



**Tomás Dorta**  
University of Montreal  
dortat@ere.umontreal.ca

**Philippe Lalande**  
University of Montreal  
lalandep@ere.umontreal.ca

## The Impact of Virtual Reality on the Design Process

---

*Sketching, either hand or computer generated, along with other traditional visualization tools such as perspective drawing have difficulty in correctly representing three dimensional objects. Even physical models, in architecture, suffer in this regard because of inevitable scaling. The designer finds himself cut off from the reality of the object and is prone to misinterpretations of the object and its surrounding space and to resulting design errors. These are sometimes not perceived until too late, once the object has been constructed. Traditional tools use 2D media to represent 3D objects and only manage to introduce the third dimension in a limited manner (perspectives, not only tedious to construct, are static). This scenario affects the design process, particularly the cycle of proposal, verification and correction of design hypotheses as well as the cognitive aspects that condition the designer's visualization of the designed object.*

*In most cases, computer graphics mimic, through its interface, the traditional way of doing things. The architectural model is parametricized with little regard for visualization. No allowance is made for the change in the medium of graphic representation. Moreover, effort is not made to capitalize on the advantages of numerical calculation to propose new interfaces and new dimensions in object visualization.*

*Virtual Reality (VR), seen not only as technology but as experience, brings the 3D object, abstractly viewed by traditional means, into clearer focus and provides us with these new dimensions. Errors due to abstracted representation are reduced since the interface is always three dimensional and the interactions intuitively made in real time thus allowing the designer to experience the presence of the designed object very quickly.*

*At the École de design industriel of the Faculté d'aménagement, we have run tests using non-immersive VR—one passive (comprehension) and another active (design). This project, involving a group of 72 students during a period of six weeks (6h/week), aimed at analyzing the impact of VR as a visualization tool on the design process versus traditional tools. The results, described in this presentation, shed light on the effect of VR on the creative process as such, as well as on the quality of the results produced by that process.*

### L'impact de la réalité virtuelle dans le processus de design

*Le dessin, soit à la main ou informatisé, accompagné des autres outils traditionnels de visualisation en design comme les perspectives ont de la difficulté à bien représenter les objets tridimensionnels. Même la maquette, en architecture, n'offre pas une représentation conviviale due au changement d'échelle. Le concepteur se trouve éloigné de la réalité de l'objet produisant ainsi des erreurs dans la compréhension de l'objet et de l'espace 3D. Quelques fois, ces erreurs ne sont perçues que trop tard, une fois l'objet construit. Les outils traditionnels utilisent le média 2D pour représenter les objets 3D et introduisent ainsi la troisième dimension que d'une façon limitative (les perspectives, en plus d'être longues à construire, sont statiques). Ce scénario affecte le processus de design, surtout par rapport au cycle de proposition, vérification et correction des hypothèses de design ainsi que les aspects cognitifs, conditionnant la visualisation de l'objet de design par le concepteur.*

*Dans la plupart des cas, l'informatique reproduisait, dans ses interfaces, la façon de faire traditionnelle. Nous paramétrisons l'objet architectural, en oubliant sa visualisation. Nous ne tenons pas compte du changement de média graphique de représentation. De plus, nous ne profitons pas des avantages des nouvelles façons de traiter l'information pour proposer de nouvelles interfaces qui permettent d'accéder à d'autres dimensions pour la visualisation des objets.*

*La réalité virtuelle (RV), vue non seulement comme technologie, mais comme expérience, nous rapproche de l'objet 3D, représenté d'une façon limitée par le traditionnel, et nous procure ces autres dimensions. Les erreurs dues à l'abstraction de la représentation sont diminuées, puisque l'interface est tridimensionnelle et les interactions sont réalisées intuitivement en temps réel, donnant ainsi au concepteur la possibilité de se sentir en présence de l'objet de design très rapidement.*

*À l'école de design industriel de la Faculté de l'aménagement, nous avons réalisé deux tests avec la RV non-immersive : un passif (portant sur la compréhension) et un autre actif (portant sur le design). La participation d'un groupe de 72 étudiants pendant 6 semaines (6h/sem.) fut requise; ce projet avait pour but d'analyser l'impact de la RV comme outil de visualisation dans le processus de design versus les outils traditionnels. Les résultats de ce travail jettent la lumière sur l'effet de la RV sur le processus de conception en soi, ainsi que sur la qualité des résultats de ce processus.*

### introduction

In astronomy, it can take six months to be able to know the position of a distant star. The earth's displacement over a six month period and the resulting altered point of view shows the star in a different position relative to its neighbours. Thus is the universe the we inhabit: a three-dimensional space. We are three dimensional in nature and have evolved ways of dealing with these three dimensions.

In design terms, six months is a long time, especially to verify the implications of a design hypothesis. Nonetheless, traditional techniques used to visualize and represent the 3D world are very limited and the designer must often wait for the actual construction of the object before perceiving design errors.

### traditional tools

In early times, architects and designers did not use documents (2D) as we know today to represent their projects. Decisions were often made and applied directly to the project under construction. Space and form were shaped in this way, inspired from a direct perception of the space and related problems that were defined within.

Through history, architects have continuously sought ways of better representing and conceiving the architectural object. This objective was primarily to more clearly understand space in order to better shape it and avoid design errors. Based on Brunelleschi and Alberti's experiences with perspective construction, architects have tried to perfect a method of realistic representation of space. These tools of representation (plans and perspectives) along with scale models as means of simulating reality have weaknesses in their ability to realistically simulate objects and spaces. These weaknesses stem from the obstacles that stand in the way of a designer's ability to perceive the 3D object. These are:

- *Abstraction.* The designer must interpret abstract information in order to understand the 3D object. While many designers acquire skill at comprehending spacial and formal problems, this capacity has its limits, particularly with novice or less experienced designers. This

difficulty stems from a basic contradiction (*paradox*) : traditional design tools are bi-dimensional while the object of design is three dimensional!

- *Field of vision.* There is an incoherence between the scale of the observer and that of the representation of the object. Particularly in architecture, the model becomes a minuscule object being inspected by a giant. The human field of vision is distorted when the architect attempts to perceive the spacial characteristics of the project.
- *Characteristics of perspective and axonometric representations.* Quick schematic perspectives can be very useful but are often deceiving and easily manipulated to produce a desired effect. Constructed perspectives, on the other hand, can be very accurate and revealing; they suffer however from complex construction techniques and lengthy execution and therefore are labeled as static (Moore and Allen 1981; Marshall 1992).
- *Communication of information.* Through technical drawings (plans, elevations, sections, etc.), the designer conceives and communicates the object. The use of these tools requires a constant effort to encode and decode information transmitted through the use of standardized symbols of the practice. In the process of production and communication of information, this additional task sometimes causes distortions or loss of data for the designer himself or for his colleagues, clients or eventual users of the design.

Marshall (1992), in analyzing graphic media used in design, writes "... If a medium can provide an element of harmony between the creator and his/her ideas, then it will aid the design process. If on the other hand, it continually distracts the designer by calling attention to itself unnecessarily, it will certainly impede the design process." This is related to the aspects brought to light by Ch. Moore and G. Allen (1981): "Traditional media fail in their attempts at representing space since it is not space that is represented but rather the plan views and sections within which space is

### introduction

En astronomie, nous devons attendre jusqu'à six mois pour connaître la position d'une étoile à proximité. La terre fait une translation du point de vue et nous donne une perspective différente qu'après six mois, nous dévoilant ainsi que l'étoile n'est pas à la même position en regard des autres. Voilà l'univers où nous vivons, un espace tridimensionnel. Nous sommes tridimensionnels et nous sommes faits pour traiter avec cette troisième dimension.

En design, six mois d'attente sont beaucoup, surtout pour vérifier les implications d'une hypothèse de design. Cependant, les techniques de visualisation et de représentation de l'univers 3D sont, parfois, peu performantes et le concepteur doit patienter jusqu'à la construction de l'objet pour percevoir ses erreurs.

### outils traditionnels

Par le passé, les architectes n'utilisaient pas les documents (plans 2D), que nous connaissons maintenant pour représenter leurs projets. Les décisions étaient souvent prises et appliquées directement face au projet en construction. L'espace et la forme étaient conçues de cette manière, partant d'une perception directe de l'espace et de ses problèmes.

À travers l'histoire, les architectes ont toujours été en quête d'outils pour mieux représenter et concevoir l'objet architectural. L'idée était de bien comprendre les espaces pour améliorer la conception et, par le fait même, éviter les erreurs de design. À partir des expériences de Brunelleschi et d'Alberti, grâce à leurs propositions sur la perspective, les architectes ont essayé de s'approcher d'une représentation plus réaliste des espaces. Ces outils de représentation (plans et perspectives) accompagnés aussi de maquettes, comme étant les outils pour simuler la réalité, ont des incapacités à représenter l'objet 3D et l'espace d'une façon réaliste. Ces incapacités proviennent des obstacles par lesquels les designers doivent passer pour percevoir l'objet 3D. Ils sont les suivants :

- *L'abstraction.* Le concepteur doit interpréter l'information abstraite pour comprendre et percevoir l'objet 3D. Il est évident que certains concepteurs possèdent une capacité à comprendre des problèmes de type spatial et formel. Or, cette capacité comporte des limites, particulièrement avec des designers novices ou moins expérimentés. Ces difficultés proviennent d'un sérieux paradoxe : les outils traditionnels de conception sont bidimensionnels et l'objet de design est principalement 3D !
- le champ de vision humaine. Il existe certaines incohérences en relation avec l'échelle de l'observateur et l'outil de visualisation. En architecture particulièrement, la maquette se présente comme un petit objet face à un géant. Le champ de vision normale humaine s'en trouve déformé lorsque l'architecte essaie de percevoir les caractéristiques des espaces de l'objet architectural.
- *Les caractéristiques des perspectives et des axonométries.* Les perspectives schématiques rapides peuvent être d'une grande utilité, mais elles sont inexactes et trompeuses puisqu'elles sont modifiables à convenance. Par contre, les perspectives calculées sont très précises et révélatrices mais, par leur complexité de réalisation et le temps d'exécution, elles sont catégorisées comme statiques (Moore and Allen 1981; Marshall 1992).
- *La communication de l'information.* à travers les dessins techniques (plans, sections, élévations, etc.), le concepteur communique et conçoit l'objet. Pour travailler avec ces outils, le designer est soumis à un effort constant de codage et décodage de l'information transmise par des symboles normalisés par la pratique. Cette tâche additionnelle entraîne, quelques fois, une déformation ou un manque d'information dans le processus de conception et la communication de l'information, soit pour le designer lui-même ou pour ses collègues, clients ou usagers éventuels.

Marshall (1992), en faisant l'analyse des médias graphiques en design, décrit : « ... Si un média peut apporter un élément d'harmonie entre le créateur et ses idées, donc il peut aider le processus de design. Si, d'un autre côté, le média

hidden. Thus, our attention is drawn to the media themselves at the expense of the architectural space which is revealed through them."

These limits of traditional 2D media (drawings and perspectives) have been transposed to Computer Aided Drawing (CAD), to the 2D representation of the computer screen and to computer rendering software. Several minutes can elapse between each generation of perspective view from a different point of view. Also, these tools still impose a heavy mental load on the designer due to the task of abstraction since the economical mode of wireframe representation introduces a new form of information encoding and decoding.

#### virtual reality

Virtual Reality (VR) is the product of human/computer interface developments in using the computer to deal with large amounts of data and simulate reality. In spite its a reliance on computer equipment and the complexity with which it is normally associated, VR must not be defined as technology but as experience. We have defined VR as the systems and techniques that can produce the experience of presence in a 3D computer-generated environment. This sensation of presence is obtained by direct real time interaction by the user in a virtual world. In real time, the system must provide instantaneous feedback to direct actions of the user in order for these to be perceived normally.

With the use of sophisticated computer equipment such as head-mounted displays and digital gloves, VR is often seen as immersive. Using a conventional personal computer system (screen, keyboard and mouse), however, the user can still experience the sensation of presence in a virtual world: we are referring here to non-immersive VR (Robertson 1993). Non-immersive VR has three advantages over immersive systems: rapid evolution of the software because of the wide ranging availability of the equipment to run it; better performance due to the simpler installation required; and, ease of use as compared with complex immersive systems.

#### the design process

Within the design process, it is possible to identify two structures. The first concerns a series of stages that define the process in time. Lebahar

(1983) proposes three phases according to a study of drawing as a design tool in architecture. The second structure deals with the role of graphic media in each part of the process. We are referring here to two activities: one, passive, of communication of information and a second, active, of graphic ideation or conceptual design. Lebahar's phases are:

- *The architectural diagnosis.* This phase studies the data and constraints imposed on the search within a field of possibilities and impossibilities. From this data, the architect deducts a program. This phase is finalized with a few written notes and a first drawing or group of drawings (the graphic basis for the next phase).
- *The search for an object through graphic simulation.* This phase develops through an elaboration of the graphic base established earlier. The drawing appears in its most dynamic form as a system of graphic simulations. It allows the realization and representation of facts, ideas and objects by the use of graphic symbols. By manipulating these, the designer builds and destroys, places and displaces, reconstructs and determines the dimensions of the building. This simulation gives him the power to transform the environment in his "head" before it reaches reality. As the search approaches its goal, the designer's knowledge increases in quantity and precision. The drawings take shape to the point of consuming all the information necessary and sufficient to define all the parts of the object.
- *The construction model.* This is a set of graphic representations that ensure through the precision of the angles, the measurements, the conventions and the scale the preservation and non-ambiguity of the information transmitted to the project builder.

Because of the problems inherent with traditional media, substituting them with VR would be useful essentially during the second of Lebahar's phases: *the search for an object through graphic simulation*. VR representation becomes most helpful in verification and refinement tasks as applied

distrain continuellement le concepteur en attirant l'attention sur lui-même inutilement, il en affectera le processus ». Ceci garde un lien avec des aspects exposés par Ch. Moore et G. Allen (Moore, Ch., Allen, G. 1981) : « les médias traditionnels échouent dans le fait de représenter l'espace puisque l'espace n'est pas dessiné, mais plus exactement des plans et des coupes dans lesquels il se réfugie. De cette façon, nous sommes attirés à nous fixer sur les médias eux-mêmes, au détriment de l'espace architectural qui pourtant se dévoile à travers eux ».

Ces limites du média traditionnel 2D (le dessin, et la perspective) ont été transposées dans le dessin assisté par ordinateur (C.A.O.) sur une feuille numérique 2D représentée à l'écran de l'ordinateur et sur les logiciels de rendu. Nous devons espérer plusieurs minutes pour avoir un point de vue de l'objet. Aussi dans ces outils, le travail d'abstraction est ardu, puisque les représentations rapides sont généralement en « wireframe » produisant encore un autre type de décodage de l'information.

#### la réalité virtuelle

Elle est le produit du développement des interfaces homme/ordinateur (Human / Computer Interface) où l'ordinateur est utilisé pour traiter d'immenses quantités de données et pour simuler la réalité. Malgré les matériaux informatiques et la complexité normalement liés à la RV, elle ne doit pas être définie comme une technologie sinon comme une expérience. Nous définissons la RV comme les systèmes et les techniques qui nous apportent l'expérience de présence dans un environnement tridimensionnel généré par ordinateur. Cette sensation de présence est obtenue par l'interaction directe en temps réel de l'utilisateur dans le monde virtuel. Temps réel : les réponses du système dues aux interactions directes de l'utilisateur doivent arriver instantanément pour qu'elles apparaissent comme dans le temps normal.

Avec l'usage de matériels informatiques très sophistiqués comme le visiocasque (Head Mounted Display) et les gants numériques, la RV est souvent perçue comme immersive ou d'intrusion. Cependant, avec une station de travail conventionnelle (un écran, un clavier et une souris), l'utilisateur peut expérimenter la sensation de présence

dans un monde virtuel. Ici, nous parlons de la RV non-immersive (Robertson 1993). Les systèmes de RV non-immersifs possèdent trois avantages sur les systèmes immersifs : avantage dans l'évolution vu l'état actuel de l'industrie de l'informatique, avantage, car ils surpassent les limites techniques et les problèmes actuels des systèmes immersifs et avantage grâce à sa facilité d'utilisation.

#### processus de design

À l'intérieur du processus de conception, il est possible d'identifier deux structures. La première touche une série d'étapes qui structure le processus dans le temps. Lebahar (1983) propose trois étapes selon une étude sur l'outil du dessin en architecture. La deuxième structure porte sur le rôle du média graphique dans chaque partie du processus. Ici, nous parlons de deux activités : une passive de communication de l'information et une active d'idéation graphique ou design conceptuel de l'objet. Les étapes de Lebahar sont :

- *Le diagnostic architectural.* Cette phase scrute les données et les contraintes qui limitent la recherche dans un champ de possibilités et d'impossibilités. De ces informations, il en déduit un programme. Cette phase est terminée par quelques notes écrites et un premier dessin ou groupe de dessins (la base graphique pour la phase suivante).
- *La recherche de l'objet par la simulation graphique.* Cette phase se développe à partir d'un enrichissement et d'un approfondissement de la base graphique précédemment établie. Le dessin y apparaît dans sa pleine dynamique, comme un système de simulation graphique. Il permet de réaliser et de représenter des faits, des idées et des choses, par des objets graphiques. En manipulant ces objets, le concepteur va construire et détruire, placer et déplacer, reconstruire, décider et déterminer les dimensions du bâtiment. Cette simulation lui donne le pouvoir de transformer l'environnement dans sa « tête » avant qu'il ne le soit dans la réalité physique. Au fur et à mesure que la recherche se rapproche de son but, la connaissance du concepteur s'accroît en quantité et en précision. Les dessins vont s'affirmer jusqu'au point d'épuiser l'information

to concept ideas. VR regulates the process. It allows the designer to transform the environment directly in virtual space as opposed to traditional drawing where this transformation must occur in the designer's "head," according to Lebahar.

As stated earlier, there are two roles played by graphic media in the design process: graphic ideation or conceptual design and communication of information. These should not be considered alike. The first is a formative process dealing with creating and evolving ideas; the second is a descriptive process aiming at presenting to others fully-formed ideas. Graphic ideation is form of conversation the designer has with himself while graphic communication involves transmitting visual information to others. In most cases, ideation precedes communication. The creator must first discover and develop an idea before communicating it (Marshall 1992). The fact of using VR as a graphic media in both ideation and communication will allow us to study its impact on the process.

#### the decision-taking process

According to Velez (1993), the drawbacks associated with traditional 2D and 3D representations are the long execution times and the characteristics of the feedback relating to decisions taken during the phase of elaboration of design concepts. The designer must often wait a long time before obtaining, as a result of the construction of his proposal, a response that will allow him to confront the design hypothesis contained within the proposal with the actual result and to verify the performance obtained in reality as compared with that which was expected. An amelioration in the frequency and the characteristics of the feedback provided by the use of VR in the design process would lead to a corresponding acceleration in the design hypothesis formulation/correction cycle.

#### cognitive aspects

The designer's capacity for perception and information processing are limited. Keeping the load below this boundary is necessary in order to avoid major degradation of performance in relation to the essential objectives of the design task. The designer's cognitive aspects, relating to the processing of visual information and most likely to be affected by the use of VR are:

- *Visual perception.* According to Wickens (1987), expectations can be controlled by the quality and redundancy of stimuli. If expectations are vague, stimuli must be of good quality and vice versa. An increase in the loss of stimuli affects responses. This control of expectations can be made with material which is familiar to the user.

In design, decisionmaking based on the formulation of design hypotheses is crucial. These hypotheses can be considered as expectations that can be controlled by the quality and redundancy of the stimuli provided by VR. The impact of VR on visual perception depends more specifically on the characteristics of these stimuli. Redundancy implies combining several stimuli resulting from the perception of a given information. The quality of stimuli provided by VR is due to having a realistic representation. The characteristics of this representation produce better quality stimuli than drawing for the manipulation of design hypotheses.

- *The mental images and models.* This is the mental representation of the structure, components and relationship between components of a given object (Sperandio 1984). In design, we refer to the designer's internal representation of the object of design. According to the process of searching for solutions to a design problem, the designer produces mental models of anticipated design solutions. In some cases, because of lack of experience or the complexity of the solutions being considered errors will be produced in the mental models that are generated, thus affecting the design process.

VR provides a means of validating and reaching a consensus regarding these mental models, either by the designer himself or by the entire team involved in a project. This is effected through rapid simulation of large amounts of 3D information, without regard to the complexity of the project.

- *The mental work load.* This is the quantitative or qualitative measure of the activity necessary to accomplish a given task (Sperandio

nécessaire et suffisante pour définir toutes les parties de l'objet.

- *L'établissement du modèle de construction.* C'est un ensemble de représentations graphiques dont la précision des angles, des mesures, des conventions et de l'échelle assure la conservation et la non-ambiguïté du message qu'il contient pour les constructeurs.

Selon les problèmes avancés par le média traditionnel, la RV devient indispensable dans l'étape que propose Lebahar : *la recherche de l'objet par simulation graphique*, en changeant, évidemment, le dessin par la RV comme outil de simulation et de visualisation. La RV gagne principalement son utilité lors de la vérification et du raffinement des idées pour la conception. La RV devient un outil régulateur du processus. Ainsi, elle permet au concepteur de transformer l'environnement directement dans l'espace virtuel, à la différence du dessin qui se fait dans la «tête» du concepteur, selon Lebahar.

*Le processus de conception comporte deux éléments.* L'idéation graphique ou design conceptuel et la communication graphique de l'information. L'idéation graphique ne doit pas être confondue avec la communication graphique. La première est un processus formatif qui porte sur la conception et la maturation des idées ; la seconde est un processus explicatif qui présente des idées complètement formées aux autres. L'idéation graphique est comme se parler visuellement, tandis que la communication graphique est parler visuellement aux autres. Habituellement, l'idéation graphique précède la communication graphique. Le penseur visuel doit en premier lieu découvrir et développer une idée pour ensuite la communiquer (Marshall 1992). Le fait d'utiliser la RV, comme média graphique pour l'idéation et pour la communication, nous permettra d'évaluer son impact sur le processus.

#### **le processus de prise de décisions**

Selon Velez (Velez 1993), les difficultés des systèmes de représentations bidimensionnelles et tridimensionnelles traditionnelles sont la lenteur d'exécution et les caractéristiques de la rétroaction des effets des décisions qui ont été prises durant

l'étape de proposition des alternatives de conception. Le concepteur doit, quelquefois, attendre jusqu'à la construction pour obtenir une réponse qui lui permette de confronter les hypothèses de design et le résultat, pouvant alors critiquer et vérifier efficacement le degré de précision de la solution proposée. Donc, une modification de la fréquence et des caractéristiques de la ré-alimentation, suscitée par l'usage de la RV, conduirait à une augmentation du cycle formulation/correction des hypothèses de design.

#### **les aspects cognitifs**

Pour le concepteur, les capacités de perception et de traitement de l'information sont limitées. Le maintien d'une charge globale à un niveau inférieur à la limite de ces capacités est recherché afin d'éviter une dégradation majeure de la performance par rapport aux objectifs essentiels de la tâche de conception. Les aspects cognitifs du concepteur qui portent sur le traitement de l'information visuelle, les plus susceptibles de subir un impact par l'outil RV sont :

- *La perception visuelle.* Selon Wickens (1987), les attentes peuvent être contrôlées grâce à la qualité et la redondance des stimulus. Si les attentes sont faibles, les stimulus doivent être de bonne qualité et vice versa. L'augmentation de la perte des éléments du stimulus contrôle l'efficacité des réponses. Le contrôle des attentes peut être ainsi obtenu à l'aide de l'utilisation de matériel familier à l'usager.

Dans la conception, la prise de décisions, selon la formulation des hypothèses de design est un élément primordial. Ces hypothèses peuvent être considérées comme des attentes pouvant être contrôlées par la qualité et la redondance des stimulus donnés par la RV. L'impact de la RV sur la perception visuelle réside, plus spécifiquement, sur les caractéristiques de ces stimulus. La redondance amène la combinaison de plusieurs stimulus pour la perception d'une information donnée. La qualité des stimulus dans la RV propose une représentation plus réaliste. Les caractéristiques de cette représentation donnent des stimulus d'une plus grande qualité que le dessin, en regard à la manipulation

1980). For the designer, the task is design. Mental work load must be controlled in order to insure adequate performance in the accomplishment of the task. The goal is therefore to identify the limits and capacities of information processing in comparison with the task at hand.

The impact of VR on mental work load is related to the degree of abstraction to which the designer is confronted when attempting to understand the spacial qualities of an object. This abstraction results from the characteristics of drawing as a graphic medium for visualization: having to encode and decode information. With VR, the encoding and decoding of symbols and standard conventions used in practice (in the case of drawings) is reduced and the designer is freed from calling on his capacity for interpreting abstract information to understand his design. He will be able to perform more continuous creative work.

- *The treatment of errors.* In design practice, errors are common. Many are detected by their author, often before any action is initiated and before the initiation of critical behaviour. Sometimes, however, errors are not detected. According to Norman (1981), two things must happen for critical behaviour to be initiated: feedback must have occurred and divergence between expectations and observed events must have been detected.

*VR is an ideal vehicle for generating feedback.* The representation of problem situations and the real scale and real time graphic simulation of solutions provides the designer with a critical and judicious evaluation within a short delay. The objective, of course, is the detection and above all the elimination of errors.

#### methodology

The goal of this research is to explain the impact of non-immersive VR as a visualization tool on the design process in comparison with traditional tools such as drawing. In order to achieve this result taking into account the set of problems raised by traditional tools and the theoretical constructs used to explain their impact, we have proposed a

series of hypotheses:

- 1 Improved frequency and feedback due to the use of VR will increase the speed of the design hypothesis formation/correction cycle within the decision making process.
- 2 VR as a visualization tool affects several of the designer's cognitive aspects:
  - 2a *Visual perception.* As per Wickens (1987), because of the quality and redundancy of stimuli provided by VR, the expectations (seen as design hypotheses) can be controlled thus affecting the object search by graphic simulation as compared with drawing media.
  - 2b *Mental images and models.* As per Sperandio (1984), VR's characteristics improve the elaboration and the structure of mental images and models of design objects.
  - 2c *Mental work load.* VR's characteristics can also reduce the amount of spacial abstraction required of the designer by diminishing the encoding and decoding of information. According to Sperandio (1980), this will cause a corresponding reduction in the mental workload associated with the creation and communication of design objects in comparison with traditional media.
  - 2d *Errors.* Work by Norman (1981) shows that since VR is an efficient tool for providing feedback (verification) of the 3D characteristics of the design object, it can improve the management and reduce the quantity of errors produced in comparison with traditional media.

From these specific hypotheses, we have put forward the following general hypotheses:

- 3 VR has an impact on the object search by graphic simulation.
- 4 The comprehension of the design object is improved by the use of VR in communicating its 3D information.

des hypothèses de design.

- *L'image mentale / les modèles mentaux.* Il s'agit d'une représentation interne de la structure, des composants et des relations entre les composants d'un objet déterminé (Sperandio 1984). En design, nous parlons de la représentation interne du concepteur en relation avec l'objet de design. Dans le travail de conception, le concepteur produit des modèles mentaux de la solution de design. Dans certains cas, le manque d'expérience et la complexité de la solution envisagée produisent des erreurs dans les modèles mentaux générés, affectant ainsi le processus de design.

La RV permet la validation et le consensus de ces images mentales, soit pour le concepteur lui-même ou pour l'ensemble d'un groupe de travail. Ceci est obtenu à travers une simulation rapide, comportant une plus grande quantité d'informations, en 3D, indépendamment de la complexité du projet.

- *La charge mentale de travail.* La charge mentale de travail est une mesure quantitative ou qualitative du niveau d'activité nécessaire à l'accomplissement d'un travail donné (1980). Cette tâche pour le concepteur est le design. La raison qui justifie l'utilisation de la charge mentale de travail est d'assurer une bonne performance de l'exécution de la tâche. L'objectif espéré est d'identifier les capacités et les limites du traitement de l'information par rapport aux exigences de la tâche.

L'impact de la RV sur la charge mentale de travail porte sur le degré d'abstraction à laquelle est soumis le concepteur dans la compréhension spatiale du bâtiment. Cette abstraction résulte de la dynamique à l'intérieur du dessin comme média graphique de visualisation : le codage et le décodage de l'information. Avec la RV ces tâches de codage et décodage des symboles et des conventions normalisés par la pratique (utilisés sur les plans) seront réduits. Le concepteur n'aura pas besoin d'utiliser sa capacité d'abstraction pour visualiser son oeuvre. Il aura alors l'opportunité d'avoir un travail créatif continu.

- *Le traitement des erreurs.* Dans la pratique du design, les erreurs sont communes. Plusieurs erreurs sont détectées par l'auteur, souvent même avant que l'acte ne soit initié et avant même aussi qu'un comportement critique ne soit adopté. Quelquefois, des erreurs subsistent. Selon Norman (1981), pour qu'un comportement critique soit enclenché, deux phénomènes doivent se produire : un mécanisme de rétroaction et la divergence entre les attentes et les événements.

La RV est un mécanisme idéal de rétroaction. La représentation de situations de problème et la simulation graphique de la solution à l'échelle et en temps réel procurent au concepteur un jugement critique et judicieux dans un bref délai. Les buts sont la détection et, surtout, l'élimination des erreurs.

#### méthodologie

Le but de cette recherche est d'étudier l'impact de la RV non-immersive comme outil de visualisation sur le processus de conception par rapport aux outils traditionnels tel que le dessin. Pour ce faire, selon la problématique soulevée par les outils traditionnels ainsi que le cadre théorique expliquant l'impact, nous proposons une série d'hypothèses :

- 1 Une meilleure fréquence et qualité de la ré-alimentation (feed-back), due à l'utilisation de la RV, augmentera la vitesse du cycle formulation/correction d'hypothèses de design à l'intérieur du processus de prise de décisions.
- 2 La RV comme outil de visualisation affecte les suivants aspects cognitifs du concepteur :
  - 2a *La perception visuelle.* Selon les travaux de Wickens (1987), par la qualité et la redondance des stimulus donnés à travers la RV, les attentes (vues comme des hypothèses de design) peuvent être contrôlées, affectant la recherche de l'objet par simulation graphique telle qu'exposée par Lebahar, en comparaison avec le média dessin.
  - 2b *Limage mentale / les modèles mentaux.* Suite aux travaux de Sperandio (1984), la RV par ses caractéristiques peut améliorer

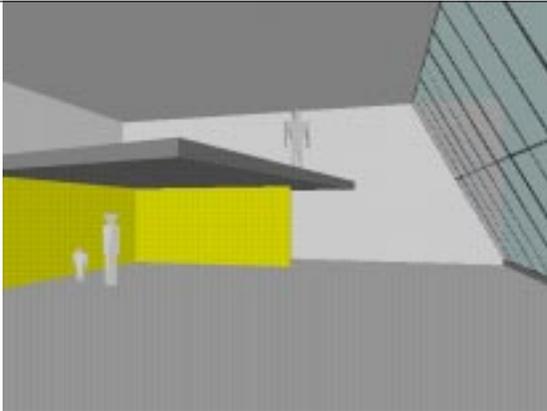


Figure 1. Project 1: to design a stairway to link two levels in a predefined space. [Projet 1 : un escalier doit être conçu pour accéder au niveau supérieur d'un espace prédéterminé.]



Figure 2. Project 2: to design a bench for seating inside a predefined bus shelter. [Projet 2 : le design d'un banc permettant d'être assis à l'intérieur d'un arrêt d'autobus.]

- 5 VR has an impact on the result of the design process.

*Experimentation.* In order to validate these hypotheses and explain the impact of VR, we designed an experiment consisting of two tests. As described earlier, the design process is made up of two activities which are graphic ideation or conceptual design and communication. The first part was therefore an Active Test concentrating on the first activity and the second a Passive Test centering on communication. In spite of various earlier research mostly of the passive type (Henry 1992; Campbell 1996), the use of VR for visualization and conceptualization has only been studied superficially and empirically. Researchers have concentrated primarily on technical aspects related to the interface allowing immersive interaction (Mine 1996) and on the application of spacial orientation in virtual environments (Satalich 1995).

The experiment was conducted as part of the academic content of a computer graphics course, Computer Graphics 1. This is a regular compulsory course included in the first year curriculum of the Bachelor of Industrial Design program of the University of Montreal. Virtus Corporation Inc. contributed to the experiment by providing 15 copies of its non-immersive VR software Walkthrough Pro 2,6 (for MacOS). Virtus has been involved in the development of non-immersive VR applications since 1990.

*Sample Population.* Even though the role played by gender in the interpretation of graphic information is poorly documented, we worked with a population composed of roughly equal numbers of males and females. The population involved in the experiment was made up of a total of 72 students (34 women and 38 men) of which a majority were first year students in the Industrial Design program (53). The others were at various stages of their formation in other programs of the faculty: Interior Design (10), Landscape Architecture (6), Architecture (2) and Urban Planning (1). It is important to note that the Industrial Design sub-population will be subjected to closer scrutiny since it constituted a more homogeneous group of novice practitioners of design and computer graphic skills (first year). Most of the students from other disci-

l'élaboration, la structure des images et des modèles mentaux traitant l'objet de design.

2c *La charge mentale de travail.* Pour ses caractéristiques, la RV peut minimiser l'abstraction spatiale à laquelle est soumis le concepteur due à une réduction du codage et du décodage de l'information. Selon les travaux de Sperandio (1980), la charge mentale de travail dans le design conceptuel et dans la communication de l'objet de design est diminuée, en comparaison au média traditionnel.

2d *Les erreurs.* Selon les travaux de Norman (1981), puisque la visualisation avec la RV est un moyen efficace de rétroaction (vérification) de l'information 3D de l'objet de design, la RV peut améliorer la gestion et peut amoindrir la quantité des erreurs à l'intérieur du projet.

Subsidiairement aux hypothèses spécifiques découlent les hypothèses générales suivantes :

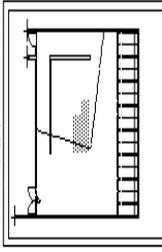
- 3 La RV a un impact sur la recherche de l'objet par la simulation par rapport au média dessin.
- 4 La compréhension de l'objet de design est accrue en RV lors la communication de l'information 3D.
- 5 La RV a un impact sur le résultat du processus de design.

*Expérimentation.* Pour arriver à valider ces hypothèses et à expliquer l'impact de la RV, nous avons construit un design de l'expérimentation basé sur deux tests. Comme nous l'avons évoqué antérieurement, le processus de conception comporte deux activités dont l'idéation graphique ou design conceptuel et la communication. Conséquemment, la première activité est un Test Actif touchant l'idéation et la deuxième est un Test Passif touchant la communication. Malgré de nombreuses recherches préalables surtout de type passif (Henry 1992; Campbell 1996), la RV pour la visualisation et pour le travail de conception n'a été abordée que d'une façon exploratoire et empirique. Les chercheurs ont traité surtout des as-

### Hypothèses de design

Projet #  Groupe/Équipe #  Date:

Ajoutez, SVP, une colonne (à l'intérieur de la zone hachurée) pour soutenir ainsi l'étage supérieur (en partant du plancher jusqu'au premier étage). L'intention est de proposer l'emplacement, la forme (section), les effets spatiaux / formes souhaités et les proportions (dimensions faussées pour de raisons esthétiques) de la colonne par rapport à l'escalier projeté.



Pendant 45 min., indiquez, SVP, la **quantité** d'hypothèses\* ou d'itératives de design pour solutionner ce problème temporaire et le **temps** de vie de chacune (par exemple 30 min.) jusqu'au moment de changer pour une autre hypothèse après l'avoir vérifiée d'une façon bidimensionnelle (sur des plans) et tridimensionnelle (sur des perspectives). Proposez la quantité d'hypothèses nécessaires pour arriver à une solution acceptée par tous les membres de l'équipe. Il est possible de reprendre une hypothèse antérieure.

N° hypothèse	Nom de l'hypothèse	Heure (début)	Heure (fin)	Vérification		Observations
				2D	3D	
0	Exemple	1:30	1:40	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Section finale
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figure 3. Control sheet used to brief students with an unexpected problem and to evaluate the design hypothesis formulation/correction cycle. [Questionnaire de réponses pour l'évaluation du cycle de formulation/correction des hypothèses de design.]

### Test actif

Projet #  Équipe #  Date:

Ce questionnaire se porte sur l'évaluation des critères des projets de design réalisés par les étudiants de votre département. Ce n'est pas un test de connaissance, mais un questionnaire de perception et d'appréciation. Les réponses doivent être données de façon objective et sans aucune influence de la part de l'évaluateur. Les réponses doivent être données de façon objective et sans aucune influence de la part de l'évaluateur.

Critères	N°	Échelle de notation										Description
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Proportions	1	Proportions										Proportions
	2	Complexité										Complexité
	3	Qualité des formes										Qualité des formes
	4	Qualité des matériaux										Qualité des matériaux
	5	Qualité des couleurs										Qualité des couleurs
	6	Qualité des textures										Qualité des textures
	7	Qualité des détails										Qualité des détails
Adaptation	8	Adaptation au contexte d'utilisation										Adaptation au contexte d'utilisation
	9	Adaptation à l'espace										Adaptation à l'espace
	10	Adaptation à l'utilisateur										Adaptation à l'utilisateur
Communication	11	Clarté de la communication										Clarté de la communication
	12	Adaptation à la tâche										Adaptation à la tâche
Évaluation	13	Évaluation de la communication										Évaluation de la communication
	14	Clarté de la communication										Clarté de la communication
	15	Adaptation à la tâche										Adaptation à la tâche

Figure 4. Evaluation grid used by jury in assessing the quality of projects in Active Test. [Grille utilisée par le groupe d'évaluateurs pour noter la qualité des projets lors du test actif.]

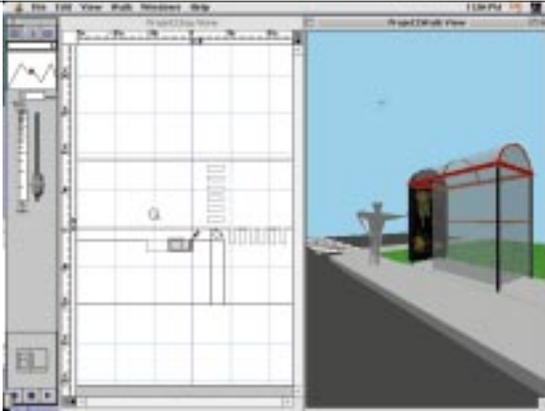


Figure 5. Screenshot of Walkthrough Pro interface showing interactive 3D window (Walk View) and one of several available 2D windows for detail work (Top View). [Capture de l'écran montrant l'interface du logiciel Virtus Walkthrough Pro avec la fenêtre interactive du monde 3D (Walk View) et une des fenêtres disponibles en 2D pour le travail en détail (Top View).]

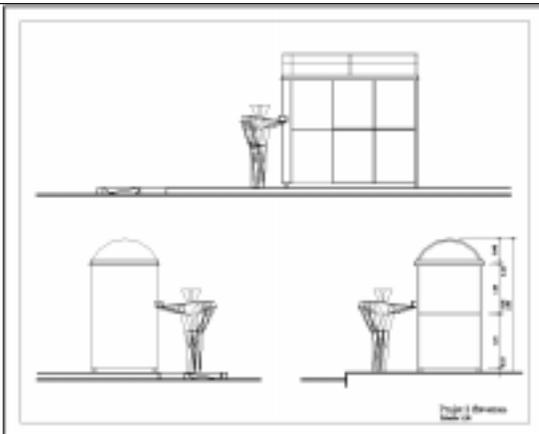


Figure 6. A 2D elevation as part of the information package describing Project 2 (bench) for teams working with traditional tools. [Vue en 2D (élévation), composante de l'ensemble de l'information, qui décrit le projet 2 (banc) pour les groupes travaillant avec les outils traditionnels.]

plines were more experienced.

For logistical reasons explained further on, the students were divided into groups for both tests and further divided into teams of 3 students each. The total population was thus divided into two equal groups of 36 (groups A and B). All members of Group A were Industrial Design students. Because of the size of these groups, the experiment was run during two separate periods each week: Group A on Tuesdays afternoons from 13h00 to 17h00 (4 hours) and Group B on Thursday mornings from 09h00 to 13h00 (4 hours). Making use of the 15 computers in the computer lab, each of the 12 teams of each group was allocated two computers for a period of two hours a week. The remaining three computers in the lab were used for scanning images and for file management and back-up.

**Laboratory.** The facility used for the experiment was the faculty's Mac OS computer laboratory equipped with 15 Apple Power Macintosh computers, model 7100, 60 and 80 MHz, 16MB RAM, 500MB of hard disk storage, running MacOS v7.5.5. Thirteen computers were equipped with 17" high resolution screens and the remaining two with 15" screens. These last two were of the three used for support purposes.

#### the active test

This test involved the activity of conception. The student teams were required to design two objects according to precise design briefs describing the context in which the objects were to be inserted. The first project (Project 1) consisted in designing a stairway to join two levels in a predetermined space. Several characteristics specific to the end use (function of the space, user population) were given. A 3D mannequin was included for scaling purposes (Figure 1). The second project (Project 2) was to design a bench for public seating. Again, several parameters and constraints were provided concerning size of the users, location, spacial and functional requirements (Figure 2). Each team was required to solve both projects, in sequence, in an allotted time of six hours for each project.

**Procedure.** Both Group A and Group B

pects techniques liés à l'interface pour interagir dans l'immersion (Mine 1996) et dans l'application de l'orientation spatiale pour les environnements virtuels (Satalich 1995).

Les expériences ont été effectuées comme partie intégrante du cours : *Dessin et infographie I*. Ce cours est dédié aux étudiants de première année du programme de design industriel à l'Université de Montréal. La compagnie Virtus Corporation Inc. a contribué à cette étude en fournissant 15 copies du logiciel de RV non-immersive Virtus Walkthrough Pro 2.6 (version Mac). Il s'agit d'une compagnie liée au développement des logiciels de RV non-immersive depuis 1990.

**Échantillonnage.** Bien que le rôle du sexe dans le traitement de l'information visuelle ne soit pas bien documenté, dans cette étude nous avons travaillé avec des personnes des deux sexes. L'échantillonnage est formé de 72 étudiants et étudiantes (34 femmes et 38 hommes) qui sont, pour la plupart, à la première année d'études en design industriel (53). Le reste du groupe est constitué d'étudiants provenant des autres disciplines de la faculté, soit : design intérieur (10), architecture de paysage (6), architecture (2) et urbanisme (1). Il est important de souligner que les données provenant des étudiants en design industriel seront observées davantage puisque ces étudiants constituent un groupe homogène d'individus « novices » dans l'activité de conception et dans l'infographie (1<sup>ère</sup> année). Les étudiants des autres disciplines, généralement, possèdent déjà une certaine expérience.

Pour des fins spécifiques, indiquées plus loin, les étudiants ont travaillé en groupe pour les deux tests, chaque équipe était composée de trois membres. L'ensemble des étudiants a été divisé en deux groupes de 36 (Groupe A et B). Toute la population du groupe A sont des étudiants en design industriel. Dû à la grande taille de l'ensemble d'étudiants, l'expérience s'est déroulée durant deux périodes séparées à chaque semaine : pour le Groupe A les mardis après-midi de 13h00 à 17h00 (4 heures) et pour le Groupe B les jeudis matin de 09h00 à 13h00 (4 heures). Profitant des 15 machines à leur disposition dans le laboratoire informatique, chacun des groupes avait un temps

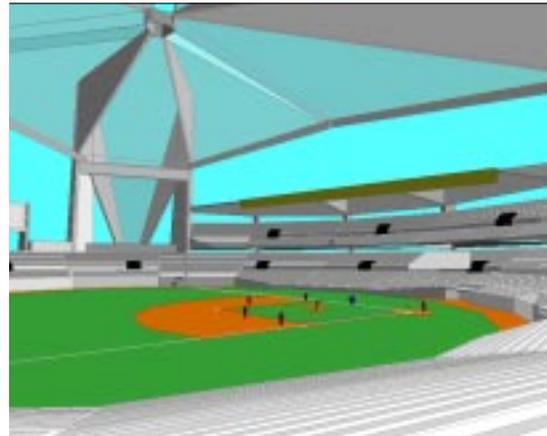


Figure 7. A spectator's 3D view of the 45,000 seat baseball stadium used as the subject of the Passive Test. [Vue 3D du point de vue d'un spectateur dans le stade de 45 000 personnes utilisé comme sujet pour le test passif.]

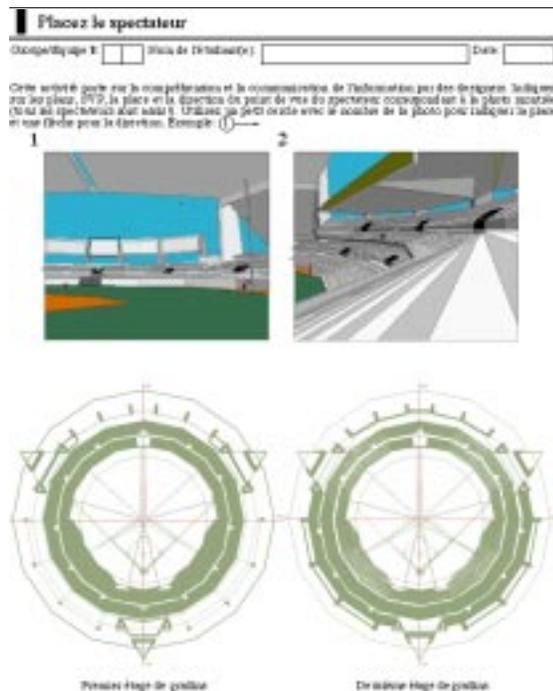


Figure 8. Part of the Passive Test questionnaire showing two spectator views and drawings of the two levels where students were to indicate spectator's position and line of sight. [Partie du questionnaire du test passif montrant deux points de vue des spectateurs et dessins des deux niveaux du stade où les étudiants peuvent indiquer la position et la direction du regard du spectateur.]

worked first on Project 1, but each used different tools. Group A was limited to traditional drawing media and CAD software while Group B used VR tools only. This first project lasted three weeks during which each team worked two hours each week (total 6 hours). The time limit was due to the controls that were imposed on the activities: no work to be done outside the laboratory, no communication relating to the project between groups, etc. In order to insure this, all files and documents were collected from the teams before leaving the lab. For the second part, Project 2 was assigned and the groups exchanged design tools: Group A worked with VR and Group B with traditional tools. Again, this activity was conducted over a three week period, each team working 2 hours a week for a total of 6 hours.

*group A: traditional tools*

The following traditional CAD software was available to the students: Adobe FreeHand for 2D drawing and Form•Z (autodesys) for 3D modeling. Paper and pencil was also available for sketching solutions and communication within members of the team. A minimum of information was required from each team at the completion of the project in order to understand the solution: paper documents (plans, elevations and on perspective view) as well as computer files. Prior to the experiment, all students received two weeks training in the use of each software application used (including Walkthrough Pro for VR) in the form of tutorials and two practical exercises. Additionally, a practice period of six hours per week was reserved in the computer lab in order for the students to complete their assignments.

*Strategy.* Groups A and B completed the first Active Test during three two-hour periods, but at different times of the week (12 teams per half day, two half days per week for three weeks). The three person teams were formed according to their experience and discipline. Experienced computer users were distributed evenly throughout the teams to insure balanced abilities. Students from disciplines other than Industrial Design were grouped in teams together. The strategy in forming the teams was to produce results representative of the capabilities of average students. During the experiment, members of each group were discouraged from

communicating with members of the other group (working on the same project but with different tools and during a different half day period of the week). Progress was controlled and the influence of outsiders was limited by collecting and tagging all material after each work session (paper and digital). All material was then re-distributed to the teams at the beginning of the next work session.

After completing each project, all teams handed in final documents (paper and digital) as proof of design results. Each team handed in two projects for a total of 48 projects (24 staircases and 24 benches). In order to standardize the presentation format of all projects, those produced with traditional tools were remodeled with Walkthrough Pro. We therefore had a bank of forty eight projects that could be evaluated through a common medium.

*Evaluation.* Final evaluation was carried out at two times: a continuous evaluation during the progress of the test and a definitive evaluation by a panel of experts, academics and practicing professionals in architecture and industrial design.

Concerning Hypotheses 1 and 2a, one student from each team measured the time of each design hypothesis formulation/correction cycle. This exercise was carried out after giving the group a "surprise challenge" during the second of the three work sessions of each project which consisted of solving a specific problem related to the current project.

For the staircase in Project 1, students were asked to add a column to support the upper level (Figure 3). For the bench in Project 2, an armrest for the elderly and handicapped was to be added. The intention was to confront the teams with an unexpected problem which required immediate attention - having to introduce a new element, propose its shape, properties and position in respect to objects already in place. One member of each team noted on a form supplied, the quantity of design hypotheses that were considered and the time span of each one, until a solution acceptable to all team members was arrived at.

The jury, made up of four professionals, two

de travail de deux heures, il y avait ainsi une autre subdivision à l'intérieur des groupes A et B. Durant ces deux heures de travail, six équipes pouvaient utiliser deux ordinateurs, soit douze ordinateurs. Les ordinateurs restants (3) ont été utilisés pour la numérisation, pour la coordination et pour la sauvegarde des fichiers.

*Laboratoire.* Laboratoire facultaire équipé des 15 machines PowerMac (Apple Computer) 7100 à 60 et 80 mhz, avec 16 Mo. de mémoire vive et un disque de 500 Mo., équipées du système d'exploitation Mac version 7.5.5. Il y a 13 écrans de 17 pouces à haute résolution et deux autres de 15 pouces. Ces dernières machines ont été utilisées pour le support technique.

#### le test actif

Ce test concerne l'activité de conception. Les participants ont dû créer deux projets (deux objets 3D) très précis selon un programme rigoureux dans contexte et un lieu déterminés.

*Projets.* Comme le premier projet (Projet 1), nous avons proposé le design d'un escalier pour la communication des deux niveaux selon une hauteur donnée et un contexte clair. Les caractéristiques de son usage (fonction de l'espace, utilisateurs) ont été détaillées. Un mannequin 3D a été inséré comme un repère pour la proportion des éléments (Figure 1). Quant au deuxième projet (Projet 2), nous avons prescrit le design d'un mobilier urbain (un banc). Nous avons fourni l'information explicite, par exemple : la taille, l'endroit et des caractéristiques formelles et d'utilisation (Figure 2). Nous avons exigé de chaque équipe de résoudre les deux projets, durant un temps alloué de 6 heures pour chaque projet et ce, dans l'ordre présenté.

*Déroulement.* Chaque groupe, A et B, a travaillé avec le même projet de façon indépendante avec un média graphique différent. Le groupe A a débuté avec le Projet 1 et le média graphique traditionnel du dessin et la CAO. Le groupe B a commencé aussi avec le Projet 1, mais avec la RV seulement. Cette première étape s'est échelonnée durant 3 semaines, où les étudiants ont travaillé pendant 3 périodes de 2 heures par semaine (pour un total de six heures). La limite de temps est due au contrôle auquel ont été soumis

les étudiants : interdiction de travailler sur les projets hors des heures indiquées, communication avec l'autre groupe, etc. Pour ce faire, les fichiers et tous les documents (papier) produits sont collectés avant de quitter le laboratoire. Pour la deuxième étape, les équipes ont changé de média graphique et de projet : groupe A avec le Projet 2 et le média RV ; le groupe B avec le Projet 2 et avec le média traditionnel dessin et CAO. Cette étape s'échelonne aussi sur trois semaines (2h/sem.).

#### A groupe traditionnel

Comme moyens traditionnels informatiques, le logiciel FreeHand (Adobe) a été utilisé pour le travail en 2D et le logiciel Form•Z (autodesk) pour la modélisation 3D. Le papier et les crayons ont été acceptés comme média graphique de dessin pour la réalisation des sketches dans la solution des problèmes et pour communiquer avec les membres de l'équipe. Pour ce groupe, nous avons exigé à la fin de chaque projet un minimum d'information pour comprendre la solution (plans, élévations, et une perspective) en format papier (impression) ainsi que les fichiers informatiques (modèle 3D inclus).

Tous les étudiants, et comme contenu pédagogique du cours, ont été formés durant 2 semaines pour chaque logiciel (incluant le logiciel Virtus Walkthrough Pro dans le cas de la RV). Deux travaux pratiques pour chaque logiciel ont aussi été exigés. Une période de 6h/sem. additionnelle a été allouée dans le laboratoire pour la réalisation de ces travaux.

*Stratégie.* Pour chacun des groupes (A et B) lors du Test Actif, les équipes de 3 personnes ont été formées selon leur expérience et discipline. Nous avons distribué les experts en informatique entre les équipes pour ainsi assurer une performance équilibrée. Les étudiants des autres disciplines ont été regroupés en équipes indépendantes. La pertinence de former des équipes de trois membres, en plus des restrictions portant sur la quantité de machines, était en vue d'obtenir des résultats de la plupart des étudiants. Pendant l'expérience, les étudiants ont été privés de communiquer avec l'autre groupe (autre média graphique, journées différentes « mardi/jeudi »). Nous avons contrôlé l'évolution des projets en

industrial designers and two architects, evaluated the final results of the 48 projects. This evaluation was carried out according to a set of objective design criteria. Each jury member judged the projects by filling out an evaluation grid containing all design criteria as well as their opposites (Hypotheses 2d, 3, 5) (Figure 4).

*group B: the VR tools*

For the VR tools group, Virtus Walkthrough Pro 2.6 software was used as it is a non-immersive VR application well suited to the equipment available in the computer lab. The interface and commands that operate this software are quite intuitive for 3D work. The VR group was limited exclusively to this software. It should be noted that this software offers also 2D projection windows to allow precise control over 3D models (Figure 5). Just as for traditional tools, at the end of each project teams working with VR were required to hand in digital documents with similar requirements. The project brief was also given out in a similar fashion. The site and its context were described in detail in a VR file. For the group working with traditional tools, the same information was communicated by plans, elevations, perspectives and one Form•Z file describing the 3D context. Note in Figure 6 the 3D mannequin included in the documents in order to establish scale.

*Strategy.* The same strategy was employed as for the group working with traditional tools.

*Evaluation.* Evaluation was carried out in the same manner as for the group working with traditional tools. The creation of VR files of all the traditionally produced projects was to eliminate any possible bias of the results due to the graphic media. All projects were therefore presented to the jury in VR form.

**the passive test**

The objective of this test was to evaluate the students' ability to comprehend an object (in this case a 45,000 seat baseball stadium) according to the medium used as communication tool. The project was represented in two graphic media: traditional and VR. The stadium was chosen as having an appropriate level of 3D complexity, many details that could serve as anchor points for the

test and a scale permitting a large choice of points of view (Figure 7).

Groups A and B were split in half (6 teams per half group) and assigned to one or the other medium. For the VR medium, a Walkthrough Pro file was provided while a set of drawings (plans, elevations and perspectives) of the stadium along with a Form•Z 3D model were used for traditional media viewing.

*group A: the traditional medium*

The group using traditional tools was shown all documents (paper and digital) necessary to understand the project, from outside as well as from inside. After thorough familiarization, each student was asked to answer a series of questions designed to measure their comprehension of the spacial and formal characteristics of the project. This test took place in the computer lab over a one hour period: 30 minutes of familiarization and 30 minutes to fill out the questionnaire. The stadium was chosen as 3D object because it poses a very interesting challenge to a designer's ability to understand the project. The questions were made up of 16 illustrated views of the stadium such as would be seen by spectators positioned at various places—still shots obtained from the VR model (Figure 8). The questions were answered by "finding" the spectator corresponding to each illustration. The students had to indicate the spectator's position and line of sight on two drawings representing the two levels of the stadium (Hypotheses 2a, 2b, 2c, 4). In this evaluation, the user's satisfaction with the graphic medium, the degree of abstraction and the quantity and cost of errors were touched on.

*group B: the VR medium*

The same VR software as with the Active Test was used. Only VR was used by the participating students of this group to explore the stadium project. The stadium was presented to this second group of students (the other halves of Groups A and B) as a VR model. Each team had 30 minutes to navigate through the stadium in order to form a mental image of the project. The same questionnaire was used as has been described for the group using traditional tools. No access was allowed to the VR model (nor to drawings and Form•Z model in the case of the previous group) while answering the

recupérant le matériel (papiers et fichiers informatiques) et en faisant des copies identifiées. À chaque période, le matériel a été redistribué pour poursuivre le projet.

À la fin des deux projets, les équipes ont remis les documents (papier et fichiers informatiques) comme preuve du résultat final de design (2 projets par équipe) pour un total de 48 projets (24 escaliers et 24 bancs). Postérieurement, nous avons traduit (modélisé sur Virtus Walkthrough Pro) les projets faits de façon traditionnelle en RV pour avoir la même représentation de chaque projet pour une évaluation ultérieure équitable.

*Évaluation.* L'évaluation finale a été faite en deux temps : une évaluation continue durant le test et une évaluation définitive réalisée lors de séances prévues à ce fait par un groupe d'experts (professeurs et professionnels en architecture et en design industriel).

Pour l'hypothèse 1 et 2.1, un étudiant de chaque équipe a chronométré le temps du cycle formulation/correction des hypothèses de design. Pour ce faire, nous avons interrompu les équipes pour leur demander une tâche particulière, au début de la deuxième période, soit une fois le projet démarré.

Dans le cas du Projet 1 (l'escalier), nous avons demandé d'ajouter une colonne pour soutenir l'étage supérieur. Voir figure 3. En ce qui concerne le Projet 2 (banc), la tâche a été d'inclure un soutien (appuis-bras) pour les personnes à mobilité réduite ou personnes âgées. L'intention était que les étudiants proposent l'emplacement, la forme et les proportions de ces nouveaux objets par rapport aux objets qu'ils conçoivent. Nous avons fourni une feuille pour qu'un des membres de l'équipe indique la quantité d'hypothèses suggérées et le temps de vie de chacune, jusqu'en arriver à une solution acceptée par tous les membres de l'équipe.

Nous avons eu l'aide de quatre professionnels en design industriel (2) et en architecture (2) pour évaluer les résultats de design de chaque projet (48 projets). Cette évaluation a été élaborée selon des critères de design objectifs. L'appréciation tenait compte de chaque aspect de design indiqué. Nous

avons conçu une grille dans laquelle figure chaque critère d'évaluation et son opposé (hypothèse 2.4, 3, 5). Voir Figure 4.

#### *B groupe RV*

Concernant la RV, le logiciel Virtus Walkthrough Pro 2.6 a été utilisé, car il est un logiciel de RV non-immersive et adapté au matériel informatique existant dans le laboratoire. Cependant, il faut remarquer que l'interface et les commandes de ce logiciel sont très intuitives pour le travail en 3D. Pour le groupe RV, les participants ont manipulé seulement le logiciel de RV. De plus, il est important de souligner que ce logiciel utilise aussi des représentations 2D pour travailler d'une manière très précise le monde 3D (Figure 5).

À l'égal du groupe de dessins et CAO, les documents numériques ont été exigés pour l'évaluation avec les mêmes paramètres que l'évaluation avec le média dessin. Comme l'autre groupe, le site et son contexte ont été donnés en détail. Un modèle du terrain virtuel sera disponible (pour le dessin et CAO, nous avons produit des plans, des façades, des perspectives et un fichier Form Z avec le contexte en 3D). La stratégie reste identique que le travail avec l'outil traditionnel. L'évaluation ne diffère en rien du groupe traditionnel. La traduction de traditionnel à RV a pour objet d'éliminer les implications possibles du média graphique dans l'évaluation. Donc tous les projets ont été évalués en RV.

#### **test passif**

Le but de ce test est de soumettre les deux groupes, à un test sur la compréhension d'un objet (dans notre cas : un stade de base-ball d'une capacité de 45 000 personnes). Le projet a été représenté sur les deux médias graphiques (traditionnel et RV). Le stade comporte une série de caractéristiques nécessaires au test : une certaine complexité tridimensionnelle, beaucoup de détails qui peuvent servir de points de repère pour le test et une échelle qui permet d'obtenir de multiples points de vue (Figure 7). Les deux groupes A et B ont travaillé avec les deux médias traditionnel et RV (une moitié de chaque groupe). Pour le média RV, un fichier Walkthrough Pro a été fourni. Pour le traditionnel, les dessins (plans, élévations et perspectives) du stade sont utilisés, accompagnés du

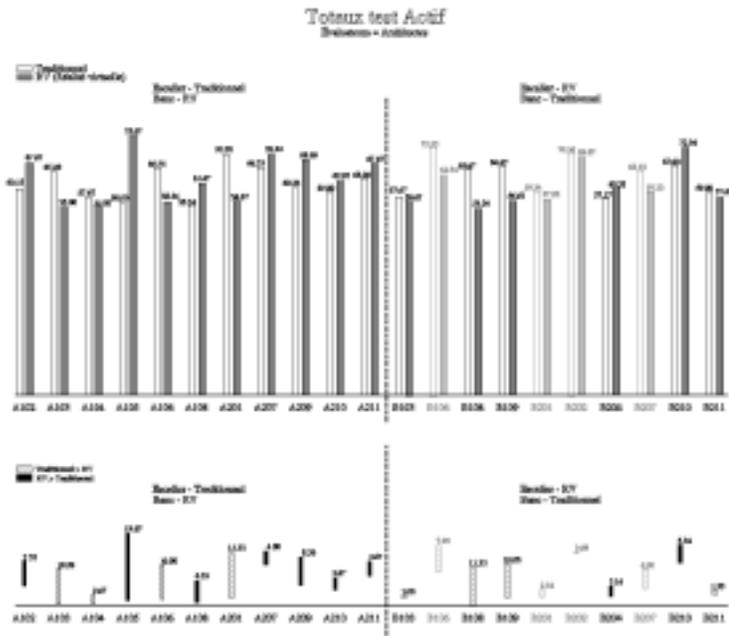


Figure 9. Details of the architects' evaluation showing results by individual teams. [Détail de l'évaluation faite par les architectes montrant les résultats par équipes.]

questionnaire. The same evaluation strategy was employed as for traditional media.

test results

This experiment produced three types of results: the Active Test, the Passive Test and the Design Hypothesis Formation/Correction Cycle Test. As mentioned earlier, the teams composed of Industrial Design students constituted a more homogeneous population and their results will be more closely observed. The results of the other teams will be indicated in gray but will not be included in the total results.

the active test results

Some teams were unable to complete their projects, both using traditional tools and using VR. These teams have been removed from the results since they could not be evaluated. The Active Test results will be presented in three ways: by jury member discipline (architects and industrial designers), by project (staircase and bench) and the overall results.

The architect jury did not identify a significant performance difference between traditional and VR media. By project, however, they showed small preferences: in the case of the staircase, a slight edge (2.09%) was accorded to traditional tools (61.76%) over VR (59.67%). For the bench, VR (63.4%) scored higher than traditional (62.2%) by a margin of 1.2%. Both projects combined, the architects evaluated the traditional tools at 61.98% and VR tools at 61.54%, producing a small margin of 0.44% in favour of traditional tools. See Figures 9 and 11.

The industrial designers judged the traditionally designed staircases to be superior (60.34%) to the VR results for the same project (57.77%) by a margin of 2.57%. They declared opposite results however for the benches, preferring VR by a margin of 5.44% (58.49% against 53.05%). The industrial designers' combined results showed a very slight preference for VR over traditional by a margin of 1.44% (58.13% against 56.69%). It is interesting to note that the industrial designers' marks were wider ranging between teams and between media than the architects' (Figures 10-11).

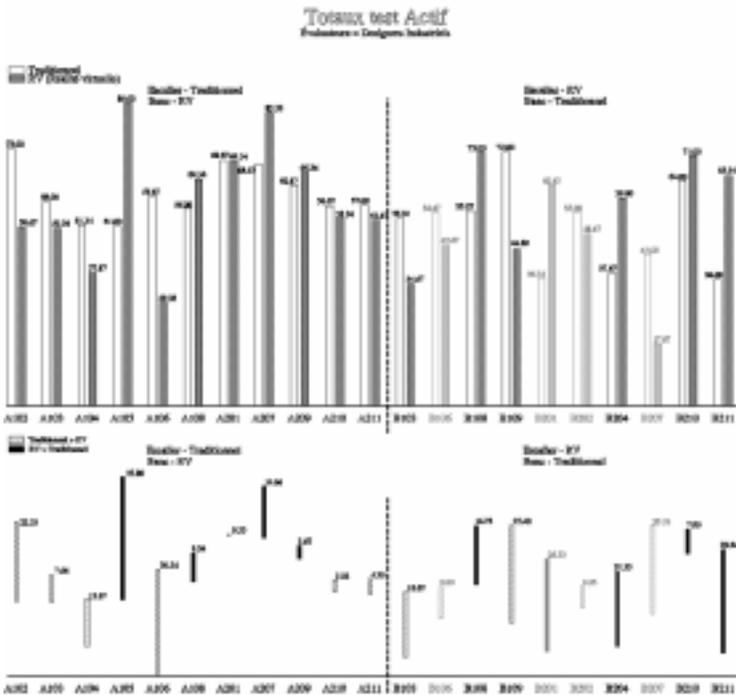


Figure 10. Details of the industrial designers' evaluation showing results by individual teams. [Détail de l'évaluation faite par les designers industriels montrant les résultats par équipes.]



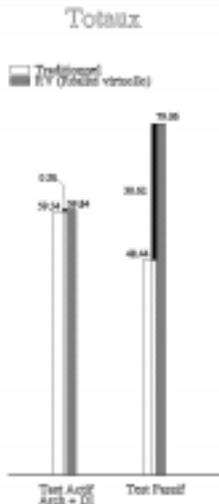


Figure 13. Overall scores of Active and Passive Tests showing striking difference in results. [Totaux des deux tests actif et passif démontrant une différence significative dans les résultats.]

Consolidating both juries' results for the staircase shows a slight preference of 2.33% for traditionally designed projects (61.05% over 58.72%). In the case of the bench, however, VR projects were ahead by 3.32% (60.95% over 57.63%).

Since the margins of preference for both projects are roughly equal but in opposite directions, as shown in Figure 11, the combined results of both juries and both projects all but cancel out: VR projects score 59.84% and traditional 59.34%. The difference, 0.50% in favor of VR, is not significant but seems to indicate that the subject of each project may have played a role in determining the results.

#### *the passive test results*

We consider here the results of all teams, excluding those made up of students from disciplines other than Industrial Design. Their results are however shown in gray. Figure 12 shows a marked difference in the level of comprehension and communication made possible through the use of VR. The questionnaire reveals that students that used VR to explore the stadium project scored 30.62% higher than those who used traditional tools (79.06% vs. 48.44%). These results are quite striking in comparison with those of the Active Test (Figure 13).

#### *design hypothesis formulation*

The results of this section of the experiment are presented as follows: speed of the cycle has been evaluated from the life span of each hypothesis (minutes per hypothesis). For the staircase, the speed was slower with VR (6.66 min/hyp) than with traditional media (5.31 min/hyp). These figures seem to agree with the Active Test results where traditional tools produced better results. For the bench, VR was faster (5.95 min/hyp) than traditional tools (6.34 min/hyp), again matching results obtained with the Active Test. The combined total for the cycle gives a slight but not significant edge to traditional tools over VR (5.89 min/hyp over 6.31 min/hyp) (Figure 14).

#### **conclusions**

We can conclude that VR has a significant influence on the activities of communicating 3D information in the design process. This is explained by the impact of VR on the cognitive aspects of the design activity: the formation of mental images, visual perception, mental work load and the handling of errors.

While the overall results of the Active Test were not striking, the two projects, considered separately, did in fact produce distinct results. The margins are small, but the direct correlation between these results and those of the Design Hypothesis Formulation/Correction Cycle Test leads us to believe that they are significant. Furthermore, we think these results may be due to slight variations in the two projects' degree of complexity. We question however whether it would be feasible in a future test to eliminate possible variations of complexity between the projects assigned. An analogy to illustrate this difficulty would be to consider testing the performance of relatively inexperienced drivers using two different automobiles (Autos 1 and 2). We would use two novice participants (Drivers A and B) of similar experience and training. A first test would be run on a prescribed Road Circuit X with Driver A behind the wheel of Auto 1 and B driving Auto 2. To eliminate the effects of possible skill variations between drivers (since we are not testing the competence of the drivers but the efficiency of the automobiles), we would run a second test, this time assigning Auto 2 to Driver A and Auto 1 to Driver B. Since both drivers now know the circuit (and

design. Comme nous l'avons énoncé auparavant, les groupes composés par les étudiants en design industriel constituent un groupe homogène et leurs résultats seront présentés davantage. Les résultats des autres groupes, étudiants des autres disciplines, seront indiqués en gris, mais ils ne seront pas estimés lors des calculs des totaux.

#### *le test actif*

Il est important de mentionner que certaines équipes n'ont pas pu compléter leurs projets, soit en traditionnel ou en RV. Ces groupes ont été retirés des résultats. Nous présenterons les résultats du test actif de trois façons : selon la discipline des experts évaluateurs (architectes et designers industriels), le sujet (escalier et banc) et les totaux de l'ensemble.

Les évaluateurs-architectes ne détectent pas une différence positive de performance entre la RV et le traditionnel. Les écarts entre les outils et les équipes ne sont pas très significatifs. Le projet 1 (l'escalier), les évaluateurs-architectes affichent un léger avantage pour le traditionnel sur le virtuel : 61,76% à 59,67%, pour une différence de 2,09%. Dans le cas du projet 2 (le banc), l'avantage est pour la RV : 63,40% à 62,20%, une marge de 1,2%. Le total de l'ensemble est de 61,98% pour le traditionnel par rapport à 61,54% de la RV. Il faut souligner que la différence de 0,44% n'est pas révélatrice (Figures 9-11).

Les designers industriels ont évalué l'escalier conçu traditionnellement comme étant supérieur (60,34%) aux résultats avec la RV pour le même projet (57,77%), pour une marge de 2,57%. Par contre, les résultats ont été divergents pour le banc, en préférant la RV avec une marge de 5,44% (58,49% contre 53,05%). Le total des évaluateurs en design industriel donne un léger avantage à la RV sur le traditionnel (1,44%), 58,13% contre 56,69%. Sans oublier que les inégalités entre les équipes et les outils sont d'une importance majeure pour les designers industriels. Voir les figures 10 et 11.

Le résultat global des évaluateurs pour le projet 1 (escalier) donne un avantage au traditionnel sur la RV de 2,33% (61,05% sur 58,72%). Cependant, dans le cas du projet 2 (le banc), les résultats sont

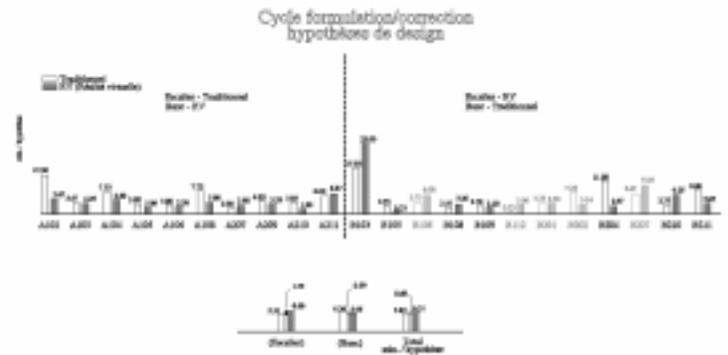


Figure 14. Details of the Design Hypothesis Formulation/Correction Cycle Test showing results by individual teams. [Détail de l'évaluation du test du cycle de formulation/correction des hypothèses de design montrant les résultats par équipes.]

à l'inverse, les étudiants utilisant la RV ont mieux performé qu'avec traditionnel de 3,32% (60,95% contre 57,63%).

Étant donné que la différence entre les résultats, selon les projets, est plus ou moins équivalente, mais inversé tel qu'il est démontré dans la Figure 11, les résultats combinés des deux jurées et des deux projets amènent un résultat presque neutre : RV = 59,84% et le traditionnel = 59,34%. L'écart de 0,50% en faveur de la RV n'est pas manifeste, mais le sujet des projets semble donner un impact additionnel des sur les résultats.

#### *le test passif*

Ici, nous exposons les résultats des équipes, en conservant à part les résultats des étudiants provenant des autres disciplines que le design industriel. Toutefois, leurs résultats apparaissent en gris. Nous pouvons constater dans la Figure 12, une différence marquante au niveau de la compréhension et de la communication de l'information due à l'usage de la RV. Toujours à l'aide du même questionnaire, les résultats tendent à démontrer que les étudiants ont mieux réussi avec la RV qu'avec le traditionnel (79,06% sur 48,44%) pour une différence de 30,62%. Des résultats très déterminants en comparaison à ceux du test actif (Figure 13).

#### *formulation hypothèses de design*

Les résultats se présentent de cette façon : la vitesse du cycle a été considérée selon le temps

are therefore no longer inexperienced on it), we would run this second test on a new Road Circuit Y. If the results are very close (as in the case of our Active Test), we will not be sure of the specific effects played by differences in the automobiles and in the difficulty of the circuit.

To get around this problem, we could have used the same subject for both projects and taken into account that the results of the second project would undoubtedly be improved over the first since the students would have acquired experience with the subject matter. The impact of the tool on the design result would have been more clearly observable.

There is a striking difference between the margins produced by the Active Test and those of the Passive Test. There is a corresponding difference in the level of 3D complexity between the projects of the Active Test and the stadium used in the Passive Test. Perhaps an Active Test assigning projects that require the processing of more complex geometrical data might reveal more marked differences in the performance of the two types of graphic media. More complex projects would however require more time to execute. Still another strategy would be to use a much larger population in order to reduce the minimum margin that could be considered significant. This, however, raises economic and technical problems which we are not in a position to solve.

VR is not a cure-all for design. It is another accessible medium (non-immersive VR) which can play a complementary role in the design process by helping to overcome some of the limitations of traditional media. At the end of the twentieth century, how long are we to wait, as compared to other professions, before renovating and renewing the tools of design?

#### references

- Campbell, Dace, 1996. *Design in Virtual Environments Using Architectural Metaphor. A HIT Lab Gallery*. Master Thesis, University of Washington
- Henry, Daniel, 1992. *Spatial Perception in Virtual Environments: Evaluating an Architectural Application*. Master Thesis, University of Washington
- Lebahar, J. C., 1983. *Le dessin d'architecte, Simulation graphique et réduction d'incertitude*. Éditions Parenthèses, Roquevaire, pp. 18-21
- Marshall, Tony B., 1992. "The Computer as a Graphic Medium in Conceptual Design" in K. Kensek and D. Noble (eds) *Computer supported design in architecture, Mission, Method, Madness*, ACADIA'92, pp. 39-47
- Mine, Mark, 1996. *Working in a Virtual World: Interaction Techniques Used in the Chapel Hill Immersive Modeling Program*. Research report TR96-029, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill.
- Moore, C. and Allen, G., 1981. *L'architecture sensible, espace, échelle et forme*. Dunod, Paris.
- Norman, D. A., 1981. "Categorization of actions slip," *Psychological Review*, volume 88, No. 1, pp. 1-15
- Robertson, George G., Card, Stuart K., Mackinlay, Jock D. (Xerox PARC), 1993. "Nonimmersive virtual reality, Hot Topics," *Computer* 2-93, pp. 79-83.
- Satalich, Glenna, 1995. *Navigation and Wayfinding in Virtual Reality: Finding the Proper Tools and Cues to Enhance Navigational Awareness*, Master Thesis, University of Washington.
- Sperandio, J. C., 1980. "L'analyse de la charge de travail mental," in *La psychologie en ergonomie*. P.U.F., Paris, pp. 195-219.
- Sperandio, J. C., (1984). "La représentation mentale," in *L'ergonomie du travail mental*. Masson, Paris, pp. 77-90.
- Velez, Gonzalo, 1993. "Realidad Virtual: Aplicaciones en arquitectura," in L.T.A.D. (ed) *Terceras jornadas de computacion como ayuda en la educacion y en la investigacion*, Universidad Central de Venezuela, Caracas, p. 3.
- Wickens, Christopher, Salvendy, G. (ed), *Handbook of Human Factors*. New York NY: Wiley, pp. 72-107.

de vie de chaque hypothèse (nombre de minutes par hypothèse). Pour l'escalier, la vitesse est plus lente avec la RV (6,66 min./hyp.) qu'avec le traditionnel (5,31 min./hyp.). Ces résultats gardent un lien avec ceux du test actif où le traditionnel est supérieur à la RV.

Pour le banc, la rapidité avec la RV est supérieure (5,95 min./hyp.) au traditionnel (6,34 min./hyp.). Encore une fois, les résultats corrélient ceux obtenus lors du test actif.

Comme résultats totaux pour le cycle, il existe une légère, mais insignifiante marge favorable aux outils traditionnels sur la RV (5,89 min./hyp. sur 6,31 min./hyp) (Figure 14).

### conclusions

Nous pouvons ainsi conclure que la RV a une influence significative sur les tâches de communication de l'information 3D dans le processus de design. Ceci s'explique par l'impact de la RV sur les aspects cognitifs de la conception, soit : la perception visuelle, l'image mentale, la charge mentale de travail et le traitement des erreurs.

Malgré que les totaux des résultats pour le test actif n'ont pas été révélateurs, les deux projets considérés séparément, en fait, produisent de résultats distincts. Même si les marges sont infimes, la corrélation directe entre ces résultats et ceux du cycle de formulation/correction des hypothèses de design, nous laissent croire qu'ils sont évocateurs. De plus, nous pensons que ces résultats peuvent être causés par de légères variations sur le degré de complexité des deux projets. Néanmoins, nous nous interrogeons sur la façon d'éliminer les variations possibles de la complexité entre les projets impliqués lors d'un test futur. Une analogie, pour illustrer cette difficulté, serait de tester la performance de deux pilotes sans beaucoup d'expérience en utilisant deux autos différentes. (Autos 1 et 2). Nous choisissons deux participants novices, (Pilotes A et B) avec une expérience et un entraînement similaire. Un premier test serait de parcourir une route X avec le pilote A sur l'auto 1 et le pilote B sur l'auto 2. Pour éliminer les effets d'une possible variation de la performance entre les pilotes (puisque notre but est d'évaluer la performance des autos et non celle de pilotes), nous faisons un autre test, cette fois en interchangeant

les pilotes d'auto. Puisque les deux pilotes connaissent déjà la route X (ils ont acquis de l'expérience pour conduire sur cette route), nous faisons un deuxième test sur une route Y. Si les résultats sont très proches (comme dans le cas de notre test actif), nous ne pourrions pas déterminer la provenance des effets apportés; sont-ils dus à la différence des autos ou à la difficulté des routes?

Une solution possible, pour contourner cet obstacle, serait d'utiliser le même sujet deux fois en tenant compte lors de l'analyse des résultats que la seconde compilation devrait, sans doute, être meilleure puisque l'échantillonnage peut avoir acquis de l'expérience. De cette façon, l'impact de l'outil sur la tâche aurait été mieux cerné.

Une différence significative est remarquée entre les résultats produits par le test actif par rapport à ceux du test passif. Il y a aussi une différence équivalente dans le niveau de complexité 3D entre les projets du test actif et le stade utilisé pour le test passif. Peut-être qu'un test actif avec des projets qui exigent plus de traitement de données géométriques complexes révélerait plus de différences dans la performance des deux médias graphiques. Par contre, cette augmentation dans la complexité des projets aurait exigé plus de temps pour leur exécution. Enfin, une dernière façon aurait été d'exécuter la même expérience avec une population plus nombreuse de façon à réduire la marge minimum considérée comme significative. Pour des raisons techniques et économiques il n'a pas été possible de réaliser une telle expérience.

La RV n'est pas la panacée pour le design. Elle est un autre média graphique de travail accessible (non-immersion) aux concepteurs. Elle devrait être incorporée dans le processus de design comme un complément aux autres médias pour intercepter leurs défaillances. À la fin du XXème siècle, combien de temps faudra-t-il, par rapport aux autres disciplines, pour renouveler et améliorer nos outils de travail pour le design?