

Etude empirique de la Continuité dans la Réalité Augmentée

Emmanuel Dubois^{1,2}, Laurence Nigay¹, Dominique Ribeiro³, Jocelyne Troccaz²

¹ CLIPS, Equipe IHM
385 rue de la Bibliothèque, BP 53
F-38041 Grenoble Cedex9

² TIMC, Equipe GMCAO
IAB, Faculté de Médecine
F - 38706 La Tronche Cedex

³ LPE
1251, avenue Centrale, BP 47
F - 38040 Grenoble Cedex9

{Emmanuel.Dubois; Laurence.Nigay; Jocelyne.Troccaz}@imag.fr

RESUME

Cet article présente deux propriétés caractérisant l'utilisabilité d'un système de Réalité Augmentée (RA) : la compatibilité et la continuité. Ces propriétés caractérisent la fusion des entités réelles et virtuelles et reposent sur deux propriétés plus générales aux Interfaces Homme-Machine (IHM), l'honnêteté et l'observabilité. Nous illustrons la compatibilité et la continuité dans le

cas de CASPER, notre système de RA de chirurgie cardiaque. Enfin pour souligner l'impact de la continuité sur la réalisation de la tâche, nous relatons les résultats d'une étude expérimentale avec CASPER.

MOTS CLES : Réalité Augmentée, Propriété, Test expérimental.

NOM ET VERSION DU LOGICIEL UTILISE POUR ECRIRE LA SOUMISSION :

ex : Word 2.0c Microsoft pour Windows

Microsoft Word 97 pour PC

FORME DE PARTICIPATION :

x	Cocher la forme de participation
	Papier long
X	Poster/papier court
	Rencontres doctorales
	Ateliers
	Cours
	Tables rondes/réunions débat
	Expérience interactive
	Vidéos
	Panorama des laboratoires et organismes
	Journée « Entreprises »

THEMES DE LA SOUMISSION :

x	Cocher les thèmes choisis (vous pouvez en cocher plusieurs)
	- Fondements théoriques des IHM
	- Modèles de l'utilisateur, modèles cognitifs
	- Analyses et modèles de tâches
	- Formalismes et IHM
	- Modèles de développement des systèmes interactifs
	- Modèles distribués de coopération homme-machine
	- Modélisation des organisations humaines
	- Dispositifs, techniques d'interaction
	- Morphologie de l'interaction
X	- Nouvelles techniques d'interaction et de présentation
	- Nouvelles interfaces pour la supervision
	- Interfaces haptiques, interaction au stylo
	- Interaction multimodale, gestuelle ou en 3 dimensions
	- Intégration de la vision dans l'interface
	- Interaction vocale
	- Interfaces écologiques
	- Coopération entre modalités/média

	- Analyse, conception et évaluation
	- Architecture des systèmes interactifs
	- Processus de conception et ergonomie
	- Méthodes de conception et d'évaluation
X	- Evaluation ergonomique et validation
	- Méthodes formelles dans la conception ou l'évaluation
	- Assistance à l'utilisateur
	- Ergonomie du web
	- Systèmes, outils
	- Outils de prototypage
	- Outils de construction
	- Environnements de développement
	- Programmation visuelle
	- Programmation par démonstration
	- Communication médiatisée par l'ordinateur
	- Interaction asynchrone : téléenseignement, télémédecine, etc.
	- Interaction synchrone
	- Conception coopérative
	- Édition coopérative
	- Interaction et coopération
	- Visualisation et représentation de l'information
	- Visualisation de grands corpus de données
	- Recherche dans des documents complexes
	- Aide interactive
	- Stratégies multi-écrans
	- Interaction dans les mondes 3D
	- Interaction et informatique graphique
	- "Visualisation" pour les handicapés
	- Nouveaux champs d'application
	- Réalité virtuelle
X	- Réalité augmentée
	- Collecticiels
	- Interfaces intelligentes
	- Interfaces pour les systèmes critiques
	- Informatique mobile et informatique disséminée
	- Multimédia, hypermédia, et interaction sur le WEB
	- IHM et publics adaptés
	- Interaction pour les personnes âgées et handicapées
	- Interfaces adaptées aux besoins du grand public
	- IHM et Société
	- Applications et expériences
	- Commerce électronique
	- Jeux et loisirs
X	- Santé
	- Banque
	- Transport
	- Bâtiment
	- Enseignement de l'IHM
	- Autre :

Etude empirique de la Continuité dans la Réalité Augmentée

Emmanuel Dubois^{1,2}, Laurence Nigay¹, Dominique Ribeiro³, Jocelyne Troccaz²

¹ CLIPS, Equipe IHM
385 rue de la Bibliothèque,
BP 53
F-38041 Grenoble Cedex9

² TIMC, Equipe GMCAO
Institut A. Bonniot,
Faculté de Médecine
F - 38706 La Tronche Cedex

³ Laboratoire de Psychologie
Expérimentale
1251, avenue Centrale, BP 47
F - 38040 Grenoble Cedex9

{Emmanuel.Dubois; Laurence.Nigay; Jocelyne.Troccaz}@imag.fr

RESUME

Cet article présente deux propriétés caractérisant l'utilisabilité d'un système de Réalité Augmentée (RA) : la compatibilité et la continuité. Ces propriétés caractérisent la fusion des entités réelles et virtuelles et reposent sur deux propriétés plus générales aux Interfaces Homme-Machine (IHM) : l'honnêteté et l'observabilité. Nous illustrons la compatibilité et la continuité dans le cas de CASPER, notre système de RA de chirurgie cardiaque. Enfin, pour souligner l'impact de la continuité sur la réalisation de la tâche, nous relatons les résultats d'une étude expérimentale menée sur CASPER.

MOTS CLES : Réalité Augmentée, Propriété, Test expérimental.

INTRODUCTION

Une tendance actuelle des systèmes interactifs vise à intégrer des entités réelles et virtuelles. Les dispositifs et les formes d'interaction se multiplient donnant lieu à des situations d'interaction très différentes des Interfaces Homme-Machine (IHM) classiques. Dans ce contexte aux possibilités variées, nous nous intéressons à la RA comme définie à la Figure 1 : une interaction avec des entités réelles, enrichie par des entités virtuelles.

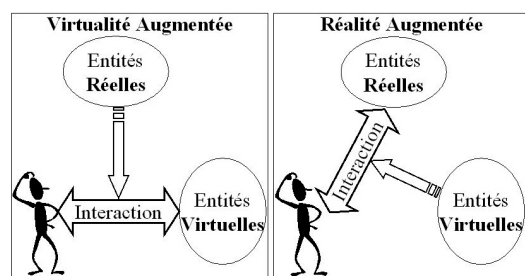


Figure 1 : Deux formes de fusion des entités réelles et virtuelles : Virtualité Augmentée (VA) et Réalité Augmentée (RA).

La particularité d'un système de RA réside dans la dualité de l'interaction de l'utilisateur avec le système. En effet, elle se compose de deux facettes : l'une avec des entités virtuelles, l'autre avec des entités réelles, comme les outils réels manipulés. L'utilisabilité d'un système de RA doit donc se décliner selon les propriétés établies pour un système interactif [8] ; mais elle doit aussi considérer l'existence des deux facettes de l'interaction, afin d'en garantir une intégration harmonieuse.

A ces fins, l'approche adoptée pour étudier l'utilisabilité d'un système de RA s'appuie sur les propriétés ergonomiques des IHM. En particulier, un point important de la conception d'une IHM consiste à rendre perceptible des données pertinentes à la réalisation de la tâche de l'utilisateur, et ce de manière correcte et facilement interprétable. Deux propriétés ergonomiques caractérisent les sorties d'un système interactif : l'observabilité, qui caractérise la capacité du système à permettre à l'utilisateur de percevoir l'état interne du système et, l'honnêteté, qui caractérise la capacité du système à présenter l'état interne de manière à favoriser une interprétation correcte de la part de l'utilisateur [1,5,8]. Ces deux propriétés s'appliquent à la présentation d'un concept manipulé par le système, à un instant donné au cours de l'interaction.

Compte tenu de la dualité de l'interaction dans les systèmes de RA, les utilisateurs se trouvent fréquemment exposés à plusieurs sources de données : un objet réel et sa représentation informatique (virtuelle), multiples représentations informatiques d'un même concept, représentation simultanée de plusieurs concepts, etc. Par exemple, la cohérence requise entre plusieurs représentations informatiques d'un même concept peut être étudiée avec la théorie de psychologie ICS, Interacting Cognitive Subsystems [2], et montrée avec l'effet McGurk[9]. L'expérimentation liée à l'effet McGurk consiste à faire jouer une vidéo montrant un orateur qui prononce la syllabe "ga". Mais la bande sonore a été réenregistrée avec la syllabe "ba". Lors de l'expérimentation, 98% des sujets rapportent entendre la syllabe "da". Cet exemple montre la nécessité de cohérence entre les deux représentations informatiques d'une même entité. Dans le cadre de systèmes de RA nous étendons les deux propriétés, observabilité et honnêteté, au cas de la cohérence de la perception des entités réelles et virtuelles.

Dans ce papier, nous proposons deux propriétés, la compatibilité et la continuité. Elles caractérisent la cohérence de plusieurs sources d'informations et, en particulier, le cas où des informations du monde réel doivent être perçues simultanément à des représentations informatiques (entités virtuelles). Nous définissons ces deux nouvelles propriétés, puis nous présentons les résultats d'une étude utilisateur menée afin d'étudier l'impact de ces propriétés sur la réalisation de la tâche.

COMPATIBILITE ET CONTINUITE : DEFINITION

Définissons d'abord la compatibilité, à deux niveaux :

- la **compatibilité perceptuelle**, extension de la propriété d'observabilité au cas de N concepts, traduit la possibilité pour l'utilisateur de percevoir les données relatives à N concepts en prenant en compte leur dispersion géographique dans l'environnement et les sens perceptifs mis en jeu. La compatibilité perceptuelle implique donc l'observabilité de chacun des concepts considérés isolément.
- la **compatibilité cognitive**, extension de la propriété d'honnêteté au cas de N concepts, traduit la capacité de l'utilisateur à interpréter correctement les données relatives à N concepts en considérant les différents modes de représentation mis en œuvre par le système pour représenter ces concepts. La compatibilité cognitive implique l'honnêteté des représentations de chacun des concepts considérés isolément.

Cas particulier de la perception et interprétation de plusieurs concepts, l'utilisateur est amené à percevoir plusieurs représentations relatives à un même concept. Nous avons dénoté ce cas particulier de la compatibilité par le terme continuité. Comme précédemment, cette propriété s'applique aux niveaux perceptuel et cognitif :

- la **continuité perceptuelle**, adaptation de la compatibilité perceptuelle, traduit la possibilité pour l'utilisateur de percevoir les données relatives à UN concept en prenant en compte leur dispersion géographique dans l'environnement de l'utilisateur et les sens perceptifs mis en jeu.
- la **continuité cognitive**, adaptation de la compatibilité cognitive, traduit la capacité de l'utilisateur à interpréter correctement les données relatives à UN concept en considérant les différents modes de représentation mis en œuvre par le système pour représenter ces données.

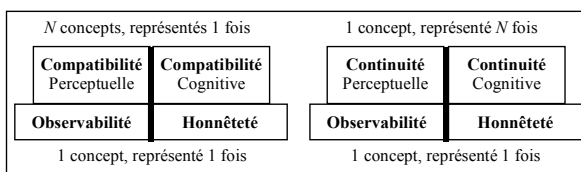


Figure 2 : Propriétés ergonomiques : observabilité, honnêteté, compatibilité et continuité.

Pour expliquer ces deux nouvelles propriétés, mises en regard de l'observabilité et de l'honnêteté à la figure 2, nous nous tournons vers la psychologie cognitive qui a pour objet d'étude la perception et l'interprétation. Nous nous appuyons en particulier sur la théorie de psychologie cognitive ICS, Interacting Cognitive Subsystems [2]. La théorie ICS structure le système de traitement de l'information humaine en un ensemble de neuf sous-systèmes; ICS modélise l'activité mentale de l'utilisateur en termes

de flux de données entre des sous-systèmes dédiés à la perception (sous-systèmes perceptifs), la cognition, c'est-à-dire le processus d'interprétation (sous-systèmes centraux) et l'action (sous-systèmes effecteurs).

Au niveau de la perception, et donc en relation avec le niveau perceptuel de la compatibilité et de la continuité, la théorie ICS explique que les sous-systèmes perceptifs peuvent acquérir de l'information en parallèle. De plus les limitations intrinsèques de nos sens ou certaines de leurs particularités permettent une perception globale d'informations discrètes : l'utilisateur peut par exemple percevoir plusieurs concepts affichés à l'écran. Ainsi sur un même canal sensoriel, plusieurs concepts peuvent être perçus en parallèle. Au niveau de l'interprétation, la théorie ICS permet de déterminer les conditions que les différentes sources d'information doivent respecter afin d'être interprétées comme un tout cohérent. En particulier, ICS prédit que la combinaison d'informations dans les sous-systèmes centraux ne peut avoir lieu que si les flots d'informations aux entrées de ces sous-systèmes sont simultanés. Cette simultanéité de traitement garantit donc la cohérence de l'interprétation d'informations fournies en parallèle. Toutefois, il est impossible d'établir le temps de traitement de chaque information. Il ressort de ces prédictions qu'au niveau cognitif, nous ne pouvons pas a priori affirmer que la compatibilité ou la continuité est vérifiée ou non ; nous ne pouvons que fournir des facteurs en faveur ou à l'encontre de ces propriétés.

Un problème au niveau perceptuel peut donc se manifester si un ou plusieurs sens perceptifs sont mis en jeu simultanément. Outre le sens perceptif, il convient d'étudier les lieux géographiques où l'utilisateur doit porter son attention pour percevoir les données. Plusieurs lieux de perception causent également une discontinuité perceptuelle. Nous appelons environnement perceptif la combinaison du sens mis en jeu avec le lieu (s,l) [7]. En conclusion c'est en analysant les environnements perceptifs requis, que la compatibilité et la continuité au niveau perceptif peuvent être étudiées.

Comme facteurs pouvant influencer la compatibilité et la continuité au niveau cognitif, nous avons identifié plusieurs caractéristiques du langage utilisé pour représenter les données perçues par l'utilisateur. La **dimension** (1D, 2D ou 3D), les caractères **arbitraire** et **analogique** [3] de la représentation, ainsi que le **référentiel de présentation**, ou point de vue, adopté pour fournir les informations à l'utilisateur, caractérisent différents aspects du langage utilisé [7]. Des différences entre les caractéristiques des langages combinés induisent des processus d'interprétation variés, ce qui peut constituer, en nous référant à ICS, une source d'incompatibilité ou de discontinuité cognitive. En conclusion, c'est en analysant les langages requis, que la compatibilité et la continuité au niveau cognitif peuvent être étudiées.

Dans le paragraphe suivant, nous illustrons ces propriétés sur une application concrète. Puis nous montrons, en présentant une expérimentation menée sur 12 utilisateurs, que ces propriétés ont un impact sur la qualité de réalisation de la tâche.

CASPER : ILLUSTRATION DES PROPRIETES

Le but de cette expérimentation est de tester l'impact de la propriété de continuité sur la réalisation d'une tâche par un utilisateur. Cette expérimentation s'inscrit dans la conception d'une application chirurgicale, CASPER [4], dont le but est d'aider le chirurgien à mener l'extrémité d'une aiguille de ponction à proximité du cœur, pour retirer un liquide pathologique. La proximité d'organes et de structures anatomiques nécessite d'établir juste avant l'intervention une trajectoire optimale. Au cours de l'intervention, le système affiche sur un écran des données de guidage : une représentation de la trajectoire à reproduire, superposée à une représentation de la position courante de l'aiguille. Compte tenu des contraintes spatiales d'un bloc opératoire, l'écran sur lequel sont affichées les données de guidage est situé au niveau de la tête du patient. Pour les percevoir, le chirurgien est obligé de quitter des yeux le champ opératoire (l'aiguille et le patient).

Il ressort de cette situation d'interaction une discontinuité perceptuelle relative à l'aiguille : le chirurgien perçoit l'aiguille réelle au niveau du patient, ainsi qu'une représentation de cette aiguille sur l'écran. Deux lieux de perception mutuellement exclusifs sont donc mis en jeu.

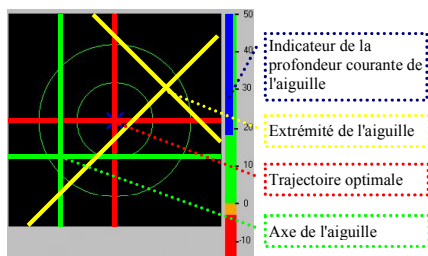


Figure 3 : Données de guidage présentées par CASPER : le viseur (à gauche), la jauge de profondeur (à droite).

D'autre part, les informations de guidage sont présentées sous la forme d'un viseur composé, comme l'illustre la Figure 3, d'une jauge représentant la profondeur de pénétration de l'aiguille, et de trois croix : l'une représente la trajectoire à suivre, une autre la position de l'extrémité de l'aiguille dans un plan perpendiculaire à la trajectoire et une troisième symbolise la position d'un point de l'axe de l'aiguille dans ce même plan. La représentation de la trajectoire demeure fixe, tandis que les deux autres croix suivent les déplacements de l'aiguille réelle et représentent la distance courante entre l'aiguille et la trajectoire idéale. Les données de guidage relatives à l'aiguille sont donc exprimées dans un langage 2D, arbitraire et présentées selon un référentiel lié à la trajectoire. Par contre, nous considérons que la perception directe de l'aiguille réelle par le chirurgien, repose sur un langage 3D, non arbitraire et dans un

référentiel de présentation lié à l'utilisateur. Les caractéristiques des deux langages sont différentes et peuvent donc être à l'origine de discontinuité cognitive.

Résoudre la discontinuité perceptuelle nécessite l'utilisation d'un seul environnement perceptif. A ces fins, nous avons implémenté un casque semi-transparent dans CASPER. Les données de guidage sont alors affichées dans le casque, au travers duquel le chirurgien perçoit le champ opératoire, c'est-à-dire l'aiguille et son patient. D'autre part, nous avons implémenté une autre représentation des informations de guidage, trajectoire et aiguille. Ainsi, les langages correspondant à cette représentation et à la perception directe de l'aiguille réelle sont similaires, ce qui réduit le nombre de facteurs de discontinuité cognitive. Cette représentation consiste en un cône 3D, centré sur la trajectoire à reproduire et dont l'extrémité est positionnée sur la cible à atteindre. La longueur du cône reproduit l'information exprimée par la jauge de la première version, tandis que la largeur du cône traduit la zone dans laquelle peut se trouver l'aiguille sans danger pour le patient. Enfin, une représentation 3D de l'aiguille complète le cône pour permettre au chirurgien de comparer la position courante de l'aiguille par rapport à la trajectoire.

TESTS EXPERIMENTAUX

Disposant ainsi de deux versions de CASPER, l'une présentant des discontinuités perceptuelle et cognitive, l'autre édulcorant la discontinuité perceptuelle et réduisant les facteurs de discontinuité cognitive, nous avons comparé expérimentalement la qualité de réalisation de la tâche avec ces deux versions de CASPER. Les 12 utilisateurs de notre expérimentation n'étaient pas des chirurgiens. La tâche qui leur était confiée, consiste à reproduire avec une pseudo-aiguille une trajectoire d'environ 50 cm de long (contre 5 cm environ pour l'application clinique). Souhaitant tester l'impact de la continuité sur la qualité de réalisation de la tâche, chaque utilisateur a réalisé la tâche dans 4 situations différentes, chaque situation étant une combinaison de deux facteurs : support d'affichage (écran ou casque) et représentation (viseur ou cône). Enfin, par analogie à la tâche clinique, dans laquelle le chirurgien doit régulièrement regarder le champ opératoire, un signal sonore est généré à intervalles de temps aléatoires, compris entre 7 et 15 secondes. A chaque signal sonore, l'utilisateur doit regarder l'aiguille et confirmer oralement l'avoir vue. Pour chaque scénario et utilisateur, les coordonnées (x,y,z) de la position de l'extrémité de l'aiguille sont enregistrées à chaque déplacement. Ces coordonnées sont exprimées dans un repère orthogonal dont l'axe Z est confondu avec la trajectoire à reproduire et orienté en direction de la cible. Ces coordonnées constituent les trois composantes du signal analysé selon la démarche décrite dans le paragraphe suivant.

Démarche d'Analyse

Pour l'analyse des données, les composantes du signal sont converties en spectres de puissance, par une trans-

formée de Fourier des composantes x , y et z du signal global. La variable étudiée est la somme des intégrales de chaque spectre de puissance. Cette variable représente alors l'énergie dépensée par l'utilisateur pour accomplir sa tâche, c'est-à-dire la quantité de mouvements produite par l'utilisateur pour déplacer la pseudo-aiguille en suivant la trajectoire. Nous avons choisi d'adopter un modèle multiplicatif pour rendre compte des effets des mouvements [6], puis de transformer les données en base de \log_{10} [10] afin d'obtenir un modèle additif. Ceci nous permet de mener une étude statistique inférentielle, basée sur l'analyse de la variance (ANOVA). Cette méthode vise à établir l'existence d'effets sur la réalisation de la tâche, lié à un facteur ou une combinaison de facteurs : le support d'affichage et/ou la représentation. Pour notre analyse, nous considérons qu'un effet est significatif si $p \leq 0.05$, où p est la statistique du test d'analyse des variances. Une tendance à un effet significatif est mise en évidence si $0.05 < p \leq 0.1$. Enfin, pour un facteur ayant un effet significatif, le rapport de Fischer, noté F , qui est égal au rapport des variances des moyennes sur la variance des erreurs, est utilisé pour établir dans quelle mesure l'une des modalités du facteur est préférable à l'autre modalité du même facteur.

Résultats

L'analyse statistique révèle un effet significatif du support avec un $p < 0.001$. La moyenne des énergies mesurées, c'est-à-dire de la quantité de mouvements produite, dans les situations utilisant l'écran comme support d'affichage est supérieure à celle obtenue dans les situations utilisant le casque. L'effet principal du support nous permet donc de conclure que l'utilisation du casque permet de limiter les mouvements effectués par l'utilisateur pour reproduire la trajectoire avec la pseudo-aiguille. Le rapport de Fischer s'élève à 20.19, ce qui affirme d'autant plus l'avantage du casque par rapport à l'écran. Ce résultat est donc en accord avec notre propriété de continuité perceptuelle : en ne nécessitant qu'un seul environnement perceptif grâce à l'utilisation du casque, la qualité de réalisation de la tâche est supérieure.

L'analyse statistique du facteur représentation montre un effet significatif de ce dernier avec $p < 0.001$. Les moyennes des énergies mesurées permettent d'établir que le cône, représentation non arbitraire et 3D, engendre une plus faible quantité de mouvements de la part des sujets que le viseur, représentation arbitraire et 2D. Le rapport de Fischer s'élève à 46.35 ce qui confirme d'autant plus l'impact positif du cône sur la qualité de réalisation de la tâche. Ceci illustre le fait que la diminution du nombre de facteurs de discontinuité cognitive influe favorablement sur la qualité de réalisation de la tâche.

Enfin aucun effet d'interaction entre ces deux facteurs n'a pu être identifié. Ceci tend donc à illustrer que la continuité cognitive et perceptuelle sont indépendante l'une de l'autre.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons défini deux nouvelles propriétés, la compatibilité et la continuité, pour caractériser la combinaison simultanée d'informations en provenance du monde réel et du monde informatique. La combinaison harmonieuse de ces deux mondes est la caractéristique principale d'un système de Réalité Augmentée. Nous avons montré l'impact de ces deux propriétés par expérimentation avec le système CASPER, notre système de chirurgie augmentée. Il nous revient maintenant d'étudier l'utilisabilité des entrées du système de RA (manipulations dans le monde réel et modalités d'interaction d'entrée au système informatique). Il conviendra ensuite d'étudier l'utilisabilité de l'interaction globale en considérant les relations entre les entrées et les sorties, puisque c'est de leur couplage qu'émerge l'essence même de l'interaction.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abowd, D., Coutaz, J., Nigay, L., "*Structuring the Space of Interactive Properties*", Acte de la conférence EHCI'92, (1992), p. 113-128.
2. Barnard, P., J., "*Cognitive Resources and the Learning of Computer Dialogs*", dans la revue *Interfacing Thought, Cognitive Aspects of Human Computer Interaction*, MIT Press, (1985), p. 112-158.
3. Bernsen, O., "*Foundations of multimodal representations. A taxonomy of representational modalities*", dans la revue *Interacting with Computers*, Vol. 6, 4, (1994), p.347-371.
4. Chavanon, O., Carrat, L., Pasqualini, C., Dubois, E., Blin, D., Troccaz, J., "*Computer Guided Pericardio-centesis: Experimental results and Clinical Perspectives*", publiée par Urban & Vogel dans la revue *Herz* 25, 8, (2000), p. 761-768.
5. Dix, A., Finlay, A., Abowd, G., Beale, R., "*Human-Computer Interaction*", Prentice Hall, (1998).
6. Droulez, J., Darlot, C., "*The geometric and dynamic implications of the coherence constraints in three-dimensional sensorimotor interactions*", dans *Attention and Performance XIII*, (1989), p. 495-526.
7. Dubois, E., Nigay, L., Troccaz, J., "Consistency in Augmented Reality Systems", A paraître dans les actes de la conférence EHCI'2001, (2001).
8. Gram, C., Cockton, G., et al., "*Design Principles for Interactive Software*", Chapman & Hall, (1996), 248 pages.
9. McGurk, H., MacDonald, J., "*Hearing lips and seeing voices*", dans la revue *Nature*, n°264, (1976), p. 746-748.
10. Winer, B., J., "*Statistical Principles in Experimental Design*", *Mc Graw-Hill Book Company*. Perdue University, (1962).