 (n=6) $\sigma=30.0$	0.25
<b>NON EXPERTS F</b>	19.3 (n=5) $\sigma=7.1$	0.25	59.9 (n=3) $\sigma=49.3$	3.5
<b>NON EXPERTS M</b>	18.7 (n=3) $\sigma=6.7$	0.5	58.0 (n=5) $\sigma=53.5$	4.25

**Tab. 5** Les données moyennes de T et E en fonction de la population d'étude et du genre sexuel (Masculin ou Féminin), pour les conditions d'exploration dans lesquelles des observateurs des deux sexes ont été testés. Ces données ne montrent aucune différence systématique due au genre sexuel.

### 3e. Observateurs super-experts

En dernière lieu, on a analysé les performances de six autres experts dans la conception de structures complexes, les « super-experts », afin de comparer leurs données avec ceux des deux populations d'étude. Ces sujets connaissent très bien le simplex pour avoir travaillé sur cette structure et sur d'autres structures de tensegrité pendant plusieurs années. Tous les super experts ont dessiné de mémoire leur réponse dans le cadre de référence topologique. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 6.

Les six « super-experts », tous des hommes, n'ont fait aucune erreur positionnelle dans les dessins des barres. Malgré leur expertise particulière avec la structure observée, ils ont eu besoin au moins de cinq secondes pour dessiner les trois barres du simplex de mémoire dans le cadre de référence 2d après l'observation, et c'est également vrai dans le cas où la même vue devait simplement être copiée du 2d au 2d. La condition de présentation ne semble donc déterminer aucune différence.

	RM	FC	JQ	NA	TB	VR
T (sec.)	5.7	12.9	8.6	5.6	5.3	15.6

**Tab. 6** Temps utilisé pour dessiner la réponse des cinq super-experts, concepteurs qui connaissent et qui ont une grande familiarité avec le simplex.

## II.2/ 4 DISCUSSION

Notre expérience avec le simplex montre que des observateurs qui n'ont pas des capacités visuo-spatiales spécialement entraînées sont parfaitement capables d'apprendre la structure d'un objet inconnu, abstrait et complexe dans un seul essai, à travers l'exploration visuelle d'un modèle virtuel 3d, ou à travers l'observation et la manipulation d'une maquette réelle. *Dans notre expérience, les capacités de la mémoire de travail visuo-spatiale n'ont pas été sollicitées par la tâche expérimentale au delà de leurs limites connues (7 +/-2 regroupements d'information), puisque le nombre d'erreurs commis par les sujets des deux populations dans les différentes conditions de présentation était loin du maximum possible. Le temps employé pour dessiner de mémoire et le nombre d'erreurs commis sont cohérents à l'intérieur des différentes populations d'étude.*

*La présence de couleur sur la structure ainsi que la quantité d'information spatiale 2d contenue dans le cadre de référence visuel donné pour le dessin de la réponse n'ont pas eu d'influence significative sur les performances des deux populations d'étude.*

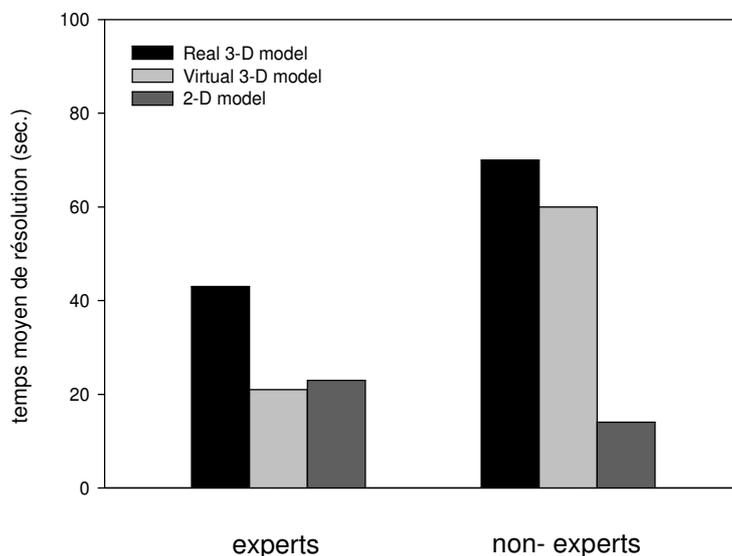
L'absence d'un effet dû à la couleur dans notre résultats s'explique bien à la lumière de la hypothèse d'une disponibilité limitée de ressources dans les tâches de mémoire de travail, ce qui est la conséquence directe des limitations de la capacité de la mémoire de travail en soi même [BAD03]. Lorsque le système cognitif est engagé dans la construction ou l'exploration du calepin visuo-spatial d'une structure complexe, l'attention sélective vers les informations peu importantes est temporairement supprimée. Si les variations dans l'attention sélective jouent un rôle dans la résolution de la tâche, les barres de trois couleurs devraient éloigner l'attention des observateurs de la structure spatiale de l'objet et interférer avec l'analyse perceptive de sa symétrie radiale. Dans ce cas, la couleur aurait un effet de distraction sur l'élaboration spatiale visuelle, ce qui amènerait à des temps plus longs ou à plus d'erreurs dans l'exécution de la tâche. Les effets dus au cadre de référence visuel (par exemple différentes ouvertures de l'angle visuel, plus ou moins sélectives) sur la reconnaissance de formes inconnues et inhabituelles, précédemment explorées sous différentes conditions d'attention visuelle sélective, ont déjà été vérifiés [KRO03]. Si l'attention sélective a une quelque influence sur la tâche proposée, le cadre de référence qui fournit des indices 2d sur les propriétés structurelles de l'objet (le cadre avec les liaisons, qui montre la position des câbles), devrait permettre d'obtenir de meilleures performances, car il rend des indices organisationnels directement accessibles à l'attention visuelle. Le cadre de référence ponctuel, qui ne contient que des informations positionnelles (les extrémités des barres et des câbles), ne permet pas à l'attention visuelle un accès direct à ces indices organisationnels/structuraux, qui doivent, dans ce cas, être reconstitués par la mémoire de travail visuo-spatiale, ce qui comporterait un temps d'élaboration majeure pour la résolution de la tâche. L'absence, dans les résultats, d'effets dus à la couleur ou au cadre de référence spatiale proposé dans la feuille de réponse nous font conclure que l'attention sélective n'a pas eu d'influence sur la tâche proposée, car celle-ci sollicite des processus cognitifs plus complexes que la perception directe.

*Les différences significatives dans les performances dépendent donc exclusivement de l'expertise et de la modalité d'exploration (image 2d, 3d réel, 3d virtuel) [Tab 7a et 7b].*

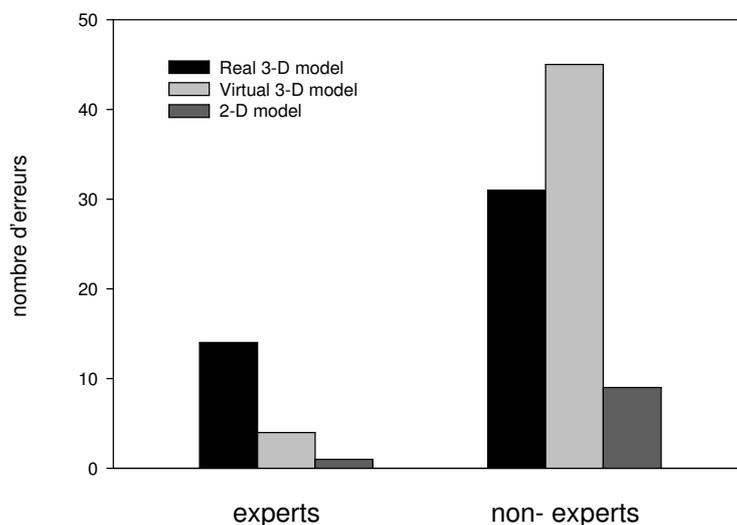
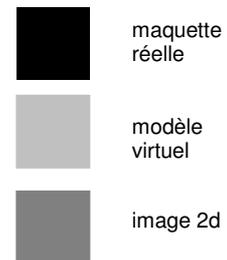
*L'absence d'effets remarquables des mesures répétées sur les performances, dans les deux populations d'étude, conforte ultérieurement l'idée que la tâche d'étude proposée concerne en effet des opérations de mémoire complexes comme l'appariement, qui vont bien au delà de la simple*

perception. Le temps relativement longs employés par les super-experts dans le groupe additionnel renforce ultérieurement une telle conclusion. Ces constats, associés avec le fait qu'il n'y a pas eu d'effets mesurables liés à l'attention visuelle confirme les intuitions antérieures : les processus perceptifs nécessaires pour l'apprentissage des représentations visuelles abstraites sont centrales et concernent des opérations cognitives au-delà du niveau sensoriel [GIB63]. Nos résultats ne montrent aucun « effet d'avantage tactile », précédemment trouvé par d'autres dans la reconnaissance visuelle d'objets moins abstraits [NOR04]. Ce phénomène est facilement expliqué par le fait que les processus d'apprentissage perceptif sous-jacents à la formation des représentations d'objets complexes inconnus et abstraits ne s'intéressent pas au fait que la structure est explorée, et donc apprise, visuellement, manuellement ou dans les deux modalités.

*Le résultat le plus remarquable dans nos données est l'avantage comparativement considérable de l'exploration du modèle virtuel 3d (à travers des vues multiples sur un écran) sur les temps employés pour dessiner de mémoire et sur les erreurs commises par les experts, par rapport à l'exploration de la maquette réelle 3d [Tab. 7a et 7b].*



**Tab. 7a et 7b** Synthèse des résultats (temps (T) : Tab. 7a, erreurs (E) : Tab. 7b) des performances des deux populations d'étude en fonction des trois conditions d'exploration (2d, 3d réel, 3d virtuel).

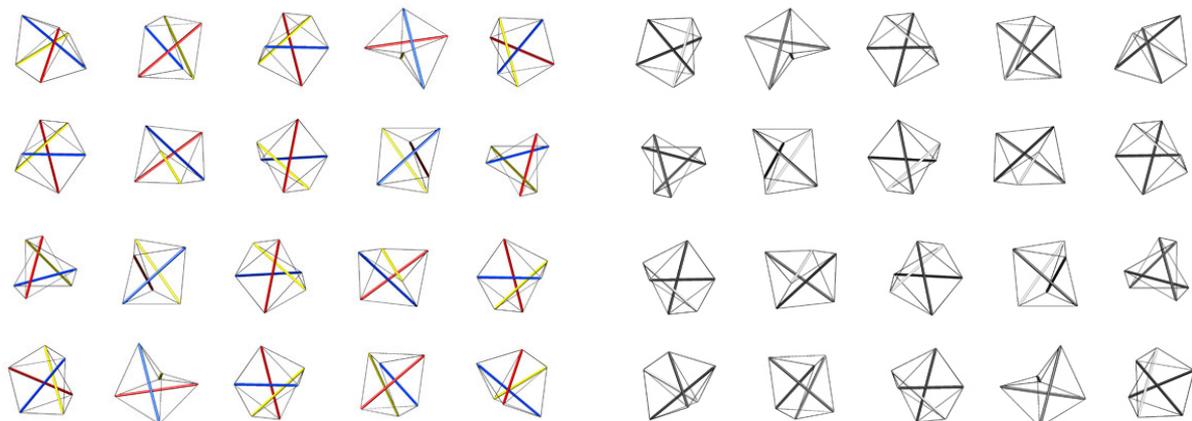


Etant donné que les transformations mentales demandées par la tâche expérimentale de cette étude reposent sur des opérations cognitives de haut niveau (les opérations d'appariement), et étant donné que des effets sélectifs et plus spécifiquement visuels sont absents de nos données, *ce résultat ne peut être expliqué que par la différence dans la nature des traces d'éligibilité disponibles dans les deux différentes conditions d'exploration*. Il ne faut pas oublier que dans tous le cas des représentations virtuelles des objets et des espaces qui sont modélisés en 3 dimensions dans l'espace virtuel numérique, ce que nous percevons ne sont que des images bidimensionnelles sur un écran : *les traces d'éligibilité géométrique dans un modèle numérique doivent forcément faire référence exclusivement à des propriétés figuratives bidimensionnelles*.

L'exploration par la vue et le toucher d'un simplexe réel (effectivement 3d) pourrait faciliter l'élaboration des traces d'éligibilité à travers des *indices multi-sensoriels supplémentaires*, qui ne seraient pas disponibles dans le cas de la seule vue. En explorant le simplexe avec leurs mains, les observateurs pourraient prendre conscience de quelques-unes de ses propriétés mécaniques, comme par exemple la tension dans les câbles qui constituent les formes triangulaires. Cette conscience pourrait contribuer à rendre visuellement plus évidentes certaines des effectives qualités spatiales de cet objet, ce qui ne semble pas le cas dans nos résultats, dans lesquels n'est émerge aucun avantage tactile.

Pour ce qui concerne l'expertise, nous savons que l'échantillonnage des traces d'éligibilité géométrique, dans les deux conditions 3d virtuel (modèle numérique) et 3d réel (maquettes) fait partie des tâches que les concepteurs en architecture et ingénierie pratiquent couramment pendant la conception spatiale. La transformation d'éléments réels 3d en croquis 2d est une opération que les concepteurs spatiaux experts ont l'habitude d'effectuer ; par conséquent, dans leur cas, le réel 3d ne devrait exiger aucun coût supplémentaire de performance en comparaison avec le modèle virtuel, où une telle transformation n'est pas nécessaire. Par conséquent, si le média virtuel ne fournit pas d'avantage spécifique pour l'élaboration d'une structure inconnue, en comparaison au média réel, l'analyse visuelle spatiale des experts devrait fournir des performances équivalentes dans les deux conditions d'observation, réelle et virtuelle. On peut par contre prévoir un tel coût d'exécution dans le cas des observateurs non experts, qui n'ont pas l'habitude d'effectuer couramment des telles transformations 2d/3d.

**Fig. 8** La réalité virtuelle comme « réalité augmentée » : les outils virtuels permettent de générer un nombre très importante de vues 2d différentes potentiellement significatives.



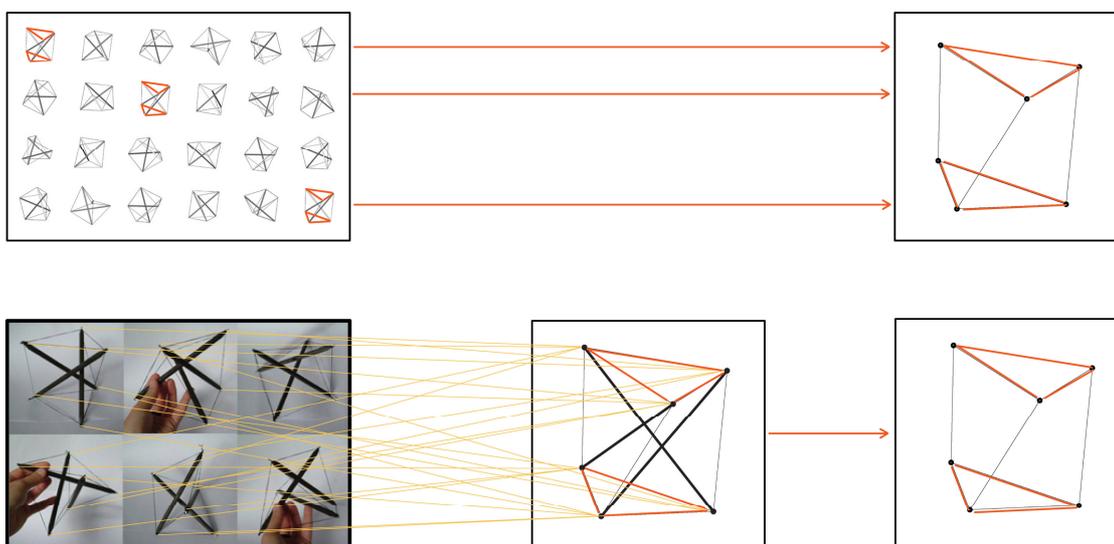
La meilleure performance des experts dans l'observation du modèle numérique par rapport à la manipulation de la maquette réelle, nous fait supposer que la représentation numérique est capable de transmettre des traces d'éligibilités plus efficaces que la maquette réelle pour accomplir la tâche d'appariement proposée.

Quelles spécificités présentent donc les informations spatiales transmises par les outils de représentation numérique ?

Premièrement, pour chaque intervalle limité de temps fixé, un échantillon de vues différentes plus important et potentiellement plus riche peut être généré virtuellement (dans une virtuelle « réalité augmentée »), par comparaison avec l'exploration active de l'objet réel [Fig.8].

Deuxièmement, et c'est encore plus important, la nature intrinsèquement bidimensionnelle des traces d'éligibilité qui sont échantillonnées sur l'écran 2d pendant l'exploration du modèle numérique 3d permet, dans le cas de la tâche proposée, l'appariement biunivoque direct avec l'image proposée dans la feuille de réponse [Fig.9]. Pendant l'exploration du modèle numérique on voit forcément la même image (peut être en vitesse, donc on ne la remarque pas, mais elle passe devant nos yeux) ; contrairement, les échantillons issus du 3d réel doivent subir une transformation supplémentaire dans le calepin visuo-spatial de la mémoire de travail pour être appariées à l'image bidimensionnelle proposée dans la feuille de réponse. Le fait que cette transformation supplémentaire provoque un coût mesurable et assez important sur les performances de spécialistes hautement expérimentés, soulève des questions sur la nature des représentations 3d d'objets dans le cerveau humain. Nos observations issues de cette expérience sont cohérentes avec certaines théories [SIN96] qui soutiennent que les représentations de la structure perceptive visuelle 3d, spécialement quand celle-ci est abstraite et n'est pas supportée par des indices familiers, sont apprises et stockées dans le cerveau à travers des processus cognitifs qui reposent principalement sur des indices bidimensionnelles.

**Fig. 9** L'exploration de l'objet 3d virtuel, à travers des multiples vues 2d sur l'écran, rend accessibles des traces d'éligibilité qui permettent l'opération directe d'appariement biunivoque avec les données de la feuille de réponse ; l'exploration de l'objet réel 3d requiert une opération supplémentaire d'appariement multivoque pour la création, dans le « calepin visuo-spatiale » de la mémoire de travail, d'une représentation 2d, nécessaire pour reconstruire les traces d'éligibilités 2d proposées dans la feuille de réponse.



Enfin, nous voudrions citer un phénomène intéressant dans le groupe des super-experts, c'est la performance de TB, un architecte qui connaît bien la tensegrité, mais qui a la moins bonne expérience de tous les super-experts dans la manipulation du simplex. Cet observateur n'utilise jamais des outils

virtuels de modélisation et visualisation et il ne fait référence qu'à ses modèles dessinés à la main pour apprendre à ses étudiants la conception structurelle et architecturale. Malgré son manque de familiarité avec les outils virtuels en général, il n'a eu besoin que de cinq secondes pour reproduire la structure du simplex sur la feuille de réponse après avoir explorée le modèle numériques sur l'écran de l'ordinateur. Un tel temps correspond, par exemple, à un tiers du temps qui a employé le super-expert VR, qui manipule régulièrement des structures de tensegrité et presque exclusivement à travers des outils virtuels. Cet constat semble renforcer notre idée que ce n'est pas la familiarité avec les outils virtuels en soi même qui peut expliquer la supériorité relative de ce média dans l'apprentissage rapide de structures visuelles inconnues, complexes et abstraites, mais principalement la nature des traces d'éligibilité mises à disposition par les outils virtuels.



Les résultats expérimentaux obtenus dans les deux expériences menées se révèlent hautement significatifs à plusieurs niveaux :

1. Dans le traitement perceptif de la *courbure*, nous avons identifié avec le *rapport d'aspect* d'une courbe un invariant capable de représenter fidèlement la variation dans le niveau de courbure perçue. La sensation de courbure perçue augmente proportionnellement avec le rapport d'aspect des courbes. Un tel *invariant* semble *général* si ce n'est *universel*, car nous n'avons pas remarqué de différences significatives entre les performances des sujets experts (sauf un) et des non-experts.

2. Pour ce qui concerne les *formes complexes*, nos résultats semblent montrer que dans le traitement perceptif et cognitif des objets abstraits qui présentent une configuration spatiale irrégulière les *indicateurs relationnels* sont l'indice fondamental dans la construction de la représentation mentale ; ils le sont bien plus que les qualités purement morphologiques ou figuratives indépendantes. Des tels indicateurs relationnels sont appelés *traces d'éligibilité* ou *critères d'apprentissage perceptif*.

3. Les *outils de représentation* semblent avoir une influence déterminante sur la construction des représentations mentales des objets. L'effet le plus remarquable dans nos résultats est *l'apparente supériorité de l'outil numérique* sur la maquette réelle pour la transmission des informations spatiales significatives sur un objet abstrait à forme complexe. Nous pouvons expliquer ce résultat avec le concept de « *réalité augmentée* » : le virtuel numérique serait plus efficace que l'analogique réel car il permettrait l'accès à un nombre d'informations plus important que le réel. Celui-ci est limité par l'espace et le temps effectifs du monde physique.

4. L'*expertise* ne semble pas avoir d'influence sur certains mécanismes perceptifs (comme l'élaboration de la courbure à travers l'indice rapport d'aspect), ce qui démontre l'existence de mécanismes perceptifs qui peuvent être considérés effectivement comme universels. En même temps, dans les deux expériences nous avons remarqué au moins un sujet pour lequel l'*expertise* semble avoir une influence importante dans la construction du monde mental. Un tel résultat nous semble très significatif dans le domaine de la conception spatiale, qui est un domaine fortement collaboratif,

spécialement dans le cas de l'architecture Non-Standard (plusieurs spécialistes avec expertises différentes qui collaborent dans le processus créatif).

**Partie III**

**DISCUSSION:  
PERCEPTION ET CONCEPTION DES FORMES  
COMPLEXES**



Nos résultats expérimentaux nous ont permis d'établir des premiers repères pour la compréhension des liens entre les formes complexes, leurs représentations mentales et leurs représentations bidimensionnelles fournies par les outils de représentation. Dans cette troisième et dernière partie de la thèse nous allons discuter l'importance de ces résultats dans le contexte plus large de la conception spatiale, en particulier de la conception de l'architecture Non-Standard.

Pour ce qui concerne l'élaboration perceptive et cognitive des formes complexes, nos résultats apparaissent significatifs par rapport à deux questions qui sont particulièrement importantes dans la conception de l'architecture Non-Standard : la gestion du rapport entre les *données locales et globales* d'une part, et le traitement cohérent des caractères de *continuité et discontinuité* d'autre part. Les caractéristiques géométriques que nous avons identifiées comme émergentes dans l'architecture Non-Standard sont la *courbure variable continue* et les *configurations géométriques hautement irrégulières*. Dans ces deux cas une question importante émerge, elle est relative au traitement perceptif : quelles sont les logiques les processus mentaux qui permettent de passer du local au global, c'est-à-dire des éléments ou des caractéristiques ponctuelles à la structuration de l'ensemble dans un tout cohérent qui, en tant que tel, porte une identité morphologique bien définie.

Dans le cas de la *courbure*, le questionnement se pose principalement vis-à-vis de sa *continuité*. Une ligne courbe ou une surface courbe, au sens où nous l'évoquons ne présente pas de rupture de tangentes ou de plans tangents que l'on pourrait assimiler à des discontinuités qui conduiraient à la mise en évidence de parties constitutives de l'ensemble: quels indicateurs géométriques sont donc choisis au niveau cognitif pour construire la représentation mentale d'une courbe ou d'un objet courbe, pour pouvoir l'analyser et comprendre sa spatialité effective? Nous avons identifié avec le *rapport d'aspect* un indicateur local capable de donner une information efficace sur l'ensemble de la forme courbe ; nous discutons les implications de ce résultat dans le domaine de la conception spatiale.

Dans le cas des *formes complexes*, le problème résulte plutôt du fait qu'il n'est pas possible de réduire la complexité par le biais du rapprochement de

formes élémentaires, car de cette façon on perdrait l'information la plus importante, qui est la *structure relationnelle entre les parties*. Nous discutons donc les logiques géométriques qui pourraient être utilisées pendant l'élaboration perceptive pour synthétiser la structure relationnelle des formes irrégulières et par exemple de la configuration spatiale de l'objet utilisé dans notre expérience : le simplex.

Pour ce qui concerne les *outils de représentation*, en basant notre propos sur l'importance fondamentale du dessin comme outil de représentation et d'élaboration morphologique dans la conception spatiale, nous discutons le rôle des outils virtuels, qui sont en train de prendre la place des croquis et de la géométrie descriptive lors du processus de conception. En particulier, nous analysons et tirons profit du résultat singulier de notre deuxième expérience, qui semble montrer que les outils virtuels numériques de représentation sont plus « efficaces » que les maquettes réelles dans la transmission des informations sur les qualités formelles et spatiales.

III. 1

## LE TRAITEMENT PERCEPTIF DES FORMES COMPLEXES

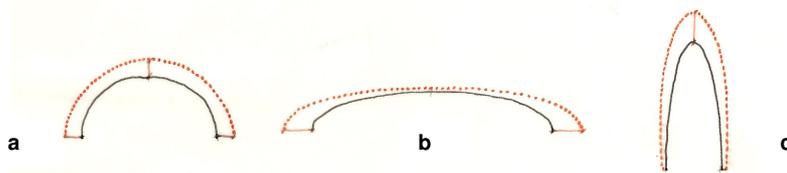


### III.1/ 1 LA COURBURE

La courbure est l'une des qualités morphologiques principales de l'architecture Non-Standard [Fig.1] et pour cette raison nous avons choisi de commencer notre recherche par une étude expérimentale destinée à l'identification des lois géométriques qui déterminent la relation entre le monde physique, c'est-à-dire la courbure analytique (mesurable) d'un objet, et le monde mental, c'est-à-dire la représentation interne de cette courbure, qui correspond à la sensation de courbure perçue.

#### 1a. Courbure analytique et courbure perçue : local et global

Nous avons expliqué dans le chapitre II.1 que la courbure peut être définie intuitivement comme la caractéristique d'une forme de changer de direction (c'est-à-dire de ne pas rester rectiligne) sans interruptions brusques dans ce changement. Cependant le terme « courbure » renvoie aussi à une propriété géométrique: la *courbure analytique*. Dans le cadre de cette thèse, ce que nous intéressons en particulier c'est la relation entre la courbure perçue (la sensation globale de courbure d'un arc) et la courbure analytique, qui sont des qualités très différentes. D'un point de vue analytique, en partant des concepts de la géométrie différentielle, la courbure bidimensionnelle (la courbure d'une ligne courbe) est définie comme une qualité locale ou ponctuelle: l'inverse du rayon de courbure du cercle tangent à la courbe en un point de la courbe [Fig.2]. On pourra définir la courbure d'un arc en un point, ainsi que la courbure d'une surface en un point. Ces définitions analytiques, si elles peuvent être intuitivement comprises au niveau local deviennent évidemment inutilisables pour juger des courbes qui changent constamment de niveau de courbure locale, comme c'est le cas avec la plupart des objets du monde physique, parmi lesquels les cercles et les sphères (les seuls objets qui ont une courbure constante, selon une définition analytique) sont des exceptions. Les formes de l'architecture Non-Standard, par exemple, constituent un cas de formes à courbure hautement variable [Fig.1]. Dans le cas des courbes bidimensionnelles, il existe une seule courbe qui présente une courbure locale constante, c'est le cercle ; toutes les autres courbes, même celles qui sont analytiquement simples, comme les coniques<sup>1</sup> (ellipse, parabole, hyperbole) ont une courbure qui varie significativement selon les différents points. Dans la figure 3 nous présentons une schématisation approchée de la variation dans les courbures locales pour certains des arcs utilisés dans notre expérience.



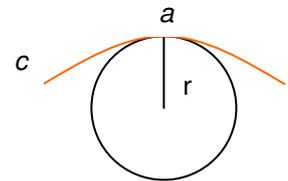
Comment notre système perceptif analyse donc la propriété globale de courbure des objets et en particulier des arcs bidimensionnels ? Est-il possible de définir un lien entre la courbure analytique locale qui peut être mesurée dans un point et la qualité de courbure globale qui est perçue dans un arc, mais qui n'est analytiquement pas définie donc non mesurable ?

Nos résultats montrent qu'un tel lien est fait par le biais de la *flèche*, et de la *corde* des arcs. Ces éléments représentent des indices quantifiables capables de décrire des qualités géométriques globales (par exemple, la

<sup>1</sup> Les coniques sont une famille de courbes qui peuvent être obtenues comme sections d'un cône avec un plan.



**Fig. 1** Courbure et Architecture Non Standard.  
F. Gehry, Disney Concert Hall, Los Angeles (2006)



$$C(a) \text{ in } a = 1/r$$

**Fig. 2** La courbure analytique  $C$  dans le point  $a$  de la courbe  $c$  est définie comme l'inverse du rayon de courbure du cercle tangent à la courbe  $c$  dans le point  $a$ .

**Fig. 3** Schéma des courbures locales de certains des arcs elliptiques utilisés dans l'expérience. L'arc circulaire  $a$  à courbure locale constante ; l'arc elliptique « horizontal » présente des courbures locales très importantes aux bords et une courbure locale presque nulle dans la partie centrale (b) ; l'arc elliptique « vertical », au contraire, est caractérisé par une courbure locale très importante dans la partie centrale et des courbures presque nulles sur les bords (c).

« hauteur » et la « largeur » d'une courbe). Encore plus que la corde et la flèche individuellement, il est le rapport entre ces deux indices (défini comme *rapport d'aspect*) qui constitue un invariant fiable et universel pour modéliser la variation de la courbure perçue. Le rapport d'aspect est un indice très efficace pour fournir une information sur la *globalité d'une courbe*, voire sur la surface couverte par elle. Les propriétés analytiques locales ne semblent pas du tout être prises en compte dans le jugement perceptif par la plupart des sujets (tous sauf un) : ce qui apparaît fondamental c'est la *sensation globale de forme*, qui est efficacement synthétisée par la valeur du *rapport d'aspect* [Fig.4].

Nos résultats semblent donc démontrer que le jugement spontané de la qualité formelle de courbure n'est pas un jugement des qualités ponctuelles ou analytiques mais un jugement de la forme dans sa globalité en tant qu'« objet ». Nous supposons qu'une élaboration perceptives d'une telle nature est importante dans les situations d'interaction directe avec le monde physique, par exemple pour évaluer si c'est possible, avec la surface occupée par notre corps, réussir à passer à travers un objet courbe, comme un arc ou une porte : dans une telle situation, le plus important serait d'évaluer de la façon la plus immédiate possible la surface de la courbe, ce qui est possible en mettant en relation directe flèche et corde à travers l'indice fourni par le *rapport d'aspect*.

### 1b. Le rôle « écologique » de l'indice de courbure

Cette importance de l'indice « *relation d'aspect* » et donc du jugement perceptif global d'une courbe dans son ensemble semble suggérer pour la représentation interne de la qualité morphologique de « courbure » un modèle d'élaboration perceptives qui repose sur des mécanismes définis par J.J. Gibson [GIB66] comme « écologiques ». Ce sont les mécanismes les plus immédiats, précoces et spontanés de notre réponse perceptives, ceux qui sont liés à l'interaction directe avec l'environnement en tant que systèmes « vivants ». Plusieurs facteurs semblent confirmer une telle hypothèse.

Premièrement, nous voulons mettre en évidence un résultat très significatif qui a émergé dans l'analyse de nos résultats: la loi mathématique capable de modéliser la variation de la sensation de courbure en fonction du rapport d'aspect est une fonction exponentielle (voir chap. II.1). Une fonction de telle nature correspond à la même loi mathématique (Loi de Stevens) que celle qui décrit la variation de la sensation de douleur, de force sonore, de goût. La courbure semble donc définitivement appartenir à l'ensemble des indices perceptives plus instinctifs, les indices qui concernent nos réactions dites « écologiques ».

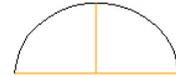
Deuxièmement, nous savons que notre système perceptif visuel présente une sensibilité extrêmement développée (une « hyper-acuité ») pour la détection de la courbure lorsqu'elle se différencie de la linéarité, c'est-à-dire pour identifier un arc comme courbe parmi des segments droits [WAT82].

Enfin, nous savons que la perception n'est pas du tout un processus passif d'enregistrement mais plutôt un processus constructif, ou actif, dans lequel l'action est déterminante pour l'organisation des mécanismes perceptives. Le chercheur A.Noë, par exemple, dans son ouvrage « Action in perception » [NOE04], soutient que « La perception n'est pas quelque chose qui se passe dans nous ou sur nous. Elle est quelque chose que nous faisons »<sup>2</sup>. Ce qui signifie que le mouvement a des effets sur la stimulation sensorielle, car l'expérience perceptives obtient son contenu à travers l'exercice d'un savoir pratique corporel. Par exemple, la référence à une action physique comme le pliage d'une barre pour la construction de la représentation interne de la sensation de courbure (que nous avons proposée dans le chap. II.1) est un exemple de l'influence possible de l'action sur la structuration perceptives. Le mouvement a donc une relation très étroite avec la perception. Des études

rapport d'aspect (ra) =  
flèche/corde



ra = 4



ra = 0.4



ra = 0.05

**Fig. 4** La valeur du *rapport d'aspect* décrit efficacement la *sensation globale de courbure* transmise par des arcs elliptiques selon une loi de proportionnalité directe (à l'augmentation du rapport d'aspect augmente le niveau de courbure perçue).

<sup>2</sup> « Perception is not something that happens to us, or in us. It is something we do. » [NOE04]

expérimentales récentes [FLA07] [FLA03] ont proposé l'existence de certaines courbes bien définies comme « primitives géométriques » dans les lois qui structurent notre mouvement, ainsi que celui de certains animaux. Il semblerait que notre système moteur (et donc, on peut supposer en se basant sur les études dont on vient de parler, notre perception aussi) est basé sur des lois morphologiques très claires et bien définies, dans lesquelles certaines caractéristiques géométriques de courbure ont une place appropriée et pertinente. Ça signifierait que notre cerveau est capable de reconnaître et de reproduire des courbes complexes selon des règles géométriques systématiques. Notre cerveau serait donc préparé pour être très sensible à la qualité morphologique spécifique de courbure. En particulier, les courbes « coniques » (principalement les paraboles et les ellipses) semblent détenir un rôle déterminant dans la structuration géométrique du système moteur [FLA07].

Nos données expérimentales ainsi que les études précédentes qu'on vient de citer semblent donc effectivement soutenir l'hypothèse que la courbure est élaborée par le système perceptif d'une façon instinctive, spontanée et universelle (c'est-à-dire très efficace du point de vue « écologique ») et que les courbes, et certaines courbes en particulier, pourraient faire partie des primitives géométriques de notre perception. Une telle hypothèse est renforcée par le constat spontané que les formes courbes sont dominantes (par rapport aux lignes droites, en particulier parallèles ou perpendiculaires) dans tout ce qui est naturel, organique ou vivant [Fig.5]. L'importance des indices morphologiques liés à la courbure, qui a été prouvé, par exemple, dans la reconnaissance des visages [LY000], renforce ce constat spontané.

Une telle interprétation symbolique des morphologies courbes semble partagée par la sensibilité artistique qui a toujours associée la courbe aux qualités *organiques* : des végétaux, comme dans le cas de l'art nouveau [Fig.6], des fluides, comme dans l'architecture organique, ou encore des animaux ou des êtres primitifs, comme dans l'architecture « troglodyte » de Antti Lovag [Fig.7]. A l'opposé, les formes linéaires, répétitives, basées sur une logique géométrique de parallélisme et de perpendicularité sont souvent associées à tout ce qui est machine, ou, en général à ce qui est « artificiel », comme les gratte-ciels, ou les usines, par exemple. Cette opposition entre *courbe/naturel, organique* et *linéaire/artificiel, mécanique* peut apparaître évidemment, comme assez superficielle, mais elle constitue quand même une intuition spontanée qui mériterait d'être approfondie. On ne va pas ici tracer une histoire de la forme courbe en architecture, ce qui nous semble par contre important c'est de rappeler ce lien « spontanée » qui est souvent tracé entre la forme courbe et tout ce qui est physique et naturel et qui semble soutenu par nos résultats expérimentaux. Des tels questionnements sont au centre des débats contemporains dans l'architecture Non-Standard, qui, entre autres sujets, se propose une interprétation innovante du rapport entre sujet et objet et entre corps et architecture. Les formes courbes sont choisies aussi en raison de cette hypothèse d'un rapport privilégié avec la « sensation » et non pas avec la « rationalité » [Fig.8].

### 1c. Quel modèle géométrique pour la structuration de l'espace perceptif ?

Pourtant, si nos résultats semblent proposer pour la courbure une place spontanée et universelle dans les mécanismes perceptifs, ils montrent aussi que, pour juger cette qualité « écologique » de courbure d'un objet dans sa globalité, le système perceptif pourrait effectivement s'appuyer sur des *indices linéaires*, la flèche et la corde. La linéarité, qui instinctivement est associée à l'abstrait ou à l'artificiel, possède au contraire un rôle fondamental dans la perception spontanée. Ceci peut s'expliquer par le privilège d'une ligne de fournir le parcours le plus direct entre deux points, ce qui permet d'exprimer une importante qualité spatiale et relationnelle avec une seule information, la position d'un segment droit. De plus, l'importance de l'horizontale (l'horizon du sol) et de la verticale (la direction de la gravité) est



**Fig. 5** La courbure est une caractéristique formelle des organismes naturels (végétaux et animaux).  
E.Weston, *Poivron n.35* (1930)



**Fig. 6** Art nouveau : esthétique des courbes.  
J.Lavirotte, *portail d'un immeuble, Paris* (1901)



**Fig. 7** La courbe comme habitat idéal.  
A. Lovag, *Maison Cardin, Miramar, France* (1975-89)



**Fig. 8** Les espaces courbes possèdent une « ambiance » spécifique.  
B.Doshi, *espace d'exposition GUGA, Inde* (1996)

largement prouvé dans l'élaboration perceptive. Dans ce cas, une question survient : est-ce que nous « linéarisons » toujours les courbes avec une sorte de « grille » orthogonale à travers laquelle nous jugeons les formes courbes ?

Souvent on explique l'origine de la géométrie euclidienne, la géométrie la plus élémentaire et la plus connue dans le monde occidental, comme le résultat d'une « rationalisation » de la perception spontanée du monde physique. La proximité de cette géométrie, qui est basée sur la linéarité (et sur le parallélisme et, en conséquence, la perpendicularité), à la perception spontanée pourrait suggérer que cette géométrie représente efficacement la structure organisationnelle de notre système d'élaboration perceptive. Le concept de distance, qui, évidemment, semble déterminant dans l'interaction d'un agent avec son environnement, est l'un des concepts fondamentaux de la géométrie euclidienne. Il décrit en fait un espace métrique et quantitatif. Pourtant, l'indépendance de l'échelle est l'une des qualités les plus importantes dans le choix d'un indice perceptif, en particulier pour les indices « écologiques ». Les résultats de notre expérience montrent clairement que l'indice le plus efficace pour décrire la sensation de courbure perçue est le *rapport d'aspect*, qui est une quantité *adimensionnelle*, donc *invariante par rapport à l'échelle* et non pas la flèche ou la corde, qui sont des indices « métriques » (ils ont une longueur). Un tel constat fait penser plutôt, pour la géométrie de l'élaboration perceptive, à une structure de type *affine*<sup>3</sup>, basée sur la *proportionnalité* linéaire plutôt que sur la métrique. La géométrie affine conserve la linéarité mais pas les distances. La *projection* d'une figure par rapport à un point est un exemple de transformation affine. L'importance des indices linéaires qu'on a retrouvée dans notre expérience s'adapte bien à une structure géométrique des mécanismes perceptifs qu'on pourrait définir comme « euclidienne », dans le sens qu'elle est basée sur la linéarité, le parallélisme et la perpendicularité comme caractéristiques de référence. En même temps, le fait que l'indice le plus significatif qu'on a retrouvé n'est ni la corde ni la flèche, mais le rapport d'aspect, qui est le rapport entre ces deux distances, donc une mesure linéaire mais adimensionnelle, renforce plutôt l'hypothèse d'une structure géométrique de type affine pour l'élaboration perceptive, ce qui est soutenu par plusieurs études précédentes [TOD01] [FLA07] [FOL04].

#### 1d. Expertise géométrique et sensation de courbure

La structure géométrique linéaire et proportionnelle qu'on propose pour la perception de la qualité formelle de courbure semble être partagée par tous les observateurs testés, sauf un, l'observateur expert BM, un ingénieur qui travaille sur la mécanique et la géométrie des formes complexes. Son élaboration perceptive de la courbure semble s'éloigner d'une approche « écologique » de la courbe dans sa globalité pour aller vers un'interprétation plus abstraite et locale, ce qui démontre que l'apprentissage, dont le résultat est une certaine expertise (dans ce cas, l'expertise dans la théorie et la pratique de la géométrie) a une influence déterminante dans la structuration perceptive. Le *jugement de l'observateur BM* considère de façon spécifique les propriétés locales par rapport aux globales : *la courbe qui donne la sensation de courbure la plus forte est celle qui présente la courbure analytique la plus uniforme, c'est à dire celle qui localement présente la même courbure dans tous les points de la courbe* [Fig.10]. L'expertise de l'observateur BM l'amène à évaluer plutôt le détail analytique que la globalité « écologique », car dans son expérience quotidienne les qualités analytiques sont les plus importantes. Ce résultat est une démonstration ultérieure du fait que notre perception n'est pas un processus

#### Experts et non-experts



#### Observateur BM



**Fig. 10** L'observateur expert BM juge la courbure perçue de manière locale et analytique : l'arc qui suscite la sensation de courbure la plus importante, selon lui, est celui qui présente la courbure analytique la plus constante, c'est à dire l'arc de cercle.

<sup>3</sup> La géométrie affine est un système géométrique dans lequel les notions de longueur et d'angle ne sont pas utilisables (par exemple, on ne peut pas comparer les dimensions mesurées par rapport à deux directions différentes). Le principe de colinéarité, au contraire, est fondamental : les lignes droite restent droites après une transformation affine.

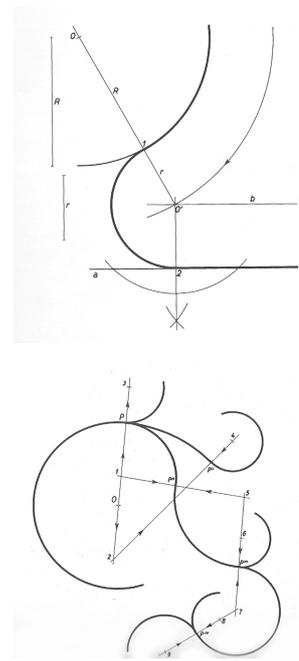
séquentiel d'enregistrement perceptif passif suivi d'une interprétation cognitive, mais elle est le résultat de l'interaction étroite d'opérations *contemporaines* de récolte (bottom-up, opérations ascendantes) et interprétation (top-down, opérations descendantes) des données perceptives. En outre, ce résultat nous fournit une mise en garde importante pour les situations dans lesquelles plusieurs experts sont appelés à collaborer dans un processus de conception spatiale: il se peut qu'une expertise spécifique ait une influence non pas seulement sur les objectifs, les méthodologies, les idées conscientes et les raisonnements des différents spécialistes, mais aussi sur leur interprétation perceptuelle spontanée, ce qui peut être à l'origine de certaines inefficacités dans la communication entre les concepteurs qui collaborent au même projet.

### 1e. Courbure et conception architecturale Non-Standard

Les résultats de notre expérience peuvent fournir des éléments significatifs afin de formuler des hypothèses opérationnelles sur le traitement perceptif des formes à courbure complexe pendant la conception spatiale en architecture et ingénierie. Deux questions en particulier nous semblent émerger comme les plus importantes : la première est celle de la relation entre les logiques perceptives et les logiques analytiques dans le traitement de l'information morphologique de courbure (qui renvoie à la question plus générale du rapport entre les qualités locales et les qualités globales) ; la deuxième est celle des logiques visuelles d'élaboration des formes qui peuvent être utilisées pendant la « morphogenèse » des formes à courbure variable dans l'architecture contemporaine Non-Standard.

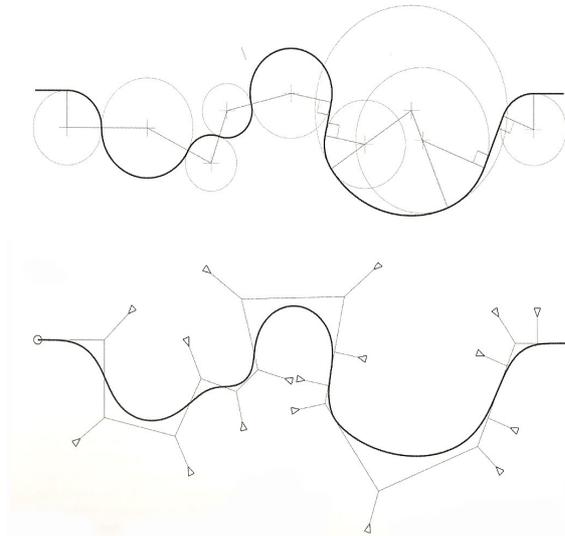
#### Structuration perceptuelle de la courbure et géométries paramétriques

Si notre système perceptif repose sur une logique géométrique dans laquelle les indices linéaires et les rapports dimensionnels sont fondamentaux, comme nos résultats semblent le montrer, les géométries de type paramétrique, à l'origine des formes nommées les « formes à pôles », comme les *NURBS* ou les *splines* (les géométries utilisées par les plus répandus logiciels de dessin) devraient être très proches de notre géométrie perceptuelle spontanée, ce qui en ferait des outils très efficaces pour la conception spatiale. Traditionnellement, les formes courbes des croquis étaient rationalisées, afin d'en permettre le contrôle analytique et donc la reproduction, à travers des arcs de cercle : l'information fondamentale dans ce cas est la position du centre et la dimension des rayons des cercles tangents [Fig.11]. Avec les courbes paramétriques il est possible de rationaliser des formes à courbure variable à travers des paramètres qui ne sont pas le diamètre de plusieurs cercles mais des points de contrôle, ce qui est plus simple et, par rapport à nos résultats, ce qui semble plus proche des mécanismes perceptifs spontanés [Fig.12]. Si la forme est modifiée en agissant sur la position et le poids d'attraction des points de contrôle, les stratégies d'élaboration formelle seront forcément très différentes de celles d'une modélisation basée sur l'approximation par des arcs de cercle, qui est la méthode utilisée par les outils de représentation analogiques, comme la géométrie descriptive. Ces deux méthodes (les cercles ou les points de contrôle) de représentation géométrique de la courbure variable présentent des différences fondamentales dans la logique d'élaboration mais aussi des différences relatives aux questions mettant en cause les aspects locaux et globaux. En agissant sur le rayon d'un des cercles on peut modifier une partie de la courbe localement (en détruisant potentiellement des continuités), alors qu'en agissant sur un certain point de contrôle la modification concerne la courbe dans son entier. Les outils numériques de représentation semblent donc appropriés pour élaborer des formes à courbure variable ; cependant, une limite importante de ces outils, en l'état actuel, est le fait que la véritable relation géométrique entre les actions sur les points de contrôle et le résultat géométrique et analytique sur les formes



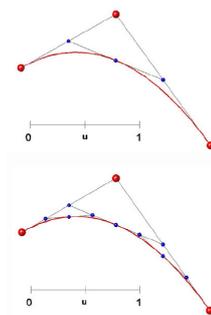
**Fig. 11** Méthodes pour dessiner les raccords entre arcs de cercle de rayon différent : la rationalisation des courbes complexes à travers des arcs de cercle requiert une bonne expertise géométrique et difficilement peut être réalisée de façon intuitive.

modélisées est absolument occultée par les algorithmes qui sont à la base des logiciels et donc absolument opaques pour l'utilisateur.



**Fig. 12** Différence entre la représentation de la même ligne courbe à travers des portions d'arc de cercle ou à travers des courbes paramétriques (*splines*). [LYN99]

Comme on a expliqué en détail dans le chapitre I.4, les outils virtuels introduisent cette barrière opaque entre les représentations sur l'écran et les images mentales associées aux qualités géométriques des formes. Dans un tel contexte, un vrai contrôle géométrique est très difficile, ce qui amène à des processus morphogénétiques qui reposent principalement (mais on pourrait dire exclusivement) sur les qualités figuratives, ou visuelles, car ces qualités sont les seules directement accessibles au concepteur, alors que celles analytiques sont « cachées » derrière dans la boîte noire du logiciel. La faiblesse du contrôle analytique et la prédominance des qualités visuelles instaurent inévitablement un décalage entre la morphologie et les questions constructives : si je ne peux pas connaître et maîtriser la géométrie exacte de la forme que je suis en train de concevoir, comment peut-je concevoir la façon de la réaliser matériellement? On revient donc aux arcs de cercle, qui sont un outil de représentation « pratique » car ils ont un lien direct avec la réalisation : pour dessiner un certain arc de cercle est suffisant d'avoir une ficelle et un point fixe, ou un compas, qui est un outil très répandu et facile à trouver et à utiliser.

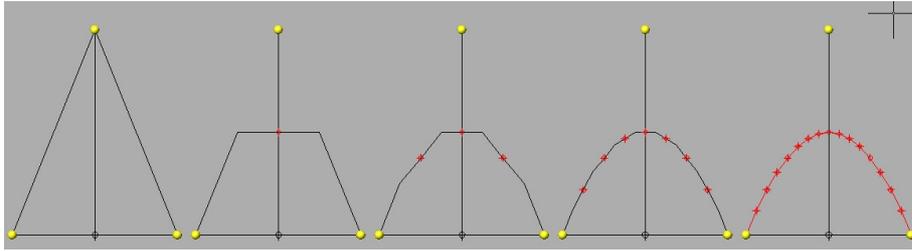


**Fig. 13** Les *p-formes* sont des courbes paramétriques qui permettent de représenter des formes à courbure variable en partant d'un concept géométrique très simple : les rapports entre les points milieux de deux segments. [image M.Bagnéris]

Un exemple intéressant de courbes paramétriques dont l'objectif est celui de combler ce décalage entre l'image, l'analyse et la réalisation, sont les *p-formes* [MAR04], développées au sein de l'équipe SLA par Alain Marty et implémentées par M. Bagnéris [BAG08] dans une thèse de doctorat en cours au LMGC. Le langage des *p-formes* constitue l'expérimentation d'un outil géométrique de modélisation et d'élaboration formelle transparente, dont les logiques analytiques sont simples, déclarées et donc capables d'être aisément gérées par les concepteurs. Il s'agit d'un outil qui permet de modéliser et manipuler des formes courbes, de gérer des changements continus de courbure en agissant sur des paramètres locaux de façon intuitive et contrôlable du point de vue analytique. Un lien direct entre une forme, sa représentation et ses caractéristiques analytiques est permis par le langage des *p-formes*. Une telle expérience constitue un exemple cohérent et innovateur dans le domaine de la modélisation numérique. Des formes extrêmement complexes peuvent être représentées à partir de la logique géométrique élémentaire des *p-formes* [Fig. 14].

Si on regarde les Fig. 13 et 14, qui décrivent la séquence de construction d'une courbe avec la méthode des *p-formes*, nous voyons clairement que l'information de départ ce sont trois points, ce qui nous rappelle évidemment la flèche et la corde utilisées par le système perceptif. Les *p-formes* semblent

donc fonctionner selon des mécanismes proches à ceux de notre système perceptif ; des ultérieures études seraient nécessaires pour vérifier la pertinence de cette hypothèse.



**Fig. 14** Les *p-formes* permettent de représenter des formes à courbure variable à travers des étapes successives d'approximation à partir de la position de trois points. [image M.Bagnéris]

Dans un tel contexte, nous pensons que des outils numériques de modélisation et représentation qui fonctionnent selon une logique géométrique proche de la logique perceptive, constituent une piste intéressante sur laquelle travailler afin de réaliser des interfaces numériques le plus proches possibles aux mécanismes cognitifs des utilisateurs humains. Les *p-formes*, dont le principe géométrique fondamentale est la simple relation entre deux segments, semblent effectivement proches des logiques perceptives que nous avons identifiées à travers nos résultats expérimentaux.

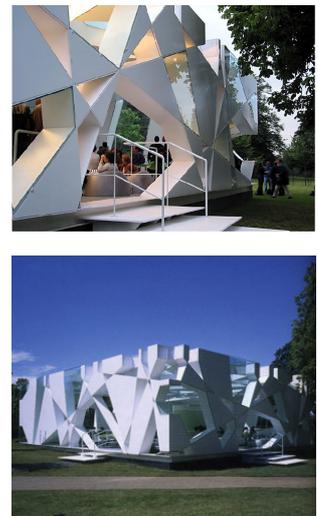
### III.1/ 2 LES FORMES NON REGULIERES

Dans la suite, nous allons discuter les résultats de notre deuxième expérience, qui concerne l'élaboration perceptive d'un objet tridimensionnel abstrait caractérisé par une configuration géométrique irrégulière [Fig.15]. La complexité formelle du simplex est essentiellement issue d'une opération géométrique de rotation, nécessaire à garantir la stabilité mécanique (tension active dans les câbles). On verra qu'une telle complexité est principalement perceptive et tout particulièrement visuelle, car, si on connaît certaines propriétés géométriques, procédurales (système de construction) ou mécaniques, la configuration spatiale d'un simplex est, au contraire, très simple.

#### 2a. L'élaboration perceptive des formes complexes

Les opérations d'appariement sont parmi les opérations le plus importantes dans l'apprentissage perceptif, c'est-à-dire dans la construction des représentations mentales des objets observés. Les opérations d'appariement multivoque sont utilisées, par exemple, pour mettre en relation des vues différentes d'un même objet pendant la construction de la représentation mentale dans le calepin visuo-spatial de la mémoire de travail. Pour accomplir ces opérations, les informations spatiales complexes sont traitées à travers la réduction à un minimum possible d'éléments, qui peuvent ainsi être gérés par les ressources limitées de la mémoire de travail. Une telle réduction fonctionne selon le principe des « regroupements » : plusieurs informations sont regroupées afin d'être retenues comme un seul élément, ce qui devient moins lourd en poids cognitif<sup>4</sup>. Les regroupements d'éléments formels sont définis « *regroupements morphologiques élémentaires de mémoire* »<sup>5</sup>, et ils représentent les constituants fondamentaux du processus de *reconstruction morphologique* d'une forme, qui est le processus qui nous amène à la construction de la représentation mentale tridimensionnelle d'un objet à partir des données perceptives indépendantes [DRE08]. Les informations spatiales complexes sur les formes complexes et non régulières, comme celle du simplex, doivent donc forcément être organisées par regroupements afin de permettre la construction d'une représentation mentale la plus légère et efficace possible. La question principale reste celle de savoir quels *descripteurs géométriques* seront choisis pour représenter de façon synthétique (en raison des limites de capacité de la mémoire de travail) et non ambiguë la configuration spatiale d'un objet sous les termes de relations géométriques entre les composants. Des tels indicateurs géométriques, comme on l'a expliqué dans le chapitre II.2, sont appelés *critères d'apprentissage perceptif* dans le domaine des sciences cognitives et *tracés d'éligibilité* dans celui de l'apprentissage des machines.

Des études expérimentales récentes concernant l'élaboration perceptive ont abouti à des théories qui proposent un modèle séquentiel de l'élaboration perceptive, dans lequel la première étape est la détection des contours [DEL03]. Dans une étape suivante, un nombre plus important de détails serait interprété pour comprendre les propriétés spatiales effectives de l'objet observé. Dans ce contexte, des études sur l'interprétation précoce des qualités formelles des objets, comme celles de D. Marr ou I. Biedermann, [BIE87] semblent prouver que les mécanismes plus immédiats d'analyse et reconnaissance formelle fonctionnent selon un principe de décomposition<sup>6</sup> en parties simples qui peuvent être mises en relation avec des formes tridimensionnelles élémentaires. Il existerait des primitives volumétriques



**Fig.15** Formes complexes : configurations spatiales non régulières.  
T.Ito+C.Balmond, Serpentine Pavilion, London (2002)

<sup>4</sup> Le poids cognitif représente la quantité de ressources de mémoire utilisée pour accomplir une tâche

<sup>5</sup> En anglais *Elementary Memory Morphs*

<sup>6</sup> La décomposition des formes complexes en composants élémentaires est basée au niveau formel sur l'identification des lignes de contour, des zones homogènes, des convexités [BIE87]

utilisées par le cerveau pour une première reconnaissance rapide de la forme globale de l'objet, qui serait rattachée à ces formes standardisées dont les qualités géométriques sont connues. I. Biederman, a appelé ces mécanismes perceptifs « reconnaissance par composants »<sup>7</sup> et il suppose l'existence d'un nombre limité de plus ou moins 60 composants élémentaires, qu'il appelle « geons » (contraction de « geometric icons », icones géométriques). Dans le cas des formes à haute irrégularité la stratégie de l'approximation ou décomposition en formes ou parties élémentaires simples ne semble pas très efficace, car les caractéristiques spatiales essentielles sont de l'ordre organisationnel plutôt que purement figuratif ou volumétrique [Fig.16].

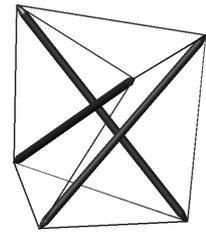


Fig. 16 Le simplex

## 2b. Traces d'éligibilité pour le « simplex »

Au niveau de l'élaboration perceptive visuo-spatiale (car dans notre expérience les sujets n'avaient pas d'autres informations sur l'objet), plusieurs hypothèses peuvent être faites sur le choix des descripteurs géométriques capables d'expliquer, le plus « légèrement » possible en poids cognitif, les relations spatiales réciproques à travers lesquelles les éléments indépendants d'un simplex peuvent être mis en relation entre eux pour constituer un objet tridimensionnel unitaire. La question la plus importante, dans le cas des formes irrégulières, est celle de construire une représentation unitaire de l'ensemble à partir des éléments indépendants, qui sont agencés dans l'espace de manière complexe. En se basant sur les lois d'organisation perceptive<sup>8</sup>, introduites par les psychologues de la « gestalt » et depuis largement vérifiées dans les mécanismes perceptifs visuo-spatiales [KAN80], nous proposons dans la suite des hypothèses sur les descripteurs géométriques qui nous semblent pouvoir être utilisés dans l'élaboration perceptive du simplex, c'est-à-dire dans la construction de sa représentation mentale dans le calepin visuo-spatial de la mémoire.

Dans les études récentes concernant les étapes précoces de l'élaboration visuelle, les composants élémentaires sont géométriquement définis par des solides élémentaires ; les prismes, par exemple, constituent une classe principale dans les formes identifiées par Biedermann [BIE87]. Dans le cas du simplex, si on suppose une première élaboration volumétrique de cette nature, on peut facilement identifier dans le prisme à base triangulaire la forme la plus simple capable de décrire son volume [Fig.17]. Une telle approximation, si elle est utile pour nous indiquer approximativement l'espace occupé par le simplex, ne fournit pas l'information géométrique la plus importante, la rotation de 30 degrés de l'une des bases triangulaires. Une simple opération géométrique de rotation relative entre les deux triangles rend la spatialité du simplex visuellement très complexe par rapport à celle du prisme, qui pourtant il lui ressemble beaucoup. La complexité visuelle du simplex est issue de sa configuration spatiale, qui fait que chaque vue d'un point d'observation différente est spécifique et difficile à mettre en relation avec les autres [Fig.4]. L'approximation à travers un prisme n'est plus pertinente, car dans plusieurs vues un tel volume est impossible à identifier. Les informations sur le volume, les contours, les régions homogènes ne fournissent pas d'indications pertinentes dans le cas du simplex. Les qualités spatiales spécifiques des structures architecturales complexes, comme les structures de tensegrité, requièrent des mécanismes d'élaboration de nature différente. Pour pouvoir comprendre la spatialité effective du simplex, il faudra donc avoir recours à des informations de nature plus élaborée, qui sont utilisées dans des processus d'élaboration cognitive qui vont bien au-delà de la simple perception. Il s'agit d'indicateurs géométriques capables de décrire avec précision la structure

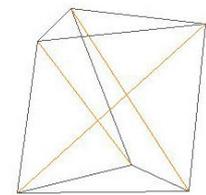
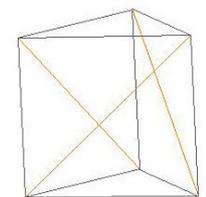
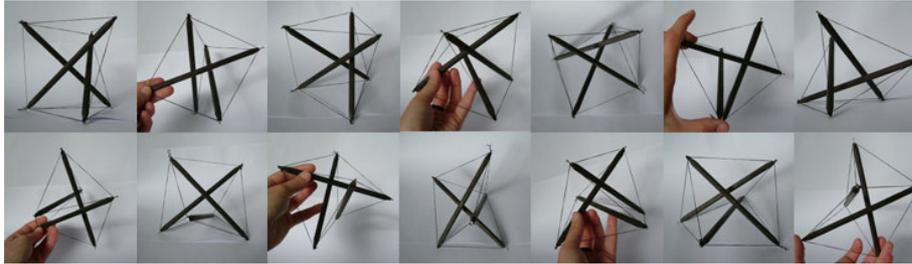


Fig. 17 Le simplex peut être associé, dans une première approximation « volumétrique », à un prisme de base triangulaire. Cependant la complexité spatiale et visuelle engendrée par la rotation de l'un des triangles apparaît évidente à travers la comparaison des schémas ci-dessus, qui proposent une image « volumétrique » d'un prisme avec des barres le long de ses cotés (en haut) et du simplex (en bas).

<sup>7</sup> "Recognition by components" [BIE87]

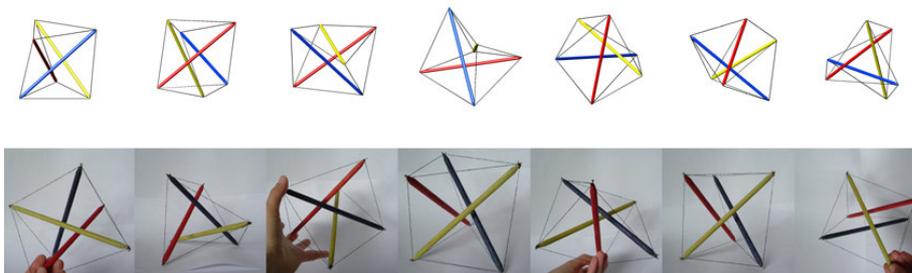
<sup>8</sup> Les lois de l'organisation perceptive expliquent les mécanismes de discrimination et d'organisation entre les éléments formels d'une image perçue.

organisationnelle géométrique entre les éléments : les *traces d'éligibilité géométrique*.



**Fig. 18** Vues différentes du simplex : l'approximation volumétrique avec un prisme « disparaît » aussitôt qu'on change de point de vue.

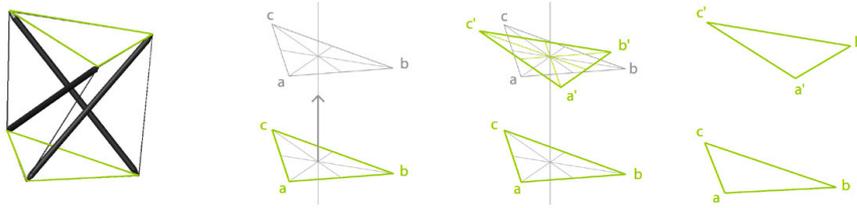
Sous l'aspect de l'organisation perceptive, les barres émergent, en raison de leur épaisseur, qui les rend forcément plus « prégnantes » que les câbles, presque transparents ; cependant, la position des barres dans l'espace est difficile à associer rapidement avec une quelconque forme « primitive » standard. Les câbles sont perceptivement plus faibles mais leur configuration géométrique les fait émerger : ils forment deux triangles (forme fermée, simple donc facilement identifiable), qui semblent égales entre eux (on verra que la symétrie est un facteur important dans l'émergence visuelle). Si on observe des vues multiples du modèle numérique ou de la maquette réelle il apparaît évident que les triangles émergent visuellement dans la complexité des configurations qui sont formées [Fig.18] et [Fig.19]. Nous avons retrouvé une confirmation ultérieure de cette hypothèse dans les entretiens avec les sujets suite à l'expérience, pendant lesquelles beaucoup d'entre eux ont cité les triangles comme l'une des formes les plus évidentes dans la structure. La position relative des deux triangles, qui ne sont pas l'un la projection de l'autre (comme c'est le cas dans le prisme) mais qui ont une rotation relative de 30 degrés, est sans doute remarquée par les observateurs.



**Fig. 19** Vues du modèle numérique et du modèle réel du simplex en couleur.

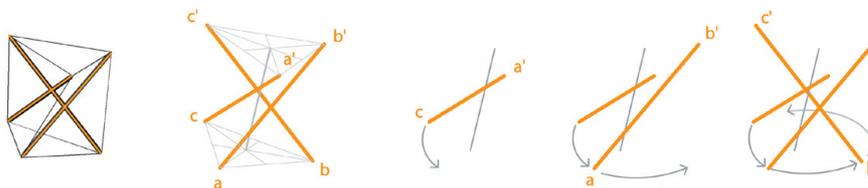
La reconnaissance des qualités géométriques exactes de cette relation (le fait qu'il s'agit d'une rotation et l'amplitude de celle-ci) n'est pas forcément évidente ni simple à saisir. Nous supposons que les observateurs sont capables de reconnaître que les deux triangles sont probablement équilatéraux, égaux entre eux (ils se ressemblent) mais que leur position ne résulte pas d'une simple translation (on perçoit que sur la « face supérieure » et sur la « face inférieure » les deux triangles n'ont pas la même orientation). Même si la qualification géométrique exacte de leur position relative échappe aux observateurs, nous supposons que ces deux triangles constituent un premier indicateur perceptif important pour permettre de « reconstruire » la forme dans la feuille de réponse [Fig.20].

On peut supposer que l'identification des triangles (et de la possibilité qu'ils soient des triangles équilatéraux) confirme l'hypothèse perceptive de la symétrie des barres. Les trois barres se ressemblent et elles semblent présenter la même position par rapport à un plan horizontal et par rapport aux triangles : si les deux triangles sont équilatéraux et égaux, alors il s'agit de la même barre répétée trois fois selon la même règle (symétrie d'ordre trois) [Fig.21].



**Fig. 20** La première trace d'éligibilité que nous identifions dans le simplex sont les deux triangles, qu'apparaissent équilatéraux et égales entre eux.

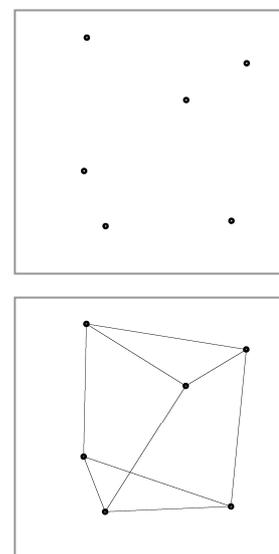
Les propriétés formelles comme la répétition ou la symétrie (dont le concept originaire est celui d'identité) sont des indices puissants dans les mécanismes d'organisation perceptive qui amènent à la reconnaissance des formes. Une donnée intéressante qui a émergé dans nos résultats peut être expliqué à la lumière de l'importance de l'indice géométrique « symétrie des barres » dans l'élaboration perceptive du simplex. Nous avons remarqué des performances légèrement plus lentes dans les essais avec l'objet en couleur : nous supposons que la couleur différente des trois barres peut avoir perturbé l'identification de la trace « symétrie des barres » [Fig.19], ce qui a engendré des temps d'élaboration plus longs et un nombre d'erreurs plus importantes que dans les essais avec l'objet d'une couleur uniforme.



**Fig. 21** La symétrie des barres constitue la deuxième trace d'éligibilité géométrique. La position relative des barres et des triangles (sommet a-b' ; b-c' ; c-a') est la troisième trace d'éligibilité.

Les deux triangles et les trois barres (probablement symétriques) constituent les éléments visuellement émergents du simplex. La structure relationnelle qui lie ces figures « émergentes » est l'élément critique qui manque pour décrire l'objet dans son ensemble. Notre troisième trace d'éligibilité est un indicateur organisationnel et non pas formel, qui est utilisé pour exprimer les liens entre des points et non pas les caractéristiques formelles des éléments (géométriquement on pourrait définir cette trace « topologique<sup>9</sup> ») : chaque barre relie le sommet d'un triangle et le sommet « suivant » de l'autre triangle (sommet a1/sommet b2 : a-b' ; b-c' ; c-a') [Fig. 21].

Nous supposons que cette troisième trace, qui n'est pas une trace figurative mais topologique, est la plus importante pour la reconstruction du simplex, car l'élaboration des formes complexes repose sur des processus cognitifs supérieurs, qui vont bien au delà de la perception. Dans nos résultats, une possible confirmation de cette hypothèse a émergé pendant l'analyse des variables secondaires : le cadre de référence « liaisons », qui présente explicitement aux sujets la figure des deux triangles, n'a pas eu d'effet positif sur les performances, par rapport au cadre « nœuds », qui présente exclusivement les positions des points de contact [Fig.22]. La présence « phénoménique<sup>10</sup> » effective de la figure des triangles n'est pas nécessaire, car l'information significative est l'information relationnelle ou « topologique », c'est à dire la position relative des sommets des trois triangles (et donc, des trois barres). La simple présence de trois points dans l'espace (dans la feuille de réponse « noeuds ») est suffisante au niveau perceptif pour nous faire élaborer automatiquement la forme triangulaire qui les relie et qui nous connaissons déjà. La structure relationnelle entre les trois barres et les triangles est donc l'information spatiale fondamentale pour



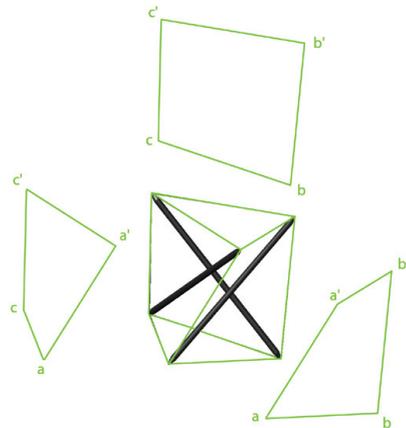
**Fig. 22** Feuille de réponse nœuds (en haut) et liaisons (en bas).

<sup>9</sup> La topologie s'occupe de faits géométriques que, pour être étudiés, n'ont pas besoin de concepts métriques (longueurs, angles) ni de concepts formels comme la droite ou le plan, mais uniquement d'un concept relationnel: la connexion continue entre des points. [HIL32]

<sup>10</sup> La présence « phénoménique » correspond à la réalité perceptive [KAN80] ; la réalité perceptive (ce qu'on voit) ne correspond pas toujours à la réalité physique : il y des situations où un objet n'est pas présent physiquement mais il l'est « perceptivement ».

la compréhension de la spatialité réelle du simplex, bien plus importante des qualités purement formelles ou figuratives.

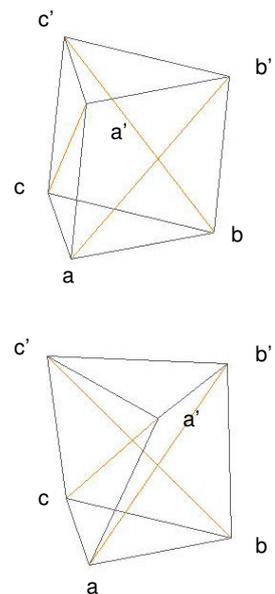
Enfin, on voudrait discuter d'un quatrième indicateur géométrique qui pourrait avoir une quelque influence sur l'élaboration perceptive du simplex : les trois polygones formés par les câbles [Fig.23], dont la forme varie fortement en fonction du point du vue [Fig.18 et 19].



**Fig. 23** Les polygones formés par les câbles sont un élément perceptif assez faible, mais ils peuvent transmettre une information déterminante sur une importante propriété spatiale du simplex (la rotation relative des barres).

Ces polygones constituent un élément perceptif assez faible, ils semblent disparaître perceptivement car peu épais et « annulés » par les triangles, qui « absorbent » deux de leurs côtés. Pourtant, ce sont effectivement ces polygones qui, à travers leur irrégularité sont capables de nous indiquer que les deux triangles n'ont pas simplement subi une translation entre eux, comme ça serait le cas avec un prisme à base triangulaire, où les polygones seraient réguliers, mais que leur positions réciproques dans l'espace sont plus complexes [Fig.23]. La « faiblesse perceptuelle » de cette trace qui serait capable de transmettre une information importante, explique bien les difficultés posées par l'élaboration perceptive des formes complexes, dans lesquelles les informations plus importantes au niveau organisationnel ne sont pas forcément les plus « prégnantes » au niveau visuel. Cette trace est plus faible aussi car elle n'est pas pertinente par rapport à la loi relationnelle, elle n'ajoute pas d'informations significatives. A ce point, nous avons l'impression de revenir au début : si on considère exclusivement la trace relationnelle (qui nous semblait la plus importante) le prisme et le simplex sont identiques. Et pourtant si on les observe, c'est bien évident qu'ils sont très différents [Fig.24]. Dans l'élaboration des formes non régulières les indices relationnels ou topologiques doivent forcément être couplés aux indices géométriques, car la complexité est bien organisationnelle mais elle est, principalement, de nature figurative et visuelle.

Nous avons donc identifié trois (plus un plus faible, les polygones) possibles descripteurs géométriques que nous supposons constituer les plus probables *traces géométriques d'éligibilité* pour le simplex : les deux triangles, la symétrie des barres et le lien organisationnel (sommet a1/sommet b2). Des tels indicateurs nous semblent permettre l'identification et l'apprentissage de la spatialité de cette structure, à travers le minimum d'information possible, à un sujet sans aucune expertise spécifique, pour lequel donc les seules informations accessibles sur les simplex sont exclusivement les informations spatiales et géométriques issues de l'observation directe. Le choix de traces différentes est certainement possible, des traces qui seraient plus efficaces en relation à d'autres qualités spécifiques. Par exemple, l'expertise (dans le cas du simplex, des connaissances apprises sur la géométrie ou la mécanique des structures en état de tenségrité) peut avoir une influence déterminante sur le choix



**Fig. 24** Le prisme et le simplex partagent la même structure relationnelle. Cependant, les qualités purement spatiales et formelles propres du simplex (géométriquement décrites par une rotation relative des deux triangles de 30°) font que, en réalité, les deux structures sont assez différentes dans les résultats spatiaux et figuratifs (dans leur « apparence »).

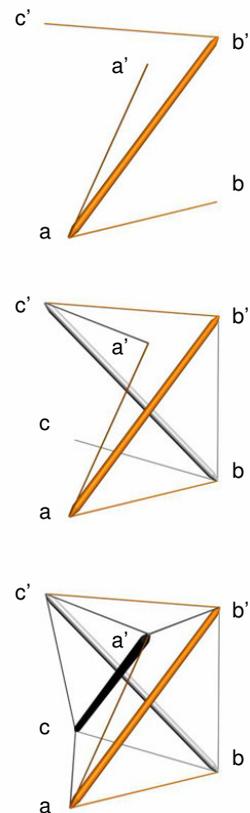
spontanée des traces d'éligibilité plus efficaces qui sont choisies pour construire la représentation mentale.

### 2c. Géométries complexes et expertise

Le choix des traces d'éligibilité géométrique (qui représentent la structure relationnelle spatiale de l'objet dans son ensemble) peut être modifié en profondeur, par exemple, par les connaissances apprises, c'est-à-dire par l'expertise dans un certain domaine. Ces connaissances peuvent concerner des propriétés organisationnelles, géométriques, ou bien des qualités qui ne sont pas directement formelles, mais qui peuvent résulter de questions liées à la mécanique, ou à la technologie constructive. Dans le cas du simplex, nous supposons que pour la plupart des sujets (experts ou non) les traces d'éligibilité choisies pour construire la représentation perceptive sont les mêmes (2 triangles, 3barres symétriques, relation barres/triangles). Evidemment celles-ci sont des traces purement qualitatives, issues des informations formelles et spatiales qui peuvent être apprises à travers l'exploration directe de l'objet. Pour les super-experts, qui travaillent avec ces structures depuis des années et qui donc possèdent des informations d'autre nature (géométrique, analytique, mécanique, constructive) sur le simplex, les traces d'éligibilité choisies pour se représenter de façon synthétique et univoque la forme spatiale du simplex sont tout à fait différentes. Pour le sujet RM, par exemple, qui est l'un des majeurs experts mondiaux dans le domaine des structures de tensegrité, les traces d'éligibilité sont construites d'une façon tout à fait spécifique. Pour lui, la géométrie du simplex dans son ensemble n'est pas représenté par les deux triangles + les trois barres symétriques + la loi organisationnelle a/b'. Elle est au contraire représentée avec une seule trace, qui contient elle seule toutes les informations nécessaires : la triple rotation d'un élément unique, constitué d'une barre orienté dans l'espace par rapport au sol et de trois câbles [Fig.25]. Evidemment pour pouvoir utiliser une telle trace il faut être familier avec certaines qualités géométriques qui permettent l'interprétation de ces informations partielles pour arriver à l'ensemble de la structure. Dans le cas du simplex, par exemple, il existe un rapport géométrique précis entre les angles formés par les barres et les câbles. Ce rapport résulte des caractéristiques analytiques, comme la longueur des éléments, ainsi que mécaniques et il est inaccessible à des observateurs non-experts, qui peuvent construire leurs traces en se basant exclusivement sur les indices formels pour comprendre la spatialité de l'objet et en construire une représentation mentale.

### 2d. Complexité géométrique et conception architecturale Non-Standard

Les traces d'éligibilité géométriques, dont nous nous servons pour construire la représentation mentale d'un objet, ont un rôle fondamental dans la conception architecturale, car on peut supposer qu'elles constituent la base cognitive du phénomène de l'« émergence visuelle », l'un des principaux moteurs créatifs dans l'élaboration d'une forme (voir chap. 1.2). On suppose que la structure « émergente » d'une forme en cours d'élaboration (bidimensionnelle ou tridimensionnelle) est construite sur la base des traces d'éligibilité géométrique, qui résultent des mécanismes d'élaboration perceptive. A travers la modification de cette structure émergente la forme est développée pour arriver à la configuration la plus satisfaisante possible. Dans la composition architecturale classique et moderne, basée sur la composition d'éléments simples, des théories comme celle des « geons » sont capables de bien modéliser la structure perceptive qui peut avoir guidé l'élaboration des formes. Dans le cas des formes complexes, constituées d'un agencement d'éléments qui ne peuvent pas être réduits à un nombre restreint d'éléments simples, mais sont bien représentées par une certaine structure relationnelle, des indices relationnels, ou topologiques, fournissent

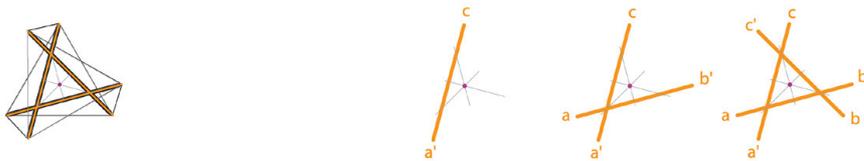


**Fig. 25** Trace d'éligibilité pour la reconstruction du simplex de l'observateur RM. En raison de la familiarité avec les propriétés géométriques et mécaniques des structures en état de tensegrité, il peut synthétiser l'information spatiale dans une seule trace : la triple rotation d'une barre et de trois câbles (un pour la nappe supérieure, un pour la nappe inférieure, un vertical).

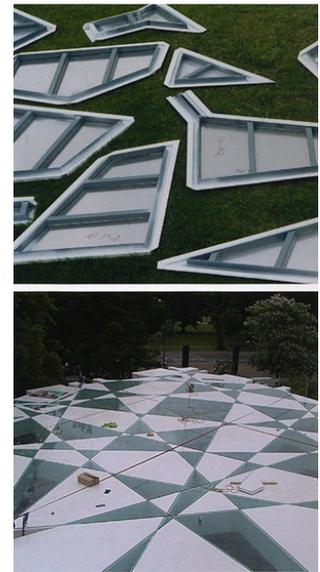
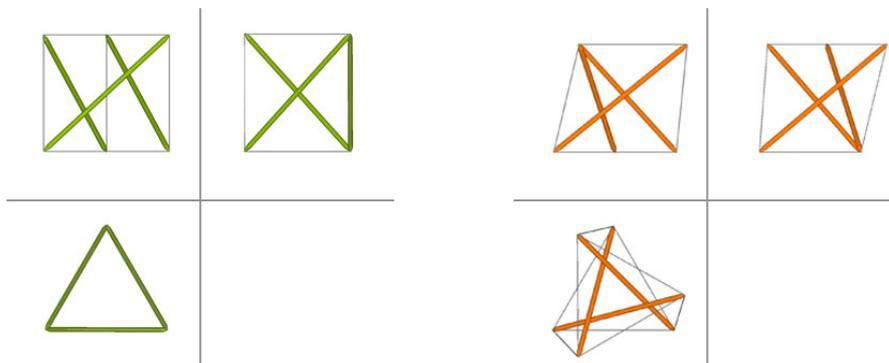
une structure sur laquelle agir pour l'élaboration. Comme on l'a expliqué dans le chapitre I.1, l'élaboration formelle Non-Standard est morphogénétique, topologique, les relations sont bien plus importantes des formes (le cube n'est que une des possibles configurations formelles qui connectent 6 points dans l'espace). Dans des processus d'élaboration perceptive des formes construites selon ces logiques, les traces d'éligibilité ont forcément un rôle déterminant.

Un autre questionnement soulevé par les formes complexes est celui de la représentation. En raison de la variabilité des propriétés géométriques en fonction du point de vue, les formes irrégulières et courbes posent un problème fondamental de représentation en relation avec les standards habituels de représentation architecturale, qui sont essentiellement basées sur les projections orthogonales, comme le plans et les coupes. Il ne faut pas oublier que les routines de représentation basées sur les plans et les coupes sont aujourd'hui fondamentales, tant pour les aspects constructifs (mise en œuvre) que administratifs (concours ou autorisations, par exemple).

L'une des caractéristiques de la complexité formelle qui émerge en relation au problème de la représentation « standard », qui est basée sur la projection sur un plan<sup>11</sup>, est l'absence de surfaces planes particulièrement significatives par rapport aux qualités spatiales des formes. La conséquence est que la projection sur un plan significatif, comme le plan horizontal qui coupe les murs verticaux pour décrire un plan, est très difficile, car il n'y a pas forcément un plan plus significatif des autres. Un exemple de ce constat est l'image du simplex qu'on obtient si on le pose sur un plan et si on se positionne de façon perpendiculaire à ce plan [Fig.27].



De ce point de vue, on voit apparaître des triangles qui n'existent pas dans l'espace physique, mais qui sont des simples figures issues de la projection des éléments 3d sur un plan. Reconstruire les effectives qualités spatiales d'un simplex en se basant exclusivement sur cette image serait presque impossible : pour reconstruire la spatialité effective des formes complexes sont nécessaires plusieurs vues différentes. Au contraire, dans le cas d'objets réguliers, comme un prisme à base triangulaire avec des barres le long des diamètres sur les côtés [Fig. 28], les projections orthogonales se révèlent très efficaces : synthétiques et univoques.



**Fig. 26** Configurations géométriques irrégulières dans l'architecture Non-Standard. T.Ito+C.Balmond, *Serpentine Pavilion, London (2002)*

**Fig. 27** « Plan » du simplex (projection orthogonale) : vue verticale par rapport à un plan sur lequel repose l'une des « bases » triangulaires du simplex.

**Fig. 28** Comparaison des projections orthogonales sur un plan d'un prisme à base triangulaire (à gauche) et d'un simplex (à droite) : la forme complexe du simplex rends très difficile la compréhension de la spatialité à partir des vues de cette nature (standards de la géométrie descriptive : plan, coupe, façade) ; celle du prisme, au contraire est bien représenté à travers ces standard de représentation.

<sup>11</sup> Projection perpendiculaire –comme dans les projections orthogonales et dans l'axonométrie ou projection centrale –comme dans la perspective

Les formes complexes de l'architecture Non-Standard sont évidemment inadaptées à être représentées à travers des tels standards : le développement d'outils et méthodes de représentation plus efficaces dans le contexte des formes complexes est une nécessité importante pour la conception, mais surtout pour la réalisation des formes complexes à grande échelle. La mise en œuvre d'ensembles complexes d'éléments tous différents entre eux et liés par une structure relationnelles complexe et rigide (chaque élément a une place bien définie et pas modifiable) [Fig.26], requiert des représentations extrêmement claires et univoques pour que les constructeurs puissent agencer les éléments dans l'espace de la façon prévue par le concepteur. Le traitement perceptif des données formelles complexes, pendant la conception et la construction des architectures Non-Standard, repose sur des mécanismes perceptifs de la même nature de ceux que nous avons identifié pour le simplex. La transmission efficace d'informations constructives peut être notablement améliorée en connaissant les logiques géométriques qui structurent, par exemple, l'élaboration des traces d'éligibilité : il est à travers des traces de cette nature qui est possible accomplir les opérations d'appariement multivoque entre les représentations 2d et les objets 3d de l'espace physique. Il s'agit évidemment d'opérations cognitives fondamentales pendant les processus de construction.



III. 2

OUTILS DE REPRESENTATION ET  
FORMES COMPLEXES

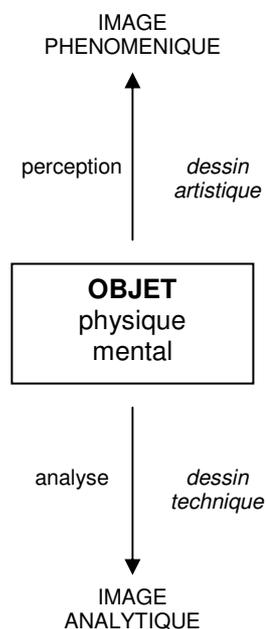


### III.2/ 1 LE DESSIN ET L'ELABORATION PERCEPTIVE

Dans le cadre de la conception en architecture et ingénierie, on définit comme *outils de représentation* tous les moyens utilisés pour modéliser les qualités formelles et géométriques des objets en voie de conception. Les outils de représentation les plus importants dans la conception spatiale, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre I.2, sont le dessin et les maquettes. Le dessin, en particulier, détient un rôle déterminant dans les processus de conception et réalisation architecturale, depuis les premiers croquis conceptuels jusqu'aux plans pour la construction. *Le dessin est la représentation des qualités spatiales tridimensionnelles d'objets et d'espaces sur un support bidimensionnel* ; une telle définition évidemment recouvre un très grand nombre de méthodes et techniques différentes entre elles, comme les croquis, la perspective, les axonométries, parmi d'autres. Le dessin présente une relation très étroite avec les mécanismes perceptifs, car *représenter* signifie littéralement « présenter à nouveau », c'est-à-dire susciter la même sensation à travers un dispositif qui remplace un stimulus réel absent (il s'agit du même sens que dans l'expression « représentant diplomatique »). Dans le cas du dessin à vue, par exemple, on considère qu'un dessin est bien réussi s'il donne les mêmes sensations visuelles que celles générées par l'objet qu'il représente. Evidemment la précision représentative n'est pas une qualité toujours nécessaire, au contraire les qualités « prédictives » qui caractérisent le dessin constituent l'un de ses majeurs atouts : le pouvoir de visualiser ce qu'on imagine et qui n'existe que dans notre monde mental, ce qui est fondamental dans le développement d'une idée spatiale.

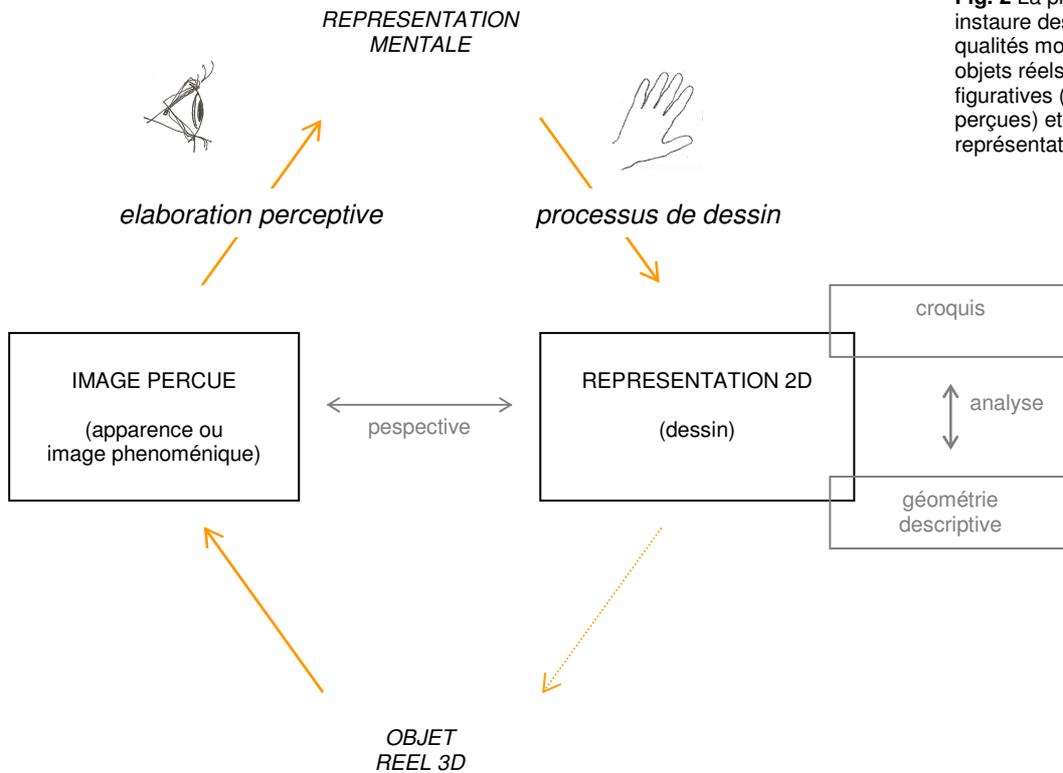
#### 1a. Dessin et opérations cognitives

D'un point de vue cognitif, l'action de dessiner peut activer plusieurs mécanismes cognitifs fondamentaux. En particulier, nous supposons que le dessin « artistique », c'est-à-dire le dessin à main levée ou le dessin à vue, peut développer une prise de conscience, donc une exploitation, des activités ascendantes (« bottom-up ») dans l'élaboration perceptive des formes et des espaces : l'exercice du dessin du vrai apprend à reproduire les images que l'on reçoit de l'environnement exactement comme on les reçoit, sans transformation ultérieure. Dessiner du vrai à main levée signifie donc reproduire l'image « phénoménique » (l'image qui arrive à nos sens) du monde externe : plusieurs artistes ou enseignants de dessin définissent l'expertise dans le dessin à vue comme une habilité à « voir » différemment [EDW79]. Inversement, la pratique du dessin géométrique semble développer plutôt les activités descendantes (« top-down ») dans l'élaboration perceptive, en nous apprenant à analyser et manipuler abstraitement les formes à travers leurs caractéristiques analytiques [Fig.1]. La pratique du dessin semble donc pouvoir améliorer notre transformation des données visuelles figuratives tant dans les processus perceptifs ascendants (avec le dessin du vrai) que descendants (avec le dessin géométrique), ce qui peut amener à une meilleure compréhension des relations entre les informations perceptives visuelles sur les objets et leurs caractéristiques physiques réelles associées [Fig.2]. Cette distinction nette entre dessin artistique et dessin technique est évidemment arbitraire et n'a comme seul but de mettre en évidence les caractéristiques spécifiques dont nous avons parlé. Dans la réalité, en fait, pendant un processus de dessin les données perceptives sont simultanément élaborées et enrichies avec les données analytiques : comme dans l'élaboration perceptive, les opérations « ascendantes » et « descendantes » interagissent constamment. Des études récentes ont démontré par exemple, que l'acte de dessiner active plusieurs zones importantes dans les deux hémisphères du cerveau [HAR06]. En raison de ce



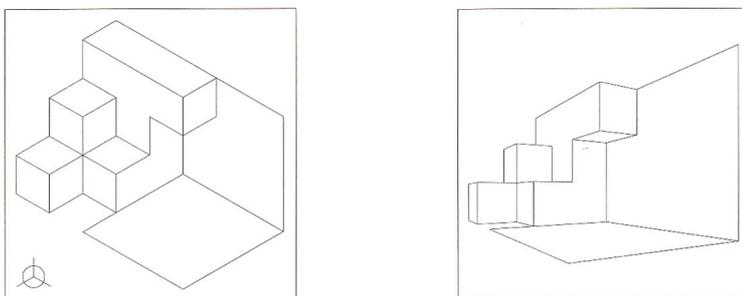
**Fig. 1** Nous avons défini «dessin artistique » la reproduction de l'image des objets qui arrive à nos sens et « dessin géométrique » la représentation des objets à partir de leurs caractéristiques analytiques (dimensions, angles, etc.).

lien important entre le dessin et les mécanismes cognitifs (en particulier l'élaboration perceptive) nous supposons que la représentation mentale d'un objet sera plus complète et plus cohérente après l'avoir dessiné et que donc en dessinant nous enrichissons la qualité et la précision de notre réservoir de représentations mentales.



**Fig. 2** La pratique du dessin instaure des liens entre les qualités morphologiques des objets réels, les qualités figuratives (les images perçues) et les représentations mentales.

On peut supposer que chaque typologie de dessin (une axonométrie ou une perspective, par exemple) peut créer des représentations mentales différentes du même objet, sur la base de la nature spécifique des informations qu'il transmet [Fig.3]. En particulier, dans ce contexte, la *perspective*<sup>1</sup> détient un rôle fondamental, car elle fournit un lien direct entre les données perceptives et les données analytiques: elle permet en fait, à partir des qualités géométriques d'un objet (largeur, longueur, hauteur, etc.), en suivant certaines lois mathématiques de projection, de reproduire un objet tel qu'on le voit.



**Fig. 3** Chaque typologie de représentation bidimensionnelle transmet des informations différentes : par exemple, dans la géométrie descriptive, l'axonométrie isométrique (gauche) transmet une information directe sur les dimensions des objets représentés, alors que la perspective (droite) transmet des informations sur l'apparence qui pourraient avoir ces objets si ils étaient devant nous. [SCO94]

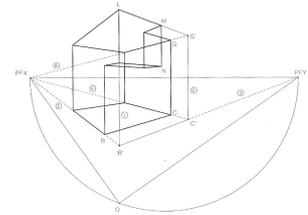
De la même façon, la technique de la « restitution par perspective inverse » permet, à travers l'application d'un ensemble de règles géométriques de projection, de reconstruire les qualités analytiques d'un objet ou d'un espace en partant de son image en perspective (comme par exemple une

<sup>1</sup> Nous appelons « perspective » la méthode de représentation basée sur le principe de projeter les points significatifs d'un objet sur un plan, en utilisant comme centre de projection un point.

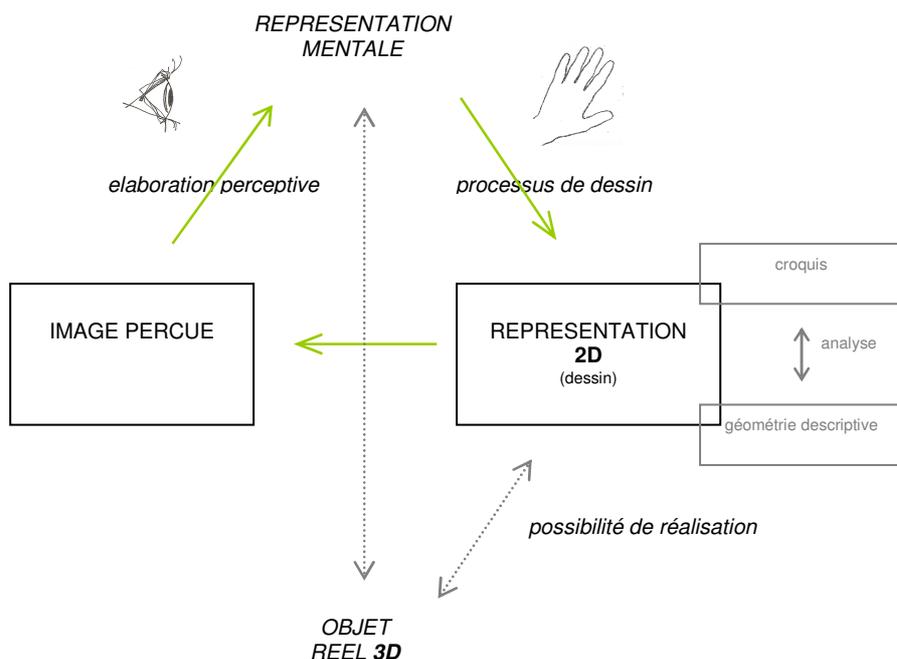
photographie) [Fig.4]. Pour un souci de précision, il faut rappeler que du point de vue des lois de l'optique, notre vision n'est pas vraiment linéaire et plane comme supposent les logiques de la perspective. Pourtant, cette méthode fournit une approximation suffisamment précise pour construire, par exemple, les « trompe l'œil », qui, s'ils sont observés à partir d'un certain point de vue, peuvent donner l'illusion d'une véritable tridimensionnalité à travers une simple image 2d. On ne va pas discuter ici le rôle de la perspective dans la conception spatiale, ce qui nécessiterait de longs développements, mais il nous semble important de rappeler la position dominante qu'elle a eu dans la culture artistique occidentale et dans l'architecture en particulier, depuis son « invention », pendant la période s'écoulant de la Renaissance, jusqu'aux nos jours [PAN27].

*1b. La pratique du dessin et l'apprentissage des relations 3d/2d : une expertise spécifique à la conception spatiale*

En particulier, dans l'éducation architecturale, la formation au dessin est considérée comme fondamentale, car à travers la pratique du dessin (tant artistique que technique) elle permet de développer l'expertise dans la définition géométrique des qualités morphologiques des objets du monde physique que l'on observe ou que l'on tente de faire naître pendant la conception. De plus, plusieurs études [SIN96b] ont démontré l'importance, dans la structuration perceptive, des relations apprises entre certaines propriétés morphologiques tridimensionnelles des objets et les figures qui sont la projection de ces propriétés sur un plan bidimensionnel. *Les outils de représentation sont des techniques qui permettent de gérer cette relation (3d/2d) à travers les lois géométriques de la projection.* Le dessin est l'un des outils de représentation fondamentaux dans la conception spatiale. *La gestion optimale du rapport entre les qualités tridimensionnelles du monde physique et leur projection en deux dimensions est l'une des principales compétences qu'on peut acquérir à travers la pratique du dessin.* L'apprentissage du dessin, en fait, n'est pas seulement l'apprentissage d'un ensemble de méthodes mais, comme on l'a expliqué dans le chap. 1.2, elle est aussi, et surtout, la construction de ce qui, en latin, est défini comme l'« habitus » cognitif [SCO94].



**Fig. 4** La technique géométrique de la « restitution par perspective inverse » permet de reconstruire les caractéristiques analytiques (dimensions, angles, etc.) des objets en partant d'une image (comme par exemple une photographie). [SCO94]

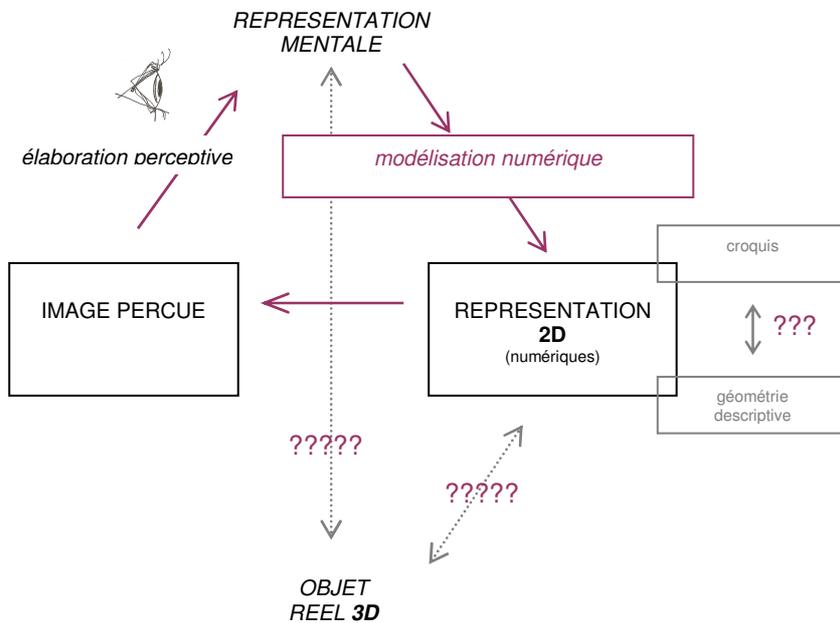


**Fig. 5** Pendant la conception spatiale (flèche verte) la représentation 2d est l'intermédiaire fondamental entre les représentations mentales des objets en voie de conception et les qualités morphologiques tridimensionnelles que peuvent effectivement avoir les objets dans l'espace physique. La pratique du dessin permet d'acquérir une expertise dans la gestion des relations entre objet réel 3d, image perçue et représentation 2d (flèche orange). Pour cette raison la pratique du dessin est centrale dans l'éducation des concepteurs en architecture et ingénierie.

C'est à dire que l'apprentissage et (avant tout !) la *pratique du dessin* ont une *influence importante sur la nature de la structuration perceptive*, en nous apprenant à mettre directement en relation certaines figures 2d avec les formes 3d correspondantes, dont elles sont la projection [Fig.2]. *En raison de son expertise et de sa familiarité avec les méthodes de représentation, on peut donc affirmer que la gestion optimale du rapport entre les qualités spatiales tridimensionnelles des objets réels (ou en voie de conception) et les représentations figuratives bidimensionnelles correspondantes est l'une des expertises spécifiques de la pensée du concepteur spatial (architecture, ingénierie, design industriel)* [Fig.5]. Une illustration possible d'un tel mécanisme peut être identifiée dans nos résultats sur la résolution de problème. Dans notre expérience, la tâche la plus simple était celle de l'appariement biunivoque 2d-2d, qui consiste en l'observation d'une image 2d suivie par la reproduction de certains éléments de cette image (dans notre cas, les barres) sur une feuille de réponse qui en présente une partie (par exemple, les nœuds). Sur cette tâche, les sujets experts, qui seraient censés l'accomplir sans aucun doute possible (c'est une opération directe qui ne requiert aucune transformation des données perceptives), ont eu des temps d'élaboration légèrement plus longs que les non-experts. Nous expliquons un tel résultat par cet « habitus » acquis avec la pratique du dessin, qui fait que les concepteurs experts élaborent automatiquement des informations tridimensionnelles en regardant un simple dessin en deux dimensions, comme ils ont l'habitude de faire en observant et en produisant des dessins d'objets et espaces 3d pendant la conception. L'élaboration « automatique » des informations 3d est troublante pour la résolution de la tâche proposée, car l'information 3d n'est pas nécessaire, mais elle est quand même opérée par les experts, ce qui induit une lenteur relative de la performance.

### III.2/ 2 LES OUTILS NUMERIQUES DE REPRESENTATION

La diffusion des outils de représentation numérique dans la conception spatiale soulève des questionnements sur le développement des compétences dont on vient de parler (capacité de gérer efficacement le lien entre 2d et 3d). *Le danger de l'utilisation extensive des images numériques* semble être celui de perdre de vue la relation entre les images générées et la spatialité tridimensionnelle de ce qui est représenté [Fig. 6], pour laisser la place à l'abstraction formelle et à la *prédominance de la pure figuration par rapport à la représentation*. Cependant les outils numériques présentent un atout fondamental qui est celui de permettre la visualisation d'objets analytiques très complexes, qui seraient impossible à représenter à la main : ce n'est pas par hasard que le souhait de réaliser des formes complexes en architecture ait abouti dans l'« époque numérique » contemporaine, qui a fourni les outils pour enfin modéliser et visualiser des formes complexes autrefois impossibles à représenter et donc, encore moins, à réaliser.



**Fig. 6** Le outils numériques introduisent une « couche » opaque entre les qualités géométriques des représentations mentales, des représentations 2d et des objets réels (existant ou à réaliser).

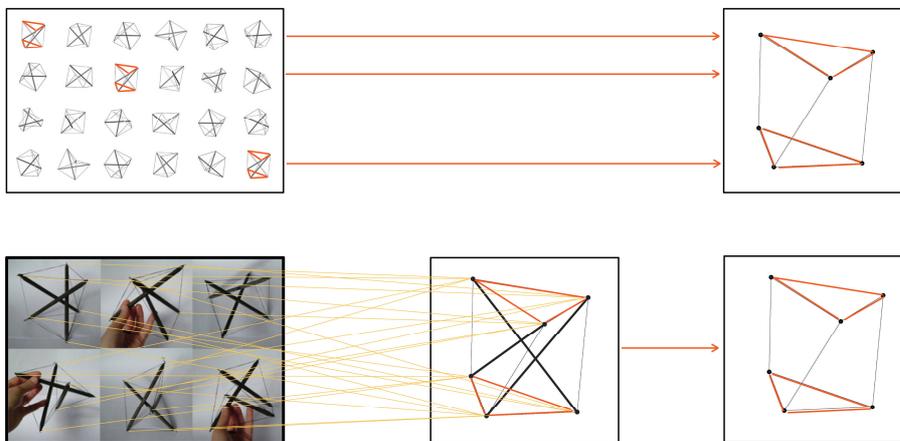
Dans ce contexte, il ne faut pas oublier que les outils de dessin numériques sont de nature extrêmement différente entre eux (voir chap. 1.2). Par exemple, nous pouvons supposer que l'utilisation d'un logiciel comme « Autocad » implique des processus d'élaboration cognitive qui sont assez similaires à ceux de la géométrie descriptive, avec la différence que le lien entre les informations en 2d et en 3d est construit à travers l'ordinateur et non pas directement par le « cerveau » du dessinateur, ce qui, à notre avis, provoque déjà une rupture importante dans la cohérence entre ce qui est représenté et l'image mentale qu'on en dérive. Plus encore, les logiciels de modélisation et animation 3d (par exemple, « Maya » ou « Rhino ») sont basés sur des opérations cognitives similaires à celles du croquis, avec la différence fondamentale, par rapport au cas analogique, que les formes esquissées en 2d sur l'écran sont directement transformées en objets géométriques 3d par les algorithmes du logiciel et donc, d'un façon plus marquée encore qu'avec Autocad, la cohérence entre ce qui est représenté, ses qualités géométriques effectives et l'image mentale qu'on en a, n'est ni directe ni évidente.

Ce qui nous semble donc le plus important, d'un point de vue cognitif, est d'identifier le genre d'indices géométriques pour la construction de représentations mentales d'espaces et objets tridimensionnels qui peuvent transmettre les images virtuelles, forcément en deux dimensions car sur un écran. Les résultats de notre expérience avec le simplex semblent montrer que le virtuel est capable de mettre à disposition des indices plus efficaces que l'objet réel afin de résoudre une tâche visuelle en requérant le dessin de certains éléments d'un objet abstrait à forme complexe.

## 2a. Outils numériques et « réalité augmentée »

Les résultats de notre expérience (voir chap. II.2) sur la résolution de problème dans le domaine spatial semblent démontrer qu'une représentation virtuelle numérique est plus efficace qu'une maquette réelle physique pour transmettre certaines informations morphologiques et spatiales (réponses plus immédiates et avec moins d'erreurs). On pourrait donc affirmer que le virtuel est une « réalité augmentée », car il permet, dans un intervalle limité de temps, la transmission d'un nombre d'informations plus important, ou plus significatives, par rapport à un objet réel.

Cependant, il ne faut pas oublier, car c'est fondamental, que la tâche proposée dans notre étude est une *tâche visuelle* : un dessin à réaliser sur un support 2d ; les indices déterminants pour l'accomplir sont donc forcément des indices bidimensionnels. Nous croyons que les résultats de cette expérience doivent être interprétés en relation avec la spécificité de la tâche proposée. *Le virtuel peut être donc effectivement considéré comme une « réalité augmentée », car il permet la transmission d'un très grand nombre d'informations potentiellement significatives dans un certain intervalle de temps, mais ces informations sont des informations de nature forcément visuelle, c'est-à-dire bidimensionnelle [Fig.7].*



**Fig. 7** Les outils virtuels peuvent être considérés comme « augmentés » dans l'efficacité de la transmission des informations spatiales ; cependant ces informations sont exclusivement bidimensionnelles. Dans la tâche proposée par notre expérience, par exemple, les images virtuelles sont plus efficaces car elles permettent l'appariement biunivoque direct entre des images qu'on a observé sur l'écran (parmi plein d'autres) et l'image proposée dans la feuille de réponse. Avec la maquette réelle, une transformation des informations tridimensionnelles en image 2d est nécessaire pour reconnaître l'image bidimensionnelle proposée dans la feuille de réponse.

Dans le cas de la conception en architecture et ingénierie, dont le but est la réalisation matérielle des objets conçus, même si les représentations 2d détiennent un rôle très important pendant l'élaboration spatiale, l'élément effectivement fondamental pour le résultat (qui est l'objet réalisé) est la pertinence des liens entre ces représentations en 2d et l'effective spatialité 3d des objets représentés, qui doivent être construits.

Un exemple qui semble démontrer avec évidence les limites du visuel dans la compréhension de la véritable morphologie tridimensionnelle des objets et des espaces en voie de conception est celle des *maquettes architecturales*. Nous savons que, dans le domaine de l'architecture, les dessins ont une place fondamentale dans la conception spatiale; cependant, nous savons aussi que les maquettes tridimensionnelles à l'échelle détiennent un pouvoir remarquable et très spécifique dans la transmission efficace des informations

sur l'unité tridimensionnelle d'un objet ou d'un espace, un pouvoir bien plus fort que n'importe quel dessin.

A partir des témoignages d'enseignants des écoles d'architecture nous savons, par exemple, qu'une structure est représentée dans la pensée des étudiants de façon beaucoup plus puissante après l'observation et la manipulation d'une maquette réelle qu'après l'observation d'un dessin ou d'un modèle numérique. Par exemple, dans une classe d'étudiants en architecture de Me Liapi de l'université de Patras (Grèce), les étudiants qui ont exploré la maquette d'un simplex peuvent se souvenir de ses qualités spatiales effectives des mois après l'exploration, à la différence de ceux qui ont observé des dessins 2d ou des modèles numériques, et qui n'ont pas gardé une représentation mentale claire de la morphologie effective de l'objet. Une preuve ultérieure de la « faiblesse » des représentations numériques bidimensionnelles dans la transmission directe d'informations spatiales efficaces est une expérience conduite récemment par des chercheurs de notre équipe (B. Dresp, F. Georges et J. Boumenir), dans laquelle la tâche à accomplir par les sujets consistait à reproduire un certain parcours après l'avoir exploré dans une série continue de vues virtuelles [GEO09]. Les résultats obtenus semblent montrer l'absence d'une correspondance univoque et directe entre les qualités spatiales des images numériques 2d et celles de l'espace physique réel. Dans ce cas, en particulier, la question du rapport entre la distance perçue dans les images virtuelles et la distance réelle semble constituer l'un des problèmes les plus importants. Un autre témoignage intéressant sur ce sujet est celui de C. Shea [SHE04], qui travaille au développement de logiciels paramétriques de génération de forme pour l'architecture, qui est donc très positive vis-à-vis de l'utilisation du numérique dans la conception spatiale. Pendant son expérience de réalisation d'un prototype à l'échelle 1 d'une forme complexe générée par le logiciel, elle admet que certains aspects de la spatialité réelle ne sont pas vraiment compris (malgré toutes les vues différentes 2d qu'il est possible d'obtenir sur l'écran) jusqu'au moment où l'objet est effectivement construit, c'est-à-dire physiquement présent. Vers la fin de la construction, par exemple, elle et son équipe ont remarqué qu'une partie de la structure, qui dans le modèle numérique semblait avoir certaines caractéristiques de « couverture » de l'espace, dans la réalité transmettait plutôt une sensation d'« ouverture », ce qui a donné l'envie de changer le projet. Le gros atout des outils numériques employés pour la conception est qu'ils ont permis d'effectuer un tel changement en temps réel, chose qui serait été impossible avec des outils analogiques comme la géométrie descriptive « à la main et à l'équerre ». Dans le cas de la conception architecturale, et en particulier dans l'architecture Non-Standard, l'utilisation presque exclusive des outils numériques virtuels pour la génération des formes ne peut pas négliger les spécificités des informations morphologiques et spatiales qui peuvent être effectivement transmises par les représentations numériques sur les écrans, le danger étant celui d'obtenir des architectures qui sont essentiellement des images, ou, dans les « meilleurs » des cas, des icônes visuelles.

## *2b. Outils numériques, formes complexes et conception*

Le potentiel des outils numériques dans la conception spatiale des formes complexes est donc important, surtout pour ce qui concerne la modélisation (géométrique, mécanique, physique, etc.). Dans ce cadre, deux qualités sont particulièrement significatives: d'abord, les outils numériques permettent la visualisation de formes analytiquement très complexes, qui seraient impossibles à représenter à la main; deuxièmement, ils donnent la possibilité de modéliser un nombre presque infini de solutions virtuelles différentes, qui peuvent être retenues et confrontées (ce que nous avons appelé « pouvoir imaginaire »). Cependant, à la lumière du constat que nous venons de faire sur la nature forcément bidimensionnelle des informations spatiales transmises par les images sur écran, il faut faire attention à

l'ambiguïté possible dans l'interprétation de ces images. En particulier dans le cas des formes complexes, plusieurs facteurs peuvent rendre difficile cette interprétation. Par exemple l'absence de formes élémentaires et rectilignes rend difficile l'utilisation des indices linéaires de la perspective, ce qui augmente l'ambiguïté. Afin de limiter cette ambiguïté et de transmettre des informations spatiales claires et univoques, l'utilisation efficace des indices visuels disponibles dans les images bidimensionnelles sur les écrans est nécessaire quand on travaille avec les modèles numériques. Dans le cas des processus multidisciplinaires, pendant lesquels le même modèle numérique est utilisé par différents spécialistes, par exemple, l'univocité des informations morphologiques transmises par les représentations 2d du modèle est fondamentale afin d'assurer une communication efficace et donc un résultat positif du processus de conception. La compréhension des mécanismes perceptifs qui structurent l'interprétation spatiale des images numériques bidimensionnelles peut contribuer à développer des modes de représentation plus efficaces et donc une communication entre acteurs plus fluide, ce qui est fondamental dans les processus de conception collectifs et multidisciplinaires, comme le sont ceux de l'architecture Non-Standard. Les résultats de notre étude peuvent aider à comprendre des tels mécanismes, comme c'est le cas, par exemple, pour les traces d'éligibilité que nous avons identifiées dans les images du simplex.

La discussion des résultats expérimentaux a montré l'étendue des domaines qui peuvent être concernés par la problématique des formes complexes de l'architecture contemporaine Non-Standard.

La courbure est une caractéristique géométrique présente dans l'architecture depuis son origine. Elle a été plus ou moins privilégiée selon les différentes époques, mais elle a toujours été associée à l'organique et au naturel. La présence de mécanismes spontanés, très développés et probablement universels, dans l'élaboration perceptive de la courbure bidimensionnelle renforce l'idée selon laquelle cette qualité morphologique détient un rôle « écologique » dans notre système perceptif, ce qui signifie un rôle primordial, naturel et spontané, lié à nos réactions « d'êtres vivants ». Dans cette optique, la réalisation des formes courbes et fluides de l'architecture contemporaine peut donc exploiter ces mécanismes spontanés et créer des espaces de vie plus « proches » de notre nature spontanée (même si nous ne savons pas si des tels espaces pourraient être vraiment plus « confortables » ou heureux à vivre).

La courbure variable continue est une qualité morphologique centrale dans le domaine de la conception de l'architecture Non Standard. La réalisation des surfaces courbes conçues comme continues requiert forcément, par rapport aux moyens techniques de construction, une linéarisation, ou une rationalisation de la continuité conceptuelle dans l'agencement d'un ensemble d'éléments linéaires ou plans. Dans le domaine de la construction Non Standard la caractéristique géométrique plus présente nous semble donc la configuration irrégulière et complexe d'éléments dans l'espace. En raison de la complexité morphologique et organisationnelle des architectures Non Standard, la transmission précise et univoque des informations spatiales entre les concepteurs et les constructeurs est fondamentale. Pour les formes complexes, ce ne sont pas les qualités purement morphologiques qui sont fondamentales, mais les structures relationnelles, les « traces d'éligibilité » ; la connaissance des procédures mentales qui peuvent guider la reconstruction synthétique sur la base des traces d'éligibilité pour apprendre la spatialité des formes complexes est fondamentale. Cette connaissance rend plus efficaces les outils de représentation et de communication lors de la conception et la réalisation. Pour ce qui concerne les outils de représentation, en fait, nous avons assisté dans les derniers 20 années à la supplantation de outils analogiques de représentation comme le dessin

(croquis et géométrie descriptive) par les outils numériques. Le dessin détient un rôle fondamental dans la conception spatiale, comme outil mais surtout comme « habitus » mental, car à travers la *pratique* du dessin les concepteurs apprennent à gérer efficacement la cohérence entre les qualités spatiales tridimensionnelles et les représentations bidimensionnelles correspondantes; nous pensons que les outils numériques sont en train de modifier ce système. Dans nos résultats, nous avons remarqué une apparente « supériorité » de la représentation numérique pour la transmission des informations spatiales significatives: en réalité cette supériorité ne concerne que les propriétés visuelles et figuratives. La représentation numérique est donc une « réalité augmentée » pour le visuel mais le rapport entre le visuel et le monde physique spatial reste encore à explorer.

Enfin, nous avons pu mettre en évidence l'influence possible de l'expertise dans le traitement perceptif : un tel résultat est très important dans le contexte des processus de conception collaboratifs et multidisciplinaires (avec plusieurs concepteurs très spécialisés) comme le sont ceux de l'architecture Non-Standard.

## *CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES*

Ce travail de thèse a été suscité par un constat : la complexité morphologique, technologique et procédurale de l'architecture Non-Standard remet en question certains principes fondamentaux de la conception et de la construction dans l'architecture et l'ingénierie. A travers notre recherche nous avons voulu clarifier certains des mécanismes et des lois qui structurent le traitement cognitif des formes complexes, dans le cadre du système de relations qui s'instaure pendant un processus de conception, entre le concepteur, les outils de représentation et l'objet réel à construire. Les résultats obtenus sont significatifs par rapport avec trois problématiques spécifiques. La plus générale, et peut-être la plus importante, est celle associée à la géométrie: elle est à la base des mécanismes perceptifs et, par conséquent, de la construction des représentations mentales des formes complexes : cette problématique nous a conduit à explorer les lois qui lient les qualités géométriques des représentations mentales et celles des objets réels. Les résultats expérimentaux nous ont permis de mettre en évidence une de ces lois par exemple, pour ce qui concerne la qualité formelle de courbure : nous avons pu identifier avec le rapport d'aspect, un invariant géométrique à même de quantifier et de représenter fidèlement la variation dans la sensation de courbure perçue à la vue d'un arc elliptique bidimensionnel. De tels invariants (dans notre cas, le rapport d'aspect) permettent de définir univoquement la relation entre une représentation mentale (dans notre cas, la courbure perçue, quantifiée à travers une échelle psychométrique) et les qualités physiques correspondantes des objets réels (dans notre cas, les qualités analytiques des arcs elliptiques). A partir de ces résultats, il serait intéressant de vérifier si des invariants de cette nature sont présents, par exemple, dans l'élaboration de la courbure tridimensionnelle, comme des études précédentes semblent suggérer. L'extension de nos résultats au cas tridimensionnel nécessiterait une réflexion attentive sur les spécificités qui caractérisent la perception multi sensorielle de l'espace, mais elle pourrait fournir des informations précieuses pour la conception d'espaces de plus en plus en harmonie avec ceux qui les habitent. L'une des perspectives des travaux réalisés obtenus est donc de les étendre sur la perception des surfaces et des espaces réels à forme complexe avec une expérimentation psychophysique.

La deuxième problématique qui est abordée est celle de l'expertise des acteurs, et de son influence sur la construction et l'utilisation des lois géométriques qui structurent la perception et les représentations mentales

des formes complexes. Des études précédentes ont déjà montré que, dans l'élaboration perceptive, il existe des mécanismes universels, indépendants de l'expertise, aussi bien que des mécanismes spécifiques, issus d'un apprentissage particulier. Dans le cas de la courbure, nous avons pu identifier un invariant universel (le rapport d'aspect), commun à tous les sujets et indépendant de l'expertise, ce qui démontre l'existence de mécanismes effectivement universels dans les opérations perceptives les plus importantes. Cependant, tant dans l'expérience sur l'estimation de la sensation de courbure que dans celle sur la résolution de problème, il y a eu au moins un sujet pour lequel nous pouvons supposer que l'expertise a joué un rôle fondamental pour ses réponses perceptives et pour le choix des traces d'éligibilité nécessaires à l'apprentissage de la configuration spatiale d'un objet. Ces résultats peuvent constituer le point de départ pour une analyse plus détaillée de la caractérisation de l'expertise et de son incidence sur les représentations mentales des différents spécialistes acteurs d'un processus de conception spatiale multidisciplinaire. Pour une telle analyse, il serait nécessaire d'établir un cadre de référence constitué par la modélisation du système complexe d'interactions parmi tous les acteurs d'un processus de conception dans l'architecture Non-Standard. Dans un tel cadre, la communication et la non communication entre les acteurs pourraient être étudiées en relation avec les expertises spécifiques des différents spécialistes.

L'expertise, dans notre expérience sur la résolution de problème, concernait les connaissances géométriques des sujets mais aussi la familiarité de ceux-ci avec certains outils numériques de représentation et animation tridimensionnelle. La troisième problématique abordée par notre étude est donc celle de l'influence des outils de représentation (en particulier des outils numériques) sur l'élaboration perceptive et sur la construction des représentations mentales des formes complexes. Dans nos résultats, lors de la résolution d'un problème spatial complexe, les performances des sujets experts familiers avec les outils numériques, sont meilleures quand les sujets explorent un modèle numérique sur l'écran de l'ordinateur par rapport à une exploration de maquette réelle. De tels résultats semblent démontrer que le virtuel numérique, une fois qu'on a appris à en utiliser les dispositifs, est plus « efficace » que le réel « analogique » (une maquette, par exemple) dans l'élaboration des qualités formelles d'un objet abstrait à géométrie complexe. Le virtuel numérique serait une « réalité augmentée » car, en étant libre des contraintes physiques de l'espace et du temps réels, il permettrait la transmission d'une quantité d'informations (dans notre cas, des qualités

spatiales) plus importante que celles mises à disposition avec des outils analogiques. Cependant, il ne faut pas oublier de relativiser ces résultats en rappelant le travail demandé, qui est un travail de dessin qui concerne exclusivement des qualités figuratives : il s'agit d'une tâche essentiellement visuelle. Ce qu'on peut affirmer, donc, est que le virtuel est bien une réalité augmentée pour la transmission d'informations spatiales, mais cette « augmentation » ne concerne que des informations figuratives, c'est à dire visuelles. L'extension d'une telle définition de « réalité augmentée » à d'autres domaines que le figuratif ne semble absolument pas justifiée par nos résultats ; de plus, elle nous semble pas pertinente à la lumière des connaissances connues, par exemple, sur le rôle des maquettes analogiques à l'échelle dans la conception architecturale. Les lois géométriques qui structurent les rapports entre les propriétés figuratives des formes observées sur un écran, les représentations mentales qui en dérivent et les propriétés formelles d'espaces réels qui présentent les mêmes caractéristiques spatiales sont encore largement inconnues. Les résultats obtenus dans notre étude, ainsi que les méthodes utilisées, pourraient constituer un point de départ très prometteur pour développer une recherche expérimentale sur la relation entre la perception des espaces réels et celle des espaces virtuels. Une telle thématique, bien que très actuelle et très débattue dans des domaines diversifiés (architecture, sociologie ou informatique, parmi les autres) ne semble pas encore avoir développé un cadre de référence stable, qui serait scientifiquement rigoureux et opérationnel afin que ses résultats puissent être exploités dans les domaines de la conception en architecture ou en ingénierie. La définition d'un tel cadre constitue une autre perspective possible pour le développement du travail de recherche mené. Dans le cadre des outils numériques de modélisation et représentation spatiale, nos résultats peuvent contribuer aussi au développement de logiciels, de routines opératives et d'interfaces homme/machine plus proches au monde mental spontané des utilisateurs. Nous disposons en fait d'une approche des outils numériques qui ne se concentre pas sur l'élaboration de systèmes technologiques de plus en plus sophistiqués ; ce qui nous semble important est plutôt d'améliorer la syntonie entre les outils et leurs utilisateurs à travers la simplicité et la transparence, des caractéristiques qui peuvent garantir un contrôle de l'utilisateur sur ce qui est en train de modéliser. Dans ce contexte, nous pensons que la compréhension des mécanismes cognitifs qui structurent l'élaboration et la manipulation des représentations mentales des formes complexes est fondamentale dans le but de développer des routines et des outils de conception spatiale qui puissent intégrer avec cohérence les

qualités de l'imagination et de la créativité et qui soient basée sur l'élément humain comme centrale.

La recherche sur les aspects cognitifs de la conception spatiale nous semble importante en raison du potentiel créatif (et non pas exclusivement imaginaire !) que nous identifions dans l'architecture Non-Standard par rapport à l'élaboration formelle et spatiale mais surtout par rapport aux enjeux originaux qui sont proposés pour la mécanique et la technologie. Les formes courbes ou hautement irrégulières requièrent, pour leur matérialisation, des systèmes mécaniques et constructifs spécifiques, ce qui constitue un catalyseur créatif formidable pour la conception de solutions innovantes et efficaces au niveau du comportement mécanique ou de l'économie de matériel. Une approche unitaire des questions morphologiques avec les aspects géométriques, mécaniques et technologiques nous semble nécessaire. Afin de concevoir une architecture qui puisse maintenir la cohérence entre homme, environnement, ressources, esthétique (parmi les autres facteurs qui influencent la construction architecturale), la connaissance des liens entre l'espace mental du concepteur, le monde physique de la construction et l'espace virtuel des outils de représentation est fondamentale. Avec notre travail, nous avons voulu contribuer à la compréhension de ce genre de liens. Même si les résultats obtenus se sont révélés hautement significatifs pour des questions spécifiques (la courbure, par exemple) nous pensons que la contribution principale de ce travail réside dans la proposition d'un cadre scientifique rigoureux pour l'étude de ce problème actuel et encore largement inexploré : la conception spatiale des formes complexes en architecture et ingénierie. En particulier, dans un tel contexte, nous avons proposé avec notre travail une approche qui s'intéresse spécifiquement aux qualités *géométriques* des mécanismes perceptifs et cognitifs, et non pas, ce qui est plus courant, aux questions esthétiques ou symboliques.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ARC04] **AA.VV.** (2004) *Architectures Non Standard; catalogue de l'exposition*, Centre Pompidou, Paris
- [BEA03] **Beaucé, P., Cache, B.**, (2003) *Vers un mode de production Non Standard*, conférence tenue à l'exposition « Objectile », Paris
- [BER99] **Berkel, B. van, Bos, C.** (1999) *Move*, UN Studio and Goose Press, Amsterdam
- [BAU00] **Bauman, Z.** (2000) *Liquid modernity*, Polity Press, Oxford
- [BAL02] **Balmond, C.** (2002) *informal*, Prestel Verlag, Berlin
- [CAC95] **Cache, B.** (1995) *Earth moves. The furnishing of territories*, MIT Press, Cambridge
- [CAC04] **Cachola Schmal, P.**, ed. (2004) *Workflow : architecture-engineering; Klaus Bollinger + Manfred Grohmann*, Birkhäuser, Berlin
- [CHU05] **Chupin, J.-P. et Simonnet, C. (ed.)** (2005) *Le projet tectonique*, Archigraphy Les Grands Ateliers, Infolio, Gollion
- [CHO07] **Choay, F.** (2007) Espace et architecture in *Encyclopaedia Universalis*, ed. en ligne 2007
- [CIA02] **Ciammaichella M.** (2002) *Architettura in NURBS. Il disegno digitale della deformazione*, Testo e Immagine, Torino
- [COL06] **AA.VV.** (2006) *Collective Intelligence in Design*, AD Profile **183**
- [CON00] **AA.VV.** (2000) *Contemporary processes in architecture*, AD Profile **145**
- [CON02] **AA.VV.** (2002) *Contemporary techniques in architecture*, AD Profile **155**
- [DAR61] **D'Arcy Thompson, W.** (1961) *On growth and form. An abridged edition edited by J.T.Bonner*, Cambridge University Press, Cambridge (tr. it. *Crescita e forma*, Bollati Boringhieri, Torino 1969 (2001)
- [DEL88] **Deleuze, G.** (1988) *Le pli. Leibniz et le baroque*, Les Editions de Minuit, Parigi
- [DIC01] **Di Cristina, G.** (2001) *AD Architecture and Science*, Wiley Academy, Chichester
- [DIC02] **Di Cristina, G.** (2002) *Architettura e topologia*, Editrice Librerie Dedalo, Roma
- [EME04] **AA.VV.** (2004) *Emergence: morphogenetic design strategies*, AD Profile **169**
- [FRA95] **Frampton, K.** (1995) *Studies in Tectonic Culture*, MIT Press, Cambridge MA
- [KOL03] **Kolarevic, B.** (ed.) (2003, 2005) *Architecture in the digital age : design and manufacturing*, Taylor and Francis, New York London
- [KOL05] **Kolarevic, B., Malkawi A.M.** (2005) *Performative architecture: beyond instrumentality*, Taylor and Francis, New York London
- [KW101] **Kwinter, S.** (2001) *Architectures of time. Towards a theory of the event in modernist culture*, MIT Press, Cambridge MA
- [LEA04] **Leach, N., Turnbull, D., Williams, C. (ed.)** (2004) *Digital Tectonics*, Wiley Academy, Chichester
- [LYN99] **Lynn, G.** (1999) *Animate form*, Princeton architectural press, New York
- [LYN98] **Lynn, G.** (1998, 2004) *Folds, bodies and blobs; collected essays*, La lettre volée, Bruxelles
- [NIO95] **Nio, M., Spuybroek, L.**, (1995) X and Y and Z – a manual, *Archis*, 11
- [OOS95] **Oosterhuis, K.** (1995) Liquid architecture, *Archis*, 11
- [OOS03] **Oosterhuis, K.** (2003) *Hyper Bodies: towards an E-motive architecture*, Birkhauser, Basel
- [OXM06] **Oxman, R.** (2006) Theory and design in the first digital age, *Design studies*, **27**
- [REI06] **Reiser + Umemoto** (2006) *Atlas of novel tectonics*, Princeton Architectural Press, New York
- [RAZ08] **Razavi, A.** (2008) Digital Design, *Architecture Intérieure Créée*, **339**
- [ROD01] **Rodermond, J.** (2001) "Deep planning in practice; UN-studio on the move", *deArchitect*, mai 2001
- [SAS07] **Sasaki, M.** (2007) *Morphogenesis of flux structures*, AA Publications, London
- [SPU04] **Spuybroek, L.** (2004) *NOX: machining architecture*, Thames and Hudson, London
- [VER02] **AA.VV.** (2002) *Versioning : evolutionary techniques in architecture*, AD Profile **159**
- [ZEL99] **Zellner, P.** (1999) *Hybrid space*, Thames and Hudson, Londres

Chapitre 1.2 *Le processus de conception en architecture et ingénierie*

- [ALE64] **Alexander, C.** (1964) *Notes on the synthesis of the form*, Harvard University Press, Cambridge, MA
- [ARN69] **Arnheim, R.** (1969) *Visual thinking*, Regents of the University of California, Berkeley (tr. fr. *La pensée visuelle*, Flammarion, Paris 1997)
- [ARI03] **Arielli E.** (2003) *Pensiero e progettazione*, Bruno Mondadori, Milano
- [BOR02] **Borillo, M. et Goulette, J.P.** (ed.) (2002) *Cognition et création; explorations cognitives des processus de conception*, Mardaga, Sprimont
- [DEH06] **Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E.** (2006) Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group, *Science*, n.311, 381-384
- [EDW79] **Edwards, B.** (1979) *Drawing on the right side of the brain* (tr. fr. *Dessiner grâce au cerveau droit*, Mardaga, Sprimont)
- [HER91] **Hertzger, H.** (1991) *Lessons for students in architecture*, 010 Publishers, Rotterdam
- [HOL07] **Holmes, T., Zanker, J.M.**, Evolving the Golden Ratio: A new method for an old question of aesthetic perception, ECVP2007 abstracts, *Perception*, vol.36, supplement
- [JOH92] **Johns, J.C.** (1981, 1992 2) *Design methods*, Van Nostrand Reinhold, New York
- [KAN80] **Kanizsa, G.** (1980) *Grammatica del vedere*. Il Mulino, Bologna
- [KAV01] **Kavakli M., Gero J.S.** (2001) Sketching as mental imagery processing, *Design Studies*, vol. 22, 347-364
- [LAW97] **Lawson, B.** (1980,1997) *How designers think*, Elsevier, Oxford
- [LEC23] **Le Corbusier** (1923) *Vers une architecture*, Crès et Cie, Paris [éd. récente : Flammarion, 1995]
- [OMA98] **OMA, Koolhaas, R. Mau, B.** (1998) *SMLXL*, The Monacelli Press, New York
- [OXM02] **Oxman R.** (2002) The thinking eye: visual re-cognition in design emergence, *Design Studies*, vol.23, 135-164
- [OXM97] **Oxman R.** (1997) Design by re-representation: a model of visual reasoning in design, *Design Studies*, vol.18 n.4, 329-347
- [PAN27] **Panofsky, E.** (1927) *Die Perspektive als "Symbolische form"*, in "Vortrage der Bibliothek Warburg 1924-25", Leipzig, Berlin [tr. it. *La prospettiva come forma simbolica*, Feltrinelli, Milano (1961, 1995)]
- [PUR98] **Purcell A.T., Gero J.S.** (1998) Drawings and the design process, *Design Studies*, vol.19, 389-430
- [SAR04] **Sardo, N.** (2004) *La figurazione plastica dell'architettura. Modelli e rappresentazione*. Edizioni kappa, Roma
- [SCH83] **Schön, D.** (1983) *The reflective practitioner*, Basic Books, New York
- [SIM96] **Simon, H.** (1969) *The sciences of the artificial*, The Mit Press, Cambridge, MA
- [SMI04] **Smith, A.C.** (2004) *Architectural model as machine. A view of models from antiquity to present day*. Architectural Press Elsevier, Oxford
- [ZEI06] **Zeisel, J.** (1981, 2006) *Inquiry by design*, W.W. Norton and Company, New York London

Chapitre 1.3 *Conception et processus cognitifs*

- [BAR01] **Barlow, H.** (2001) The exploitation of regularities in the environment by the brain. *The Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 602-607.
- [BEJ03] **Béjan, A.** (2003) *Shape and structure: from engineering to nature*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- [CHA90] **Chandrasekaran, B.** (1990) Design problem solving: a task analysis. *AI Magazine*, **11**, 59-71.
- [DRE01] **Dresp, B.** (2001) External regularities and adaptive signal exchanges in the brain. *The Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 663-664.
- [DRE02] **Dresp, B., Durand, S., & Grossberg, S.** (2002) Depth perception from pairs of overlapping cues in pictorial displays. *Spatial Vision*, **15**, 225-276.
- [GAR83] **Gardner, H.** (1983) *Frames of Mind: The theory of multiple intelligences*. Basic Books: New York.

- [GAR99] **Gardner, H.** (1999) Multiple approaches to understanding. In C. Reigeluth (Ed.), *Industrial Design Theories and Models*. Lawrence Erlbaum: Mahwah, New Jersey.
- [GIL98] **Gilbert, C. D.** (1998) Adult cortical dynamics. *Physiological Reviews*, **78**, 467-485.
- [GRO99] **Grossberg, S.** (1999) The link between brain learning, attention and consciousness. *Consciousness & Cognition*, **8**, 1-44.
- [HEC01] **Hecht, H.** (2001) Regularities of the physical world and the absence of their internalization. *The Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 608-617.
- [JAM09] **James, W.** (1909) A pluralistic universe. *The Hibbard Lectures*, Manchester College, Oxford, UK.
- [KOH47] **Köhler, W.** (1947) *Gestalt Psychology*. Liveright.
- [KYL84] **Kyllonen, P. C., Lohman, D., & Snow, R.** (1984) Effects of aptitudes, strategy training and task facets on spatial task performance. *Journal of Educational Psychology*, **76**, 130-145.
- [LEG02] **Legrenzi, P.** (2002) *Prima lezione di scienze cognitive*, Laterza, Roma
- [LEO01] **Leopold, C., Gorska, R. A., & Sorby, S. A.** (2001) International experiences in developing spatial visualization abilities of engineering students. *Journal for Geometry and Graphics*, **5**, 81-91.
- [LEV82] **Levine, M., Janokovic, I. N., & Palij, M.** (1982) Principles of spatial problem solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, **111**, 157-175.
- [MAC78] **MacLeod, C. M., Hunt, E. B., & Mathews, N. N.** (1978) Individual differences in the verification of sentence-picture relationships. *Journal of Verbal Learning & Behavior*, **17**, 493-507.
- [MET36] **Metzger, W.** (1936) *Gesetz des Sehens*. W. Kramer: New York
- [NEW72] **Newell, A., Simon H.** (1972) *Human problem solving*, Prentice Hall, Englewood Cliff
- [PIA67] **Piaget, J.** (1967) *La construction du réel chez l'enfant*. Delachaux & Niestlé : Neuchâtel
- [PER01] **Perrin, J.** (2001) *Conception entre science et art*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [PUR98] **Purcell A.T., Gero J.S.** (1998) Drawings and the design process, *Design Studies*, vol.19, 389-430
- [ROB97] **Roberts, M. J., Gilmore, D. J., & Wood, D. J.** (1997) Individual differences and strategy selection in reasoning. *British Journal of Psychology*, **88**, 473-492.
- [SEL67] **Sellars, W.** (1967) Form and Content. *The Lindsay Lecture*, Department of Philosophy, University of Kansas, USA.
- [SHE94] **Shepard, R. N.** (1994) Perceptual-cognitive universals as reflections of the physical world. *Psychonomic Bulletin & Review*, **1**, 2-28.
- [SWA90] **Swanson, H. L.** (1990) Influence of meta-cognitive knowledge and aptitude on problem solving. *Journal of Educational Psychology*, **82**, 306-314.

#### Chapitre 1.4 Modélisation de la problématique

- [HER91] **Hertzger, H.** (1991) *Lessons for students in architecture*, 010 Publishers, Rotterdam
- [KOE90] **Koenderink, J.J.** (1990) *Solid shape*, The MIT Press, Cambridge, MA (USA)
- [ROB97] **Roberts, M. J., Gilmore, D. J., & Wood, D. J.** (1997) Individual differences and strategy selection in reasoning. *British Journal of Psychology*, **88**, 473-492.
- [STE56] **Stevens, S. S.** (1956) The direct estimation of sensory magnitudes. *American Journal of Psychology*, **69**, 1-25.
- [STE75] **Stevens, S. S.** (1975) *Psychophysics*. New York, Wiley.
- [THU27] **Thurstone, L. L.** (1927) A law of comparative judgement. *Psychological Review*, **34**, 273-286.

- [ATT54] **Attneave, F.** (1954) Some informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, **61**, 183-193.
- [BIE87] **Biederman, I.** (1987) Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**, 115-117.
- [CAV89] **Cavanagh, P., & von Grünau, M.** (1989), 3-D objects that appear non-rigid during rotation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **30** (Supplement), 263.
- [DOB87] **Dobbins, A., Zucker, S. W., & Cynader, M. S.** (1987) End-stopped neurons in the cortex as a substrate for calculating curvature. *Nature*, **329**, 438-441.
- [DOB89] **Dobbins, A., Zucker, S. W., & Cynader, M. S.** (1989) End-stopping and curvature. *Vision Research*, **29**, 1371-1387.
- [DRE07] **Dresp-Langley, B., Chrysochoos, A.** (2007) Visual and tactile sensations of curvedness are predicted by the same euclidean metric, soumis à *Journal of mathematical Psychology*
- [FER86] **Ferraro, M., & Foster, D. H.** (1986) Discrete and continuous modes of curved-line discrimination controlled by effective stimulus duration. *Spatial Vision*, **1**, 219-230.
- [FOL04] **Foley, J. M., Ribeiro-Filho, N. P., & Da Silva, J. A.** (2004) Visual perception of extent and the geometry of visual space. *Vision Research*, **44**, 147-156.
- [FOS02] **Foster, D. H., & Savage, C. J.** (2002) Uniformity and asymmetry of rapid curved-line detection explained by parallel categorical coding of contour curvature. *Vision Research*, **42**, 2163-2175.
- [FOS93] **Foster, D. H., Simmons, D. R., & Cook, M. J.** (1993) The cue for contour-curvature discrimination. *Vision Research*, **33**, 329-341.
- [GIB66] **Gibson, J. J.** (1966) *The senses considered as perceptual systems*, Boston: Houghton Mifflin.
- [HEE96] **Heeley, D. W., & Buchanan-Smith, H. M.** (1996) Mechanisms specialized for the perception of image geometry. *Vision Research*, **36**, 3607-3627.
- [HIL32] **Hilbert, D., Cohn Vossen, S.** (1932) *Anschauliche Geometrie*, Springer Verlag, Berlino [tr. it. *Geometria Intuitiva*, Bollati Boringhieri, Torino 1972 (2001)]
- [HOW05] **Howe, C. Q., & Purves, D.** (2005) Natural scene geometry predicts the perception of angles and line orientation. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, **102**, 1228-1233.
- [HUB59] **Hubel, D. H., & Wiesel, T. N.** (1959) Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, **148**, 574-591.
- [KOE88] **Koenderink, J. J., & Richards, W. W.** (1988) Two-dimensional curvature operators. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 1136-1141.
- [KOE03] **Koenderink, J. J., & van Doorn, A. J.** (2003) What is "Pictorial Relief"? In H. Hecht, R. Schwartz, and M. Atherton (eds.) *Looking into Pictures*. Cambridge MA, MIT Press, pp. 239-300.
- [KRA95] **Kramer, D., & Fahle, M.** (1995) A simple mechanism for detecting low curvatures. *Vision Research*, **36**, 1411-1419.
- [LOC67] **Lockwood, E. H.** (1967) *A book of curves*. Cambridge UK, Cambridge University Press.
- [LYO00] **Lyon, M. J., Campbell, R., Plante, A., Coleman, M., Kamachi, M., & Akamatsu, S.** (2000) The Noh Mask effect: Vertical viewpoint dependence of facial expression perception. *Proceedings of the Royal Society London, B*, **267**, 2239-2245.
- [MOR05] **Morgan, M. J.** (2005) The visual computation of 2-D area by human observers. *Vision Research*, **45**, 2564-2570.
- [PES98] **Pessoa, L., Thompson, E., & Noë, A.** (1998) Finding out about filling-in: A guide to perceptual completion for visual science and the philosophy of perception. *Behavioral and Brain Sciences*, **21**, 723-802.
- [PAN24] **Panofsky, E.** (1924-25) *Die Perspektive als "Symbolische form"*, B.G. Teubner, Leipzig, Berlin [tr. it. *La prospettiva come forma simbolica*, Feltrinelli, Milano (1961, 1995)]
- [SIL07] **Silvestri, C., Motro, R., Dresp-Langley, B.** (2007) *Steven's law and the 2D geometry of curvature in experts and other observers* PERCEPTION, vol.36 supplement

- [SIN96] **Sinha, P., & Poggio, T.** (1996) Role of learning in three-dimensional form perception. *Nature*, **384**, 460-463.
- [STE81a] **Stevens, K. A.** (1981 a) The visual interpretation of surface contours. *Artificial Intelligence*, **17**, 47-73.
- [STE81b] **Stevens, K. A.** (1981 b) The information content of texture gradients. *Biological Cybernetics*, **42**, 95-105.
- [WAT84] **Watt, R. J.** (1984) Further evidence concerning the analysis of curvature in human foveal vision. *Vision Research*, **24**, 251-253.
- [WAT87a] **Watt, R. J.** (1987) Scanning from coarse to fine spatial scales in the human visual system after the onset of stimulus. *Journal of the Optical Society of America, A*, **4**, 2006-2021.
- [WAT82] **Watt, R. J., & Andrews, D. P.** (1982) Contour curvature analysis: hyperacuties in the discrimination of detailed shape. *Vision Research*, **22**, 449-460.
- [WAT87b] **Watt, R. J., Ward, R. M., & Casco, C.** (1987) The detection of deviation from straightness in lines. *Vision Research*, **27**, 1659-1678.
- [WHI98] **Whitaker, D., & McGraw, P. V.** (1998) Geometric representation of the mechanisms underlying human curvature detection. *Vision Research*, **38**, 3843-3848.
- [WIL89] **Wilson, H. R., & Richards, W. A.** (1989) Mechanisms of contour curvature discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, **6**, 106-115.
- [YAT74] **Yates, R. C.** (1974) *Curves and their properties*. New York, NCTM.
- [ZET90] **Zetsche, C., & Barth, E.** (1990) Fundamental limits of linear filters in the visual processing of two-dimensional signals. *Vision Research*, **30**, 1111-1117.

## Chapitre II.2 Formes complexes, apprentissage et outils de représentation

- [BAD03] **Baddeley, A.** (2003) Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, **4**, 829-839.
- [BOR07] **Borgart, A., & Kocaturk, T.** (2007) Free form design as the digital "Zeitgeist". *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, **48**, 4, 3-10.
- [CAR91] **Carpenter, G. A. & Grossberg, S.** (1991) *Pattern recognition by self-organizing Neural Networks*, Cambridge: MIT Press.
- [CHR99] **Christou, C. G., & Bulthoff, H. H.** (1999) View dependence in scene recognition after active learning. *Memory & Cognition*, **27**, 996-1007.
- [CHR03] **Christou, C.G., Tjan, B. S., & Bülthoff, H.H.** (2003) Extrinsic cues aid shape recognition from novel viewpoints. *Journal of Vision*, **3**, 183-198.
- [CRU98] **Crucian, G. P., & Berenbaum, S. A.** (1998) Sex differences in right hemisphere tasks. *Brain & Cognition*, **36**, 377-389.
- [DAR96] **Darken, R. P., & Sibert, J. L.** (1996) Wayfinding strategies and behaviours in large virtual worlds. *Symposium Proceedings 'Human Factors in Computing Systems'*, London: ACM Press, pp. 142-149.
- [DEH06] **Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E.** (2006) Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group. *Science*, **311**, 381-384.
- [DRE07] **Dresp, B., Silvestri, C., & Motro, R.** (2007) Which geometric model for the curvature of 2-D shape contours? *Spatial Vision*, **20**, 219-264.
- [GAL05] **Gallagher, A. G., Ritter, E. M., Champion, H., Higgins, G., Fried, M.P., Moses, G., Smith, C. D., & Satava, R. M.** (2005) Virtual reality for the operating room: proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills training. *Annals of Surgery*, **241**, 364-372.
- [GIB62] **Gibson, J. J.** (1962) Observations on active touch. *Psychological Review*, **69**, 477-491.
- [GIB63] **Gibson, J. J.** (1963) The useful dimensions of sensitivity. *American Psychologist*, **18**, 1- 5.
- [GIB66] **Gibson, J. J.** (1966) *The senses considered as perceptual systems*, Boston: Houghton Mifflin.
- [HAR06] **Harrington, G. S., Faris, D., Davis, C. H., & Buonocore, M. H.** (2006) Comparison of the neural basis for imagined writing and drawing. *Human Brain Mapping*, **28**, 450-459.

- [KAT06] **Katz, M. G., Kripalani, S., & Weiss, B. D.** (2006) Use of pictorial aids in medication instructions: a review of the literature. *American Journal of Health System Pharmacy*, **63**, 2391-2397.
- [KRO03] **Króliczak, G., Goodale, M. A., & Humphrey, G. K.** (2003) The effects of different aperture-viewing conditions on the recognition of novel objects. *Perception*, **32**, 1169-1179.
- [LAC07] **Lacey, S., Peters, A., & Sathian, K.** (2007) Cross-modal object recognition is viewpoint independent. *PLoS ONE*, **12**, e890.
- [MAT07] **Matheis, R. J., Schultheis, M. T., Tiersky, L.A., DeLuca, J., Mills, S. R., & Rizzo, A.** (2007) Is learning and memory different in a virtual environment? *Clinical Neuropsychology*, **21**, 146-161.
- [MIL56] **Miller, G.A.** (1956). The magic number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, **63**, 81-97.
- [MOT03] **Motro, R.** (2003) *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. Kogan Page Science, London.
- [NEW01] **Newell, F. N. Ernst, M. O., Tjan, B. S., & Bühlhoff, H. H.** (2001) Viewpoint dependence in visual and haptic object recognition. *Psychological Science*, **12**, 37-42.
- [NOR04] **Norman, J. F., Norman, H. F., & Clayton, A. M.** (2004) The visual and haptic perception of natural object shape. *Perception & Psychophysics*, **66**, 342-351.
- [OBE28] **Oberly, H. S.** (1928) A comparison of the spans of attention and memory. *American Journal of Psychology*, **40**, 295-302.
- [PAR99] **Parkin, A. J.** (1999) Human memory. *Current Biology*, **9**, 582-585.
- [POT93] **Potter, M.C.** (1993) Short-term conceptual memory. *Memory & Cognition*, **21**, 156-161.
- [RED06] **Reddy, L., Reddy, L., & Koch, C.** (2006) Face identification in the near absence of focal attention. *Vision Research*, **46**, 2336-2343.
- [SEU04] **Seurinck, R., Vingerhoets, G., de Lange, F. P., & Achten, E.** (2004) Does egocentric mental rotation elicit sex differences? *Neuroimage*, **23**, 1440-1449.
- [SIN96a] **Singh, S. P., & Sutton, R. S.** (1996) Reinforcement learning with replacing eligibility traces. *Machine Learning*, **22**, 123-158.
- [SIN96b] **Sinha, P. and Poggio, T.** (1996) Role of learning in three-dimensional form perception, *Nature* **384**, 460–463.
- [SNE65] **Snelson, K. D.** (1965) Continuous tension, discontinuous compression structures. *US Patent Number 3*, **169**, 611.
- [SPE03] **Spetch, M. L., & Friedman, A.** (2003) Recognizing rotated views of objects: interpolation versus generalization by humans and pigeons. *Psychonomic Bulletin & Review*, **10**, 135-140.
- [STE06] **Stelzer, E. M., & Wickens, C. D.** (2006) Pilots strategically compensate for display enlargements in surveillance and flight control tasks. *Human Factors*, **48**, 166-181.
- [UNT00] **Unterrainer, J., Wranek, U., Staffen, W., Gruber, T., & Ladurner, G.** (2000) Lateralized cognitive visuospatial processing: is it primarily gender-related or due to quality of performance? *Neuropsychobiology*, **41**, 95-101.
- [VET94] **Vetter, T., Poggio, T., & Bühlhoff, H. H.** (1994) The importance of symmetry and virtual views in three-dimensional object recognition. *Current Biology*, **4**, 18-23.
- [VOG01] **Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J.** (2001) Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **27**, 92-114.
- [VOY95] **Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P.** (1995) Magnitude of sex-differences in spatial abilities – A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, **117**, 250-270.
- [WHI91] **Whitehead, S. D., & Ballard, D. H.** (1991) Learning to perceive and act by trial and error. *Machine Learning*, **7**, 45-83.
- [YAN91] **Yantis, S., & Jones, E.** (1991) Mechanisms of attentional selection: Temporally modulated priority tags. *Perception & Psychophysics*, **50**, 166-178.

Chapitre III.1 *Le traitement perceptif des formes complexes*

- [BAG08] **Bagnéris, M., Motro, R., Maurin, B., Pauli, N.** (2008) Structural morphology issues in conceptual design of double curved systems, *International Journal of Space Structures*, vol.23 n.2
- [BIE87] **Biederman, I.** (1987) Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**, 115-117.
- [DRE08] **Dresp-Langley, B., Motro, R.** (2008) Human cognition and structural design, "Morphogenesis", 6th International Seminar of the IASS Working Group n.15 Structural Morphology, Acapulco (Messico), 23-24 ott 2008
- [DEL03] **Delorme, A., Fl ckiger, M.** (2003) *Perception et réalité*, De Boeck, Bruxelles
- [FLA05] **Flash, T.** (2005) Motor primitives in vertebrates and invertebrates. *Current Opinion in Neurobiology*, **15(6)**, 660-6
- [FLA07] **Flash, T.** (2007) Affine differential geometry analysis of human arm movements, *Biological Cybernetics*, **96**, 577-601
- [HOC06] **Ho, C. H., Eastman, C., Catrambone, R.** (2006) An investigation of 2d and 3d spatial and mathematical abilities. *Design Studies*, **27**, 505-524
- [MAR04] **Marty, A.** *Formes pascaliennes. Un essai sur les formes gauches*, Editions de l'Esp rou, Montpellier
- [NOE04] **No , A.** (2004) *Action in perception*, The MIT Press, Cambridge, MA
- [SIN96] **Sinha, P., & Poggio, T.** (1996) Role of learning in three-dimensional form perception. *Nature*, **384**, 460-463
- [TOD01] **Todd, J.** (2001) On the affine structure of perceptual space, *Psychological Science*, vol. 12, n.3

Chapitre III.2 *Outils de représentation et formes complexes*

- [PER97] **Perez Gomez A., Pelletier, L.** (1997) *Architectural representation and the perspective hinge*, The MIT Press, Cambridge (MA)
- [SCO94] **Scolari, M. et al.** *Teorie e metodi del disegno*, Citt  Studi, Milano
- [SHE04] **Shea, C.** (2004) *Directed randomness*, in **Leach, N. et al (ed.)** *Digital tectonics*, Wiley Academy, Chichester, p.89-101
- [GEO09] **Georges, F., Boumenir, Y., Valentin, J., Rebillard, G. & Dresp-Langley, B.** (2009). To find your way (or not) in an unfamiliar "natural" urban environment. *Journal of Environmental Psychology*, soumis.

## **Résumé en français**

Toute forme de conception repose sur les rapports entre l'espace virtuel des possibles et l'espace réel du réalisable : ce qui fait le lien entre les deux et qui en établit le rapport est l'espace mental du concepteur. Dans l'architecture contemporaine Non-Standard, en raison de la complexité formelle et de l'emploi presque exclusif des outils numériques, nous avons constaté un décalage qui semble s'agrandir entre le monde virtuel des possibles et le monde actuel du réalisable : ce constat nous a amené à nous questionner sur la position du monde mental du concepteur en relation avec un tel décalage. Ce travail de thèse a été conçu afin de contribuer à la définition d'un cadre scientifique pour l'analyse des relations entre espace mental et espace physique dans la conception spatiale : les sciences cognitives nous ont fourni les méthodes et les outils pour réaliser une étude expérimentale de ces questions. Deux expériences ont été menées afin d'isoler des invariants et des lois géométriques capables de décrire les liens entre les qualités formelles des objets du monde physique et celles du monde mental des concepteurs. Nos résultats expérimentaux nous ont permis de mettre en évidence des indices géométriques significatifs dans le traitement perceptif de la qualité formelle de courbure ainsi que dans l'élaboration des configurations spatiales complexes en relation avec les outils de représentation (en particulier, les outils numériques).

## **English title**

Perceptual processes and design in Non-Standard architecture

## **English abstract**

Design processes rely on the interaction between virtual space of possibility and real space of constructability: this interaction is performed and managed in the designer's mental space. In contemporary Non Standard architecture formal complexity and digital tools are creating a growing gap between virtual space (possibility) and real space (constructability). Our these's aim is to contribute at the understanding of the position of designer's mental space face to this gap. One of our objectives was the definition of a scientific reference frame for the experimental study of the relationships between the designer's mental space and the world's physical space. Cognitive sciences provided the methodology and tools necessary to perform a scientific study of those questions. Two experiments were conducted to identify geometrical invariants and laws which could relate the formal qualities of physical space objects and the correspondent mental space representations. Our results revealed significant data about the perceptual elaboration of the formal qualities of curvature and of complex spatial configurations, in relation with different representation tools (physical scale models, numerical models, drawings).

## **Key-words**

Non Standard Architecture, design, perception, complex shapes, curvature

## **Discipline**

Mécanique et génie civil

## **Mots-clés**

Architecture Non Standard, conception, perception, formes complexes, courbure

## **Intitulé et adresse du laboratoire**

Laboratoire de mécanique et génie Civil – UMR5508  
CC 048 Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier