



HAL
open science

Étude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.

Amine Chellali

► **To cite this version:**

Amine Chellali. Étude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Nantes, 2009. Français. NNT: . tel-00467441v1

HAL Id: tel-00467441

<https://theses.hal.science/tel-00467441v1>

Submitted on 26 Mar 2010 (v1), last revised 25 May 2010 (v2)

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

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

UNIVERSITÉ DE NANTES
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES

**ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DE L'INFORMATION ET DE MATHÉMATIQUES**

Année 2009



ÉTUDE DES INTERACTIONS HOMME-HOMME POUR L'ÉLABORATION DU RÉFÉRENTIEL COMMUN DANS LES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS COLLABORATIFS

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Informatique et applications

Spécialité : Automatique et informatique appliquées

*Présentée
et soutenue publiquement par*

Mohamed-El-Amine CHELLALI

Le 9 décembre 2009, devant le jury ci-dessous

Président du jury :	Dominique SCAPIN	
Rapporteurs :	Françoise DÉTIENNE	Directrice de recherche, INRIA
	Dominique SCAPIN	Directeur de recherche, INRIA
Examineur :	Caroline CAO	Associate Professor, Tufts University, Boston
Membre invité :	Guillaume MOREAU	Maitre de conférences, École Centrale de Nantes
<i>Directeur de thèse :</i>	Maxime GAUTIER	Professeur, Université de Nantes
<i>Co-encadrants :</i>	Cédric DUMAS	Maitre de conférences, École des Mines de Nantes
	Isabelle MILLEVILLE	Chargée de recherche, CNRS

ED : STIM

UNIVERSITÉ DE NANTES
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES

**ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DE L'INFORMATION ET DE MATHÉMATIQUES**

Année 2009



ÉTUDE DES INTERACTIONS HOMME-HOMME POUR L'ÉLABORATION DU RÉFÉRENTIEL COMMUN DANS LES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS COLLABORATIFS

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Informatique et applications

Spécialité : Automatique et informatique appliquées

*Présentée
et soutenue publiquement par*

Mohamed-El-Amine CHELLALI

Le 9 décembre 2009, devant le jury ci-dessous

Président du jury :	Dominique SCAPIN	
Rapporteurs :	Françoise DÉTIENNE	Directrice de recherche, INRIA
	Dominique SCAPIN	Directeur de recherche, INRIA
Examineur :	Caroline CAO	Associate Professor, Tufts University, Boston
Membre invité :	Guillaume MOREAU	Maitre de conférences, École Centrale de Nantes
<i>Directeur de thèse :</i>	Maxime GAUTIER	Professeur, Université de Nantes
<i>Co-encadrants :</i>	Cédric DUMAS	Maitre de conférences, École des Mines de Nantes
	Isabelle MILLEVILLE	Chargée de recherche, CNRS

ED : STIM

«Certains rêvent du succès, pendant que d'autres se lèvent tôt pour le créer. »

(Auteur inconnu)

«Some people dream of success, while others wake up and work hard at it. »

(Author unknown)



Oasis de Timimoun, Algérie (Amine CHELLALI, 2010)

À la mémoire de mon cher père, Saïd CHELLALI...

Remerciements

A l'issue de ces trois années consacrées à ce travail de thèse, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à son déroulement dans les meilleures conditions.

Tout d'abord, je tiens à remercier Dominique Scapin et Françoise Détienne d'avoir accepté de lire ma thèse. Je remercie également Caroline Cao et Guillaume Moreau d'avoir accepté de faire partie de mon jury. J'en suis honoré.

Je tiens à remercier chaleureusement Cédric Dumas, sans qui cette thèse n'aurait jamais pu être réalisée. Je le remercie pour sa confiance, pour ses conseils et pour son soutien et ses encouragements. Je le remercie également d'avoir supporté mon entêtement et d'avoir su m'orienter pour faire les bons choix techniques pour la réalisation des deux expériences présentées dans ce travail de thèse. Enfin, je le remercie d'avoir relu la thèse à plusieurs reprises pour traquer les « fautes d'orthographe ».

Mes vifs remerciements vont également à Isabelle Milleville. D'abord pour avoir accepté de co-encadrer cette thèse et ensuite pour toute l'énergie qu'elle a pu dépenser pour m'aider à mener à bien ce travail. En dépit de nos divergences disciplinaires initiales, nous avons réussi à communiquer et à trouver un référentiel commun pour travailler en collaboration et faire aboutir ce travail de thèse. Je la remercie également d'avoir pris la peine de relire le manuscrit à plusieurs reprises.

Un grand merci également à Maxime Gautier, d'avoir dirigé cette thèse, pour son ouverture d'esprit et pour ses bons conseils prodigués. Je remercie également Christine Chevallereau et Jean-Michel Hoc de m'avoir accueilli au sein de leurs équipes de recherche respectives (Robotique et PsyCoTec), et Michel Malabare le directeur de l'IRCCyN.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon frère Ryad pour tout ce qu'il a fait à fin que ce travail de thèse soit possible, pour ses conseils très pertinents, pour son soutien et pour sa disponibilité.

Je tiens également à remercier Matthieu Schuler, le directeur adjoint de l'Ecole des Mines de Nantes pour son aide et pour ses efforts qui ont permis à ce travail d'être réalisé dans les meilleures conditions.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé à mettre en place les deux études expérimentales présentées dans ce travail de thèse, je pense particulièrement à Philippe Lemoine et son aide concernant les dispositifs haptiques, Geoffrey Subileau et ses conseils concernant l'utilisation de Virtools, Frédéric Jourdan et ses conseils mathématiques, Laurence Perron et les longues discussions autour de la collaboration et mes trois stagiaires Eric, Julien et Vincent. Je remercie également le personnel du service de Radiologie du CHU de Nantes et tout particulièrement le chef de service, le Pr. Dupas qui nous ont permis de travailler dans les meilleures conditions pour effectuer la phase d'analyse de l'activité en radiologie. Je tiens enfin à remercier tous les étudiants volontaires de l'université de Nantes, de l'Ecole centrale de Nantes, de la faculté de médecine de Nantes, de l'Ecole vétérinaire de Nantes et les doctorants de l'IRCCyN qui ont accepté de participer aux différentes études expérimentales.

Et puis, je n'aurais certainement pas apprécié autant la recherche ni mes travaux de thèse sans cet environnement de travail si propice. Merci donc à tous mes collègues de travail de l'EMN et de l'IRCCyN et plus particulièrement, mes collègues de bureau et mes compagnons de pauses café (*My friends of misery*).

Enfin, j'adresse mes remerciements affectueux à ma famille : d'abord à ma mère pour son amour son soutien et ses conseils, à ma chère femme, Soraya, pour sa patience et son soutien, à mon frère, Tarek, pour ses conseils et pour son aide et à mes trois sœurs qui ont toujours été derrière moi. J'adresse enfin mes remerciements à mes amis, qui par leur amitié, leur soutien, leurs conseils et leur aide ont contribué directement et indirectement à la réalisation de ce travail.

Étude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.

Les environnements virtuels collaboratifs sont des espaces 3D permettant à plusieurs utilisateurs de travailler ensemble pour réaliser une tâche commune. Pour concevoir de tels environnements, qui supportent les interactions homme-homme, il est important d'étudier comment les hommes développent un référentiel commun pour collaborer.

Notre travail a consisté à explorer la notion de référentiel commun sur laquelle s'appuie toute activité collaborative. Cette notion favorise la compréhension mutuelle des tâches communes entre partenaires à travers un échange permanent d'informations, explicites et implicites. L'objectif de ce travail a donc été de faciliter et d'enrichir l'activité d'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs en tirant parti des caractéristiques de ces derniers. En effet, la conception des éléments liés au référentiel commun (mode de communication, construction de l'environnement et interactions) est primordiale pour assurer le fonctionnement collaboratif de l'activité. Deux études expérimentales ont été réalisées autour de deux situations concrètes. La première étude montre que l'ajout d'indices visuels permet d'améliorer l'élaboration du référentiel commun dans le cadre d'une tâche de manipulation d'objets. La deuxième étude montre que la communication haptique permet d'améliorer la construction du référentiel commun autour d'une tâche d'apprentissage d'un geste technique.

Ces résultats contribuent à donner des recommandations pour la conception d'environnement virtuel qui supportent la collaboration. Ceci est une première étape dans la définition d'une méthodologie de conception pour ce type de systèmes.

Mots clés : Environnements virtuels, Collaboration homme-homme, Référentiel commun, Communication haptique, Interaction homme machine, TCAO synchrone, Réalité virtuelle.

A study on human-human interactions for common frame of reference development within Collaborative virtual environments.

Collaborative virtual environments are 3D spaces that allow multiple users to work together on a common task. To design such environments to support human-human interactions, it is important to study how people develop a common frame of reference during collaboration. The concept of common frame of reference is central to all collaborative activities. It allows partners to understand each other through a continuous exchange of information (explicit and implicit). The ultimate goal of this research is to facilitate and enrich the construction of common frame of reference to accommodate specific collaborative virtual environments characteristics. Indeed, the design elements related to the common frame of reference (i.e. communication modes, environment's construction and interactions) are essential for successful collaborative activity. Two experimental studies were conducted using different collaborative virtual environments conditions. The first study shows that adding fixed landmarks can improve the development of common frame of reference within an objects manipulation task. The second study shows that haptic communication can improve the construction of the common frame of reference in a technical gesture learning task.

These results are used to provide recommendations for collaborative virtual environments design. It represents a first step towards the development of a standardized collaborative virtual environments design methodology.

Key words: Virtual environments, Human-human collaboration, Common frame of reference, haptic communication, Human-computer interaction, CSCW, Virtual reality.

Table des matières

Index des figures	v
Index des tableaux	ix
Introduction	3
Contexte	3
Motivations et enjeux.....	3
Problématique	4
Démarche	5
Structure du mémoire.....	6
Chapitre 1 : Les Environnements Virtuels Collaboratifs.....	9
1 La réalité virtuelle	10
1.1 Bref Historique	10
1.2 Définition.....	10
1.3 Les Environnements virtuels	12
1.4 Les Technologies de la Réalité Virtuelle.....	14
1.5 Les acteurs de la Réalité Virtuelle.....	16
1.6 Synthèse.....	20
2 Travail collaboratif assisté par ordinateur : TCAO	21
2.1 Définition.....	21
2.2 Typologies des Collecticiels.....	22
2.3 Exemples d'applications des collecticiels synchrones	23
2.4 Synthèse.....	26
3 Environnements virtuels collaboratifs : EVC.....	27
3.1 Définition.....	27
3.2 Classification des EVC.....	27
3.3 Les choix pour la conception des EVC à distance.....	28
3.4 Exemples	31
3.5 Problèmes liés aux EVC.....	34
3.6 Synthèse.....	34
4 Conclusion.....	35
Chapitre 2 : Collaboration et référentiel commun.....	39
1 La collaboration.....	40
1.1 Collaboration ou coopération ?	40

1.2	Caractéristiques du travail collaboratif dans les EVC : les modes de collaboration	46
1.3	Synthèse.....	49
1.4	Définition proposée	49
2	Le référentiel commun	51
2.1	Représentations mentales	51
2.2	Définition du référentiel commun	51
2.3	Autres définitions	52
2.4	Synthèse.....	52
2.5	Processus d'élaboration du référentiel commun.....	53
2.6	Synthèse.....	54
3	Communication dans les EVC.....	56
3.1	Définition de la communication	56
3.2	Combinaison de la communication verbale et non-verbale.....	57
3.3	Les communications médiatisées	58
3.4	Communication médiatisée par ordinateur.....	59
3.5	Influence du médium sur la collaboration	59
3.6	Les problèmes de communication dans les EVC	60
3.7	Synthèse.....	61
4	La coprésence dans les environnements virtuels collaboratifs	62
4.1	La présence.....	62
4.2	Synthèse.....	63
4.3	Définition de la notion de présence sociale	63
4.4	La conscience mutuelle de la situation et la présence sociale	63
4.5	Synthèse.....	64
4.6	Le rôle de la présence sociale dans l'élaboration du RC.....	64
5	Notre démarche	65
6	Conclusion.....	66
Chapitre 3 : Communication spatiale dans un environnement virtuel collaboratif		69
1	Les systèmes de référence et les représentations spatiales	71
1.1	Définitions.....	71
1.2	Choix du système de référence à utiliser	73
1.3	Utilisation des Systèmes de Référence dans les Environnements Virtuels : Points de vue, navigation et manipulation	73
2	Systèmes de référence et Référentiel Commun : définition de la notion de référentiel spatial commun.....	75
2.1	Communication spatiale et systèmes de références.....	75

2.2	Indices complémentaires pour la communication spatiale	79
2.3	Synthèse.....	79
3	Les systèmes de référence dans les EVC : Localisation des objets dans l'espace.....	81
3.1	Problèmes	81
3.2	Quelles sont les possibilités (littérature et solution proposée).....	82
3.3	Alternative proposée : paradigme de la référence spatiale fixe.....	85
4	Etude expérimentale	87
4.1	Analyse d'une tâche simple : Résolution d'un problème spatial d'assemblage de polyminos	87
4.2	Objectifs et Hypothèses.....	91
4.3	Architecture logicielle	92
4.4	Méthode.....	93
4.5	Résultats	99
4.6	Discussion	107
4.7	Bilan	110
5	Conclusion.....	111
Chapitre 4 : Communication haptique dans un environnement virtuel collaboratif.....		115
1	Les gestes techniques	116
1.1	Définition :	116
1.2	Classification des gestes techniques.....	116
1.3	Les Gestes techniques fins.....	116
2	Le sens haptique	118
2.1	Définition.....	118
2.2	Les interfaces haptiques	118
2.3	Classification des interfaces haptiques.....	119
2.4	Caractéristiques des interfaces haptiques	119
2.5	Quelques exemples d'applications	120
2.6	Utilité des informations haptiques dans les EV.....	120
2.7	Le sens haptique et les gestes techniques fins	121
2.8	Synthèse.....	121
3	Communication autour des gestes techniques.....	122
3.1	La communication verbale	122
3.2	La communication visuelle.....	122
3.3	Communication haptique.....	123
3.4	Bilan	127
3.5	Solution proposée	127

4	Etude expérimentale	131
4.1	Analyse d'une tâche complexe : un geste d'insertion d'aiguille dans le corps	131
4.2	Objectifs et hypothèses.....	139
4.3	Architecture logicielle	141
4.4	Méthode.....	142
4.5	Résultats	151
4.6	Discussions.....	162
5	Conclusion.....	168
	Conclusion générale	171
	Bilan.....	171
	Contributions.....	171
	Recommandations.....	172
	Limites	173
	Perspectives de recherche	173
	Références bibliographiques	179
	Annexes.....	195
1	Expérience 1	195
1.1	Fiche d'instruction pour l'utilisation des manettes de jeu.....	195
1.2	Fiche de consignes pour la condition P-RSF.....	196
1.3	Fiche de consignes pour la condition A-RSF	197
2	Expérience 2	198
2.1	Grille d'observation de l'activité.....	198
2.2	Questionnaire utilisé pour interroger les radiologues.....	201
2.3	Chronologie des activités	203
2.4	Fiche d'instruction pour l'utilisation des commandes du shuttle pro.....	205
2.5	La fiche de consignes	206
2.6	Description des exercices	208
2.7	Analyses statistiques des résultats	212
2.8	Questionnaires sur la présence et la coprésence.....	239

Index des figures

Figure 1 : Les premiers systèmes de réalité virtuelle : à gauche, le <i>Sensorama</i> de Heiling (1956), à droite, l' <i>Ultimate Display</i> de Sutherland (1968)	10
Figure 2 : Continuum Réalité-Virtualité (Milgram, Takemura, Utsimi et Kishino, 1994)	13
Figure 3 : Casque de données et CAVE	15
Figure 4 : Gant de données et interface Haptique	15
Figure 5 : <i>MIST-VR</i> un simulateur d'apprentissage pour la chirurgie minimale invasive (<i>Mentice AB, Göteborg, Suède</i>) et l'application <i>SécuréVi</i> du LIIB.....	17
Figure 6 : A gauche, visualisation d'informations en neurochirurgie. A droite, visualisation de données sismiques	18
Figure 7 : A gauche, le système <i>R-Screen</i> (par <i>Clarté</i>) permettant la présentation virtuelle des voitures pour la vente chez les concessionnaires. A droite, étude sur l'impact de l'intégration du tramway dans un paysage urbain Nantais (Donikian, Moreau, & Thomas, 1999).....	19
Figure 8 : à gauche, le jeu vidéo « les <i>Sims 3</i> » (Electronic Arts), à Droite, la visite virtuelle de la ville de Nantes en 1757 (musée d'histoire de Nantes).	19
Figure 9: La Classification espace-temps (d'après Ellis et al., 1991).	22
Figure 10 : Système de visioconférence (Orange)	24
Figure 11 : A gauche, le système <i>Hydra</i> , à droite le médiaspace <i>MTV</i>	25
Figure 12 : Le système <i>Clearboard</i>	25
Figure 13 : La table interactive basée sur le système <i>SmartSkin</i> permettant des interactions multi-utilisateurs	28
Figure 14 : A gauche, l'utilisation de la plateforme <i>Spin 3D</i> . A droite, l'utilisation de la plateforme <i>DIVE</i>	32
Figure 15 : à gauche l'utilisation de la plateforme <i>DIVE</i> . A droite, le Système <i>PIT</i>	33
Figure 16 : le monde virtuel <i>Second Life</i> (<i>Linden Lab</i>).....	33
Figure 17 : Le modèle en trèfle des systèmes (d'après Salber, 1995).....	43
Figure 18 : La dynamique du travail coopérative selon (Bardram, 1998).....	46
Figure 19 : Elaboration du référentiel commun : dans une situation d'interaction individuelle (à gauche), la mise à jour de la représentation mentale se fait à partir de l'interaction avec l'environnement. Dans une situation de collaboration (à droite), chaque opérateur commence par construire sa propre représentation de la situation. Par la suite, les deux opérateurs confrontent leur représentations individuelles ce qui permet de construire un RC. Une fois ce RC construit, il permet de mettre à jour les représentations individuelles. La confrontation entre ces nouvelles représentations individuelles combinées à l'interaction avec la situation permettent d'alimenter le RC. Le processus se poursuit tout au long de l'activité collaborative, ce qui explique le caractère évolutif du RC.....	54
Figure 20 : les composants d'un système de communication (l'information est codée vers langage puis envoyée par l'émetteur à travers un canal ; le récepteur reçoit l'information puis la décode).....	56
Figure 21 : Utilisation des systèmes de référence pour localiser un livre ; dans un système exocentré, l'opérateur se base sur un objet latéralisé et fixe (l'écran) pour localiser le livre. Dans un système de référence égocentré l'opérateur se base sur sa propre position pour localiser le livre. Dans un système de référence exocentré relatif, l'opérateur se base sur la balle qui est un objet non latéralisé pour localiser le livre.	72
Figure 22 : description spatiale à travers un système de référence égocentrée	76
Figure 23 : description spatiale à travers un système de référence exocentré relatif	78

Figure 24 : description spatiale à travers un système de référence exocentré absolu.....	79
Figure 25 : Utilisation des systèmes des références dans un EVC. Notre hypothèse met en avant l'utilisation de la référence spatiale fixe pour un système exocentré.....	86
Figure 26 : Analyse de la tâche à partir d'une situation réelle.....	88
Figure 27 : Modèle hiérarchique des tâches.....	89
Figure 28 : Architecture logicielle.....	93
Figure 29 : Environnement 3D.....	94
Figure 30 : Dispositif expérimental.....	95
Figure 31 : Une référence spatiale fixe et latéralisée.....	95
Figure 32 : des utilisateurs en train de manipuler l'interface 3D.....	96
Figure 33 : les 5 modèles à reproduire.....	96
Figure 34 : Points de vue des opérateurs sur la scène virtuelle les deux flèches verte et rouge représentent les points de vue de départ. Au cours de la tâche, les deux opérateurs pouvaient tourner autour de la figure en construction (autour du cercle bleu). Ils n'avaient aucune information sur le point de vue de leur partenaire.....	97
Figure 35 : Temps total pour accomplir la tâche.....	99
Figure 36 : Nombre total d'erreurs.....	99
Figure 37 : Utilisation des systèmes de référence (Filles).....	101
Figure 38 : Utilisation des systèmes de référence (Garçons).....	102
Figure 39 : utilisations des pronoms (pour les garçons).....	102
Figure 40 : utilisations des pronoms (pour les filles).....	103
Figure 41 : Nature des verbalisations (pour les filles).....	106
Figure 42 : Nature des verbalisations (pour les garçons).....	106
Figure 43 : la communication haptique pour enseigner l'écriture manuelle, dan ce cas on parle d'un double contact.....	128
Figure 44 : Couplage des deux bras haptiques et principe du paradigme WYFIWIF.....	129
Figure 45 : A gauche, geste d'insertion de l'aiguille pour effectuer une biopsie pulmonaire. A droite, l'aiguille à biopsie et son coaxial (<i>Temno</i>).....	132
Figure 46 : Repérage de la cible et définition du pont d'incidence.....	133
Figure 47 : Observation de l'intervention à travers un montage vidéo synchronisé (à gauche, la salle de commandes ; à droite la salle de scanner).....	134
Figure 48 : effet de parallaxe, avec un même angle β plus l'aiguille est plantée profondément plus la distance D entre le point d'insertion et la verticale qui passe par la pointe de l'aiguille augmente. ...	135
Figure 49: Vecteurs tridimensionnels sur lesquels s'appuient la pression et les rotations du praticien pendant une biopsie.....	135
Figure 50 : Modélisation de la salle de scanner en 3D.....	137
Figure 51 : modélisation de l'intérieur du corps.....	138
Figure 52 : modélisation du contenu essentiel.....	138
Figure 53 : Architecture logicielle.....	142
Figure 54 : Vue principale de l'Environnement 3D.....	144
Figure 55 : Vue scanner (intérieur du corps virtuel).....	145
Figure 56 : participant/expert pour la condition de guidage visuel AV.....	146
Figure 57 : participant/expert pour la condition de guidage visuo-haptique GHV.....	146
Figure 58 : Session participant/expert pour la condition avec instructions verbales uniquement AT.....	146
Figure 59 : la session d'application.....	146
Figure 60 : Session participant/participant en coplanification et comanipulation.....	147
Figure 61 : deux utilisateurs en train d'interagir ensemble dans l'EV.....	148
Figure 62 : Fiche d'explication des commandes de la manette de jeu pour l'expérience 1.....	195

Figure 63 : Commandes du <i>Shuttle pro</i> pour l'expérience 2.....	205
Figure 64 : A gauche, exercice 1; A droite, exercice 2 (session d'apprentissage).....	208
Figure 65 : A gauche, exercice 3; A droite, exercice 4 (session d'apprentissage).....	209
Figure 66 : A gauche exercice 1; A droite, exercice 2 (session application).....	209
Figure 67 : Exercice 3 (session application).....	210
Figure 68 : A gauche, exercice 1; A droite, exercice 2 (session de coplanification).....	210
Figure 69 : A gauche, exercice 3; A droite, exercice 4 (session de coplanification).....	211
Figure 70 : exercice 1 (session de comanipulation).....	212
Figure 71 : Temps total pour accomplir la tâche.....	212
Figure 72 : Temps passé avant l'insertion de l'aiguille.....	213
Figure 73 : nombre des erreurs.....	213
Figure 74 : Temps de planification de l'opération.....	214
Figure 75 : Distance moyenne au centre de la cible à la fin de l'opération.....	214
Figure 76 : Amplitude de perçages des organes sensibles.....	215
Figure 77 : Nombre total de points repères.....	215
Figure 78 : Nombre total de points repères avant l'insertion de l'aiguille.....	216
Figure 79 : Nombre de points repères supplémentaires.....	216
Figure 80 : Nombre total de scanners effectués.....	217
Figure 81 : Durée totale pour l'exécution du geste.....	217
Figure 82 : Nombre de contacts avec les organes sensibles.....	218
Figure 83 : Nombre total de gestes d'insertion.....	218
Figure 84 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion.....	219
Figure 85 : Amplitude maximale des gestes d'insertion.....	219
Figure 86 : Temps total pour accomplir la tâche (session coplanification).....	220
Figure 87 : Temps passé avant l'insertion de l'aiguille (session coplanification).....	220
Figure 88 : Nombre d'erreurs.....	221
Figure 89 : Temps total pour la planification de l'opération (session coplanification).....	221
Figure 90 : Distance moyenne du centre de la cible à la fin de l'opération (session coplanification).....	222
Figure 91 : Amplitude de perçage des organes sensibles (session coplanification).....	222
Figure 92 : Nombre total de points repères (session coplanification).....	223
Figure 93 : Nombre de points repères avant l'insertion de l'aiguille (session coplanification).....	223
Figure 94 : Nombre de points repères supplémentaires (session coplanification).....	224
Figure 95 : Nombre total de scanner effectués (session coplanification).....	224
Figure 96 : Durée totale de l'exécution du geste (session coplanification).....	225
Figure 97 : Nombre de contacts avec les organes sensibles (session coplanification).....	225
Figure 98 : Nombre total de gestes d'insertions (session coplanification).....	226
Figure 99 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion (session coplanification).....	226
Figure 100 : Amplitude maximale des gestes d'insertion (session coplanification).....	227
Figure 101 : Temps total pour accomplir la tâche (session de comanipulation).....	227
Figure 102 : Temps passé avant la première insertion de l'aiguille (session de comanipulation).....	228
Figure 103 : nombre d'erreurs.....	228
Figure 104 : Durée totale de la planification de l'opération (session de comanipulation).....	229
Figure 105 : Distance moyenne du centre de la cible à la fin de l'opération (session de comanipulation).....	229
Figure 106 : Amplitude de perçages des organes sensibles (session de comanipulation).....	230
Figure 107 : Nombre total de points repères (session de comanipulation).....	230
Figure 108 : Nombre de points repères avant la première insertion de l'aiguille (session de comanipulation).....	231

Figure 109 : Nombre de points repères supplémentaires (session de comanipulation).....	231
Figure 110 : Nombre de scanners effectués (session de comanipulation).....	232
Figure 111 : Durée totale pour l'exécution du geste (session de comanipulation)	232
Figure 112 : Nombre de contacts avec les organes sensibles (session de comanipulation)	233
Figure 113 : Nombre total de gestes d'insertion (session de comanipulation)	233
Figure 114 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion de l'aiguille (session de comanipulation)...	234
Figure 115 : Amplitude maximale des gestes d'insertion de l'aiguille (session de comanipulation)...	234

Index des tableaux

Tableau 1: La matrice espace/temps étendue (d'après Grudin 1994)	23
Tableau 2 : récapitulatif des différentes approches pour définir la collaboration et la coopération.....	45
Tableau 3 : Caractéristiques du travail collaboratif.....	49
Tableau 4 : Eléments de la description spatiale.....	76
Tableau 5 : Groupes de participants	97
Tableau 6 : Les différentes catégories des verbalisations.....	105
Tableau 7 : Durées moyennes des différentes sessions expérimentales	149
Tableau 8 : Conditions expérimentales	149
Tableau 9 : comparaisons des performances globales des participants selon le type d'apprentissage	151
Tableau 10 : comparaisons des performances des participants pendant la phase de planification selon le type d'apprentissage.....	151
Tableau 11 : comparaisons des performances des participants pendant la phase d'exécution du geste selon le type d'apprentissage	152
Tableau 12 : comparaisons des performances globales des binômes selon le type d'apprentissage ...	153
Tableau 13 : comparaisons des performances des binômes pendant la planification selon le type d'apprentissage	154
Tableau 14 : comparaisons des performances des binômes pendant l'exécution du geste selon le type d'apprentissage	154
Tableau 15 : comparaisons des performances globales selon le type d'apprentissage (session de comanipulation).....	155
Tableau 16 : comparaisons des performances de planification selon le type d'apprentissage (session de comanipulation).....	156
Tableau 17 : comparaisons des performances des binômes pendant la phase d'exécution du geste selon le type d'apprentissage (session de comanipulation).....	156
Tableau 18 : utilisation des pronoms.....	157
Tableau 19 : Utilisation des connecteurs d'addition	157
Tableau 20 : utilisation des adjectifs d'objectifs.....	157
Tableau 21 : référence au lieu	157
Tableau 22 : références à l'intensité	158
Tableau 23 : références à la perception	158
Tableau 24 : références au jugement.....	158
Tableau 25 : références aux organes	158
Tableau 26 : références aux notions de dimensions	159
Tableau 27 : références aux directions droite/gauche	159
Tableau 28 : références à l'aiguille	159
Tableau 29 : références au toucher.....	159
Tableau 30 : réponses au questionnaire sur la présence	160
Tableau 31 : réponses au questionnaire sur la coprésence	161
Tableau 32 : comparaisons statistiques des utilisations des pronoms	235
Tableau 33 : comparaisons statistiques des utilisations des connecteurs d'addition	235
Tableau 34 : comparaisons statistiques des utilisations des adjectifs d'objectifs.....	235
Tableau 35 : comparaisons statistiques des références au lieu.....	235
Tableau 36 : comparaisons statistiques des références à l'intensité.....	236

Tableau 37 : comparaisons statistiques des références à la perception	236
Tableau 38 : comparaisons statistiques des références au jugement	236
Tableau 39 : comparaisons statistiques des références aux organes	236
Tableau 40 : comparaisons statistiques des références aux notions de dimensions	237
Tableau 41 : comparaisons statistiques des références aux directions droite/gauche	237
Tableau 42 : comparaisons statistiques des références à l'aiguille	237
Tableau 43 : comparaisons statistiques des références au toucher	237
Tableau 44 : comparaisons statistiques des réponses au questionnaire sur la présence	238
Tableau 45 : comparaisons statistiques des réponses au questionnaire sur la coprésence	238

Introduction

Introduction

Contexte

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des recherches en Interaction Homme Machine dans les environnements virtuels collaboratifs. Elle vise à améliorer la conception de ces environnements en proposant un certain nombre de recommandations basées sur des considérations théoriques, soutenues par des études expérimentales.

Ce travail a été réalisé à l'Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes dans un cadre pluridisciplinaire en intersection de trois domaines : l'informatique, la psychologie cognitive et la robotique.

La thèse a été financée en partie par Orange Labs dans le cadre du projet InterActeurs en collaboration avec l'École des Mines de Nantes. L'objectif de ce projet est d'étudier les interactions collaboratives dans les environnements virtuels. **Mon travail de thèse consiste également à rechercher de nouvelles formes d'interactions collaboratives dans les environnements virtuels.** Ainsi, partant de situations concrètes, l'idée est de déterminer le noyau sur lequel s'articulera la notion de collaboration. Cette étude permettra à terme de mettre en lumière les besoins fondamentaux auxquels il faudra répondre pour supporter l'utilisation des environnements virtuels collaboratifs.

Motivations et enjeux

Les progrès technologiques offrent actuellement de nouvelles possibilités pour le support du travail collaboratif, en particulier en matière de communication (Internet, téléphonie mobile, vidéoconférence...etc.). Ces nouveaux supports de communication permettent ainsi de faire évoluer les modes de travail traditionnels. De nouveaux systèmes de travail de groupe (collecticiels) comme *Microsoft Exchange*, *Google Docs* ou *Skype (eBay)* sont apparus. Ces systèmes facilitent les transferts d'informations à distance entre collaborateurs (courriel, partage d'emplois du temps des collaborateurs, salles de réunion...). Ils permettent ainsi de faire collaborer à distance soit simultanément (activité synchrone), soit à des moments différés (activité asynchrone). Cependant, l'apparition de ces nouvelles technologies a fait émerger de nouveaux besoins. Les outils numériques peuvent permettre, par exemple, aux cabinets d'architectes de travailler ensemble sur des projets plus vastes avec davantage de ressources et de partenaires. Cette évolution des technologies crée de nouvelles formes de travail collaboratif qui ont leurs spécificités. Deux architectes qui travaillent ensemble pour concevoir un nouveau projet partagent différentes informations à propos de leur projet commun. Mais à distance, l'échange d'informations peut vite devenir laborieux et paralyser leurs activités. Ils peuvent alors, partager un espace de travail numérique dans lequel ils expriment leurs idées, communiquent et échangent des ressources. Dans ce cas, en plus d'être confrontés à une nouvelle situation de travail, ils doivent utiliser un nouvel outil numérique qui peut les gêner pour accomplir correctement leur travail (à distance). Il faut donc leur proposer des solutions adaptées à leurs besoins spécifiques en termes de travail collaboratif.

Dans ce cadre, l'apport des technologies de la réalité virtuelle est considérable. En effet, ses nombreuses potentialités permettent de proposer différentes formes d'interactions collaboratives. Le partage d'un environnement virtuel permet de créer un nouvel espace de travail commun très riche en

termes d'accès aux informations distantes, de supports à la communication interpersonnelle et de possibilités de production. Les enjeux économiques, environnementaux et sociaux de l'utilisation de tels systèmes sont nombreux. En effet, ils supportent le travail collaboratif synchrone et doivent permettre un gain de temps, une diminution des risques, des coûts et des énergies (liés essentiellement aux moyens de transports). De plus, la collaboration à travers les environnements virtuels peut favoriser les interactions sociales entre des utilisateurs autrement trop éloignés pour interagir via les moyens traditionnels. Enfin, ces systèmes peuvent être des outils d'apprentissage très efficaces. Ils peuvent permettre, la transmission du savoir d'experts vers des novices préservant ainsi les connaissances.

Ces systèmes engendrent de nouvelles formes d'interactions homme-homme. En effet, dans le monde réel, les personnes ont appris à communiquer selon deux formes : explicite (verbale) et implicite (non verbale). Ils construisent à travers ces échanges d'information ce qu'on appelle un référentiel commun c'est-à-dire une représentation mentale commune de la situation. Ce référentiel commun leur permet de se comprendre mutuellement et de mieux collaborer. Mais, les caractéristiques des environnements virtuels actuels restreignent, le plus souvent, la communication à sa composante verbale. En effet, la composante non verbale est souvent difficile à reproduire fidèlement à distance. Ceci engendre essentiellement deux problèmes : la difficulté à communiquer à distance et la difficulté à sentir la présence des partenaires dans l'environnement et à suivre leurs activités. Ces difficultés limitent la construction du référentiel commun entre les partenaires et entravent leur activité collaborative et leur conscience d'être dans un groupe.

Ces problèmes restreignent considérablement l'utilisation de ces systèmes. En effet, les entreprises sont demandeuses de solutions spécifiques (aussi bien logicielles que matérielles) et mieux adaptées à leurs activités. Pour que ces solutions soient efficaces, elles doivent permettre d'améliorer la productivité, mais avec un risque limité et des efforts raisonnables en matière de conduite du changement¹. Ceci exige des systèmes faciles à intégrer, faciles à mettre en place et faciles à utiliser. **Mettre en place une méthodologie de conception pour les environnements virtuels collaboratifs devient alors une nécessité.** Pour définir une nouvelle méthodologie de conception pour les environnements virtuels collaboratifs, il est nécessaire de s'appuyer sur les concepts théoriques de la psychologie et de l'ergonomie cognitive et de tirer profit des caractéristiques des nouvelles technologies de la réalité virtuelle. Ceci permettra à partir de situations concrètes de donner un certain nombre de recommandations pour améliorer la conception de ces systèmes.

Problématique

Actuellement, la conception des environnements virtuels collaboratifs est pilotée principalement par les contraintes technologiques. L'inconvénient de ce type de démarche est de produire des systèmes souvent éloignés des besoins des utilisateurs et qui rendent ainsi difficile l'accomplissement des activités collaboratives. L'objectif est de se diriger vers des méthodologies de conception centrées sur les utilisateurs et la collaboration, prenant en considération les aspects technologiques et les caractéristiques offertes par les environnements virtuels. Dans notre travail, l'intérêt s'est porté sur deux formes de communications non-verbales : la communication spatiale et la communication haptique. Ces deux formes de communication sont présentes dans plusieurs tâches collaboratives.

¹ La conduite de changement vise à maîtriser le processus de transformation de l'entreprise dans un contexte de changement. Il concerne en particulier l'accompagnement du personnel afin qu'il puisse accepter et s'adapter à cette transformation

La communication spatiale est observable lors des échanges d'information autour de l'agencement spatial des objets de l'environnement. Elle permet aux collaborateurs d'effectuer ensemble des tâches de manipulation et de réorganisation d'objets dans l'espace (placer des fournitures dans un bureau par exemple).

La communication haptique permet d'échanger des informations sur les forces et les mouvements exercés par un opérateur lorsqu'il manipule les objets de l'environnement. Elle est utile aux collaborateurs pour effectuer ensemble des gestes de comanipulation d'objets (soulever une table ensemble par exemple).

Ces deux types d'informations sont donc très importants pour mener à bien certaines tâches collaboratives. Il est donc important que les opérateurs puissent les échanger d'une manière efficace. Cependant, les modifications introduites par les caractéristiques communicationnelles des environnements virtuels peuvent limiter la construction d'un référentiel commun efficace entre les partenaires. Ceci perturbe le bon déroulement des activités collaboratives dans ces environnements. Notre travail traite donc de l'étude de ces formes de communication. Ces études permettent de mieux comprendre sur quoi ces formes de communication reposent : quels **types d'informations sont échangés**, quels **canaux de communication sont utilisés** et **quels impacts les environnements virtuels peuvent-ils avoir** sur ces formes de communication. **A partir de là, il est question de proposer des solutions pour faciliter la communication spatiale et la communication haptique à travers des environnements virtuels collaboratifs et d'améliorer la collaboration des utilisateurs.**

Démarche

Notre démarche consiste à :

- **Déterminer les concepts de base sur lesquels s'articule la notion de collaboration** : l'élaboration du référentiel commun, la communication et la conscience de la situation collaborative. Cela permet de mettre en lumière les besoins fondamentaux auxquels il faudra répondre pour supporter l'utilisation des environnements virtuels collaboratifs. En effet, les échanges entre les participants, basés ou non sur des objets virtuels, nécessitent la combinaison de plusieurs canaux de communication, capturant, interprétant, véhiculant et distribuant l'information. L'objectif est d'agir sur ces informations multimodales pour chaque participant afin d'enrichir les interactions.
- **Étudier deux situations de communication** : nous nous sommes intéressés à deux formes de communications en particulier : la communication spatiale et la communication haptique.
- **Étudier ces deux formes de communication dans les environnements virtuels** : l'objectif étant de mettre en évidence l'influence des environnements virtuels sur ces deux formes de communication. A partir de ces études des hypothèses concernant l'amélioration de la communication dans ce type d'environnements sont dégagées.
- **Effectuer des expériences** : à partir de situations concrètes, nous proposons des solutions pour améliorer la communication spatiale et la communication haptique dans les environnements virtuels collaboratifs. Ces solutions ont été testées à travers des études expérimentales qui ont permis de valider certaines des hypothèses proposées.
- **Définition de nouveaux paradigmes de communication et de recommandation pour la conception des EVC** : deux nouveaux paradigmes de communication à travers les environnements virtuels ont été proposés. Ces paradigmes sont évalués dans le cadre de deux

tâches collaboratives. La validation de ces deux paradigmes permet de fournir des recommandations pour la conception des environnements virtuels collaboratifs.

Structure du mémoire

Ce mémoire est organisé en 4 principaux chapitres :

Le **chapitre 1** est une introduction aux domaines de la **réalité virtuelle** et du **travail collaboratif assisté par ordinateurs**. Il décrit également le domaine des **environnements virtuels collaboratifs** qui n'est rien d'autre que le résultat de la convergence des intérêts des deux premiers domaines de recherches.

Le **chapitre 2** présente la littérature fondatrice, sur laquelle reposent les motifs de cette recherche et expose davantage les questions liées à la **collaboration**. La notion de **référentiel commun**, centrale à toute activité collaborative y est définie. Le chapitre introduit par la suite deux notions importantes pour le déroulement des activités collaboratives dans les environnements virtuel : la **communication** et la **coprésence**.

Le **chapitre 3** présente la collaboration autour des tâches de manipulation d'objets dans les environnements virtuels collaboratifs. Il présente les référentiels spatiaux pouvant être utilisés pour la création d'un **référentiel spatial commun**. Dans ce chapitre, la notion de communication spatiale est introduite. Par la suite, une solution aux problèmes de communication spatiale dans les environnements virtuels basée sur le paradigme de **référence spatiale fixe** est proposée. Ce paradigme est évalué à travers une étude expérimentale dédiée à la **communication spatiale** dans une tâche de manipulation d'objets.

Le **chapitre 4** présente la collaboration autour des tâches basées sur des gestes techniques fins dans les environnements virtuels collaboratifs. Il explique l'importance du sens haptique permettant de construire un référentiel haptique commun. Dans ce chapitre la notion de **communication haptique** est introduite. Par la suite, un nouveau paradigme de communication (**le WYFIWIF**) basé sur le **guidage haptique** dans les environnements virtuels est proposé. Ce paradigme est évalué à travers une étude expérimentale sur la communication haptique dans une tâche **d'apprentissage collaboratif d'un geste chirurgical**.

La **conclusion** récapitule finalement les contributions de ce travail de thèse, évalue l'impact potentiel sur la conception des environnements virtuels collaboratifs et spécule sur les directions futures de nos travaux de recherche dans ce domaine.

Chapitre 1 : Les Environnements Virtuels Collaboratifs

Ce chapitre est consacré à la définition du contexte général de notre travail : les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC) et leurs applications. Cette technologie est née de la convergence des travaux de deux communautés : celle de la réalité virtuelle et celle du travail collaboratif assisté par ordinateur.

Avant d'aborder les EVC, ils seront d'abord replacés dans un contexte plus général des nouvelles technologies et des nouveaux médias dans lequel ils s'insèrent parmi d'autres outils de communication et de visualisation. Ceci permet, d'identifier les caractéristiques propres aux EVC.

Le chapitre est organisé comme suit :

- la première partie est dédiée à la définition de la réalité virtuelle et de ses applications,
- dans la seconde partie, le domaine du travail collaboratif assisté par ordinateur (TCAO) et les collecticiels (dont les EVC sont un des éléments) sont abordés,
- dans la dernière partie, nous nous intéressons à l'intersection des deux domaines précédents qui conduit aux EVC. Les EVC sont d'abord définis. Ensuite, leurs domaines d'applications sont présentés. Leurs utilisations sont illustrées par plusieurs exemples,
- Ce chapitre est conclut par une synthèse qui permet de dégager les problématiques liées aux EVC.

1 La réalité virtuelle

1.1 Bref Historique

Les systèmes de réalité virtuelle sont apparus avant même le terme réalité virtuelle. La toute première application connue est le *Sensorama* de Morton Heiling (Fuchs, Moreau, Berthoz, & Vercher, 2006) construit en 1956 (Figure 1). Elle permettait l'immersion visuelle et auditive d'un utilisateur dans une scène réelle préalablement filmée. Dans les années 60, Ivan Sutherland a proposé *Sketchpad*, le premier système à utiliser une interface graphique complète et considéré comme l'ancêtre des systèmes de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Il a proposé par la suite l'un des premiers systèmes de casque de réalité virtuelle *Ultimate Display* (Figure 1) avec son étudiant Bob Sproull (Fuchs et al., 2006). C'était l'une des premières expériences d'immersion d'une personne dans un environnement de synthèse généré par un ordinateur. C'est dans les années 80 que l'expression anglo-saxonne « Virtual Reality » fut proposée pour la première fois par Jaron Lanier lors d'un salon professionnel (Tisseau, 2001). Il forgea cette expression dans le cadre de la stratégie marketing et publicitaire de son entreprise, sans chercher à en donner une définition très précise. La traduction française « Réalité virtuelle » (RV) est utilisée quant à elle depuis une dizaine d'années. Bien que cette traduction soit souvent discutée (Cadoz, 1994; Tisseau, 2001), son utilisation est devenue très courante. Ici on se limite à définir ce qu'est la RV, quelles sont ses applications et en quoi les recherches dans ce domaine peuvent aider dans ce travail.

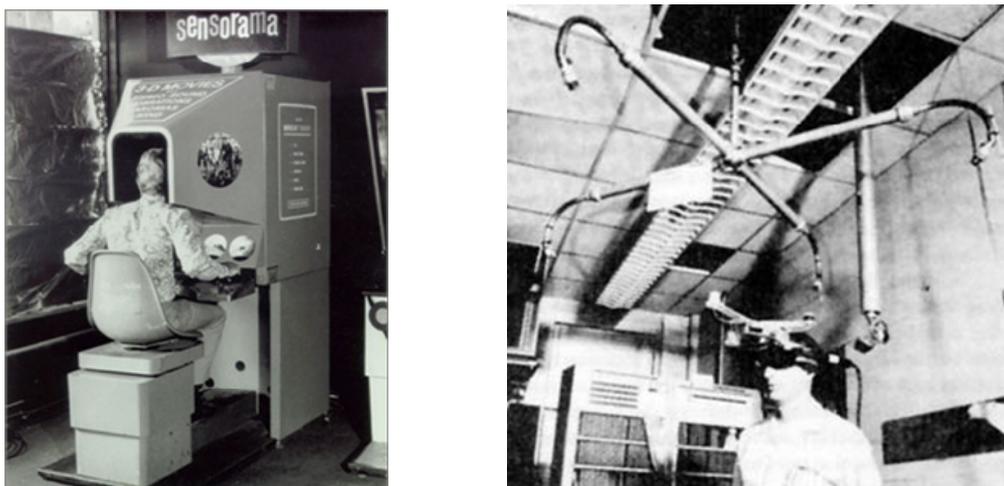


Figure 1: Les premiers systèmes de réalité virtuelle : à gauche, le *Sensorama* de Heiling (1956), à droite, l'*Ultimate Display* de Sutherland (1968)

1.2 Définition

Plusieurs raisons rendent difficile la définition de la RV : Premièrement (i), étant une notion récente, sa définition évolue assez rapidement. Deuxièmement (ii), la RV est à l'intersection de deux grands domaines : les sciences et techniques et les sciences humaines. Plusieurs disciplines de ces grands domaines ont participé à son développement : robotique, infographie, informatique et Interactions Homme-Machine, informatique temps réel, ergonomie physique et physiologique, et plus récemment psychologie et ergonomie cognitive (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003). Bien que la RV soit le plus souvent liée au domaine de l'informatique, l'apport des autres disciplines depuis quelques années ne peut plus être négligé. Ainsi, la RV profite de cette pluridisciplinarité pour se construire comme un domaine de recherche à part entière. Mais cette diversité des acteurs et des domaines qui participent à son évolution a fait émerger des visions différentes. Enfin (iii), l'impact de la réalité virtuelle sur le

grand public à travers le mass-média a conduit à de nombreuses interprétations, parfois inconsistantes, du terme en question.

Il est donc question ici d'étudier quelques définitions pour essayer de trouver un consensus qui permet d'avoir une vision claire de ce que représente la RV dans le cadre de notre travail d'étude des environnements virtuels collaboratifs.

D'un point de vue fonctionnel, la RV peut être définie comme étant un environnement tridimensionnel, simulé par ordinateur, un espace donné et permettant à l'utilisateur d'interagir avec cet espace. Cet environnement peut être :

- Une simulation d'une situation réelle du monde de l'utilisateur, lui permettant d'avoir des expériences nouvelles (un simulateur de vol permettant à des novices d'apprendre à piloter des avions ou à tester un nouvel appareil),
- Une amplification d'un phénomène réel pour que l'utilisateur en ait une meilleure représentation mentale (par exemple, un phénomène scientifique non observable directement, ou une dimension sensorielle extrapolée pour mieux l'appréhender),
- Un monde artificiel imaginé par des artistes ou par des auteurs de sciences fictions permettant d'avoir de nouvelles expériences différentes de celles du monde réel.

D'un point de vue technique, une application de RV offre à l'utilisateur la sensation d'être dans un monde virtuel et d'y agir. La définition de la RV tourne alors autour de trois notions : l'immersion, la présence et l'interaction.

1.2.1 L'immersion

Elle est liée à la perception qu'a l'utilisateur du monde virtuel. Ce monde est alors directement accessible par les différents sens de l'utilisateur. Burkhardt (2007) définit l'immersion comme étant le degré et la qualité avec lesquels les dispositifs logiciels et matériels contrôlent les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action de l'utilisateur. Ces dispositifs occultent alors en partie la perception de l'utilisateur du monde qui l'entoure et la remplacent par des images de l'environnement virtuel (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003). Le degré d'immersion est donc manipulé à travers le remplacement des sensations naturelles par leurs correspondantes dans le monde virtuel. Cependant, dans la majorité des systèmes de RV l'immersion sensorielle n'implique pas la totalité des sens. Fuchs et al. (2006), parlent d'immersion pseudo naturelle, car le monde virtuel introduit des biais par rapport au monde réel dans lequel l'utilisateur a appris à agir. La notion d'immersion est souvent confondue avec la notion de présence. Les définitions de Slater, Linakis, Usoh, Kooper et Street (1996) permettent de lever cette ambiguïté. En effet, il associe l'immersion à la description objective des aspects du système de la RV (tels que la résolution d'affichage, les types de dispositifs, ...etc.).

1.2.2 La présence

Contrairement à l'immersion qui est liée aux aspects du système, le sentiment de présence concerne l'expérience de l'utilisateur dans l'EV. Pour Slater et al. (1996), c'est un phénomène subjectif lié à la sensation qu'a l'utilisateur d'être « là » dans l'EV. La présence (ou télé présence) est un état psychologique de l'utilisateur qui caractérise son expérience vécue dans l'EV. Elle est à la fois dépendante des processus cognitifs, de la perception de l'environnement ainsi que des émotions de l'utilisateur lorsqu'il interagit dans un EV. Cette notion est considérée comme une caractéristique essentielle lors de la conception des EV. Un sentiment de présence élevé peut permettre aux

utilisateurs d'avoir de meilleures performances dans l'EV. Cependant, les concepts qui entourent la notion de présence restent assez flous, essentiellement en ce qui concerne la définition de mesures qui permettent d'évaluer et de rendre compte du sentiment de présence dans l'EV. Cette notion de présence sera abordée plus en détail dans le chapitre suivant.

1.2.3 L'interaction

Elle représente le langage de communication entre l'homme et la machine. Ce langage permet à l'utilisateur d'agir pour modifier le monde virtuel et d'avoir des retours de celui-ci par l'intermédiaire d'interfaces sensorielles, d'interfaces motrices et de techniques d'interactions (Sternberger, 2006). L'utilisateur du système n'est donc plus spectateur mais plutôt acteur. C'est ce qui différencie alors un système de RV de l'animation. L'interaction est souvent associée au temps réel. En effet, pour qu'elle soit confortable et efficace, l'utilisateur ne doit pas percevoir un décalage temporel entre ses actions et les répercussions qui en résultent dans le monde virtuel, et les réponses de l'environnement qui en découlent (comme le retour tactile). Bien que cette contrainte soit difficile à respecter, les systèmes de RV tentent de réduire les perturbations engendrées par ce décalage sur l'utilisateur qui peuvent engendrer des désagréments ou des troubles liés à l'exposition prolongée (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003).

1.3 Les Environnements virtuels

Le terme Environnement Virtuel (EV) a été utilisé comme synonyme de la RV au début des années 90 par les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ellis (1991) préfère quant à lui, utiliser le terme EV plutôt que RV qui est pour lui critiquable et critiqué. En effet, pour lui, le terme EV est plus proche sémantiquement de ce que la technologie actuelle peut offrir (les dispositifs totalement immersifs restent trop onéreux pour être utilisés fréquemment). Il définit alors les EV comme étant (traduction personnelle) : « *la visualisation interactive d'images virtuelles, enrichie par des transformations spécifiques et des modalités non visuelles (telles qu'auditives ou haptique, ...etc.), pour convaincre les utilisateurs qu'ils sont immergés dans un espace synthétique* » (Ellis, 1991). Cependant, le terme EV semble réducteur ; il ne reflète pas exactement les notions les plus importantes de la RV : l'immersion, la présence et l'interaction.

Au-delà de la terminologie, on peut dire que la RV introduit de nouvelles formes d'interactions qui permettent aux utilisateurs d'avoir de nouvelles expériences dans les EV 3D. Ainsi, la redéfinition de la RV proposée par Latta et Oberg (1994) semble mieux adaptée pour qualifier les systèmes qui existent actuellement : (traduction personnelle) « *toute interface homme-machine avancée qui simule un environnement réaliste et qui permet aux participants d'interagir avec lui* ». C'est cette définition qui a été adoptée pour la suite (bien que le terme « réaliste » puisse encore être discuté car les environnements virtuels ne sont pas toujours conçus pour être une copie exacte de la réalité. Cette idée sera développée par la suite dans ce chapitre). Cette définition présente l'avantage d'inclure aussi bien les systèmes basés sur les ordinateurs personnels que ceux basés sur des dispositifs plus spécifiques (casque de données, CAVE, combinaison de données, ...etc.). Le terme RV sera désormais utilisé pour désigner la technologie et le terme EV pour désigner l'environnement créé pour expérimenter cette technologie.

Un EV représente une description dynamique des objets faisant partie d'une simulation. Concevoir un EV nécessite alors de définir un ensemble de données modélisant :

- **La navigation** : C'est la tâche la plus commune dans les EV. Comme dans le monde réel, l'utilisateur a besoin de se déplacer dans l'EV pour explorer son environnement et réaliser certaines tâches. La navigation inclut les mouvements de la tête pour observer un objet de plus près, se déplacer dans l'EV ou encore « voler » d'un monde virtuel à un autre. La navigation correspond donc à la manipulation du point de vue de l'utilisateur dans l'EV mais aussi à la manipulation des paramètres d'affichage (zoom, champs visuel).
- **La sélection** : Avant de pouvoir interagir avec un objet virtuel, l'utilisateur doit pouvoir indiquer la cible de cette interaction. Cette tâche correspond à la sélection de l'objet désiré. Ceci suppose que les entités qui composent l'EV soient identifiables d'une manière unique par l'application. La sélection d'un objet nécessite d'abord la désignation de cet objet, et ensuite, la validation de la sélection de l'objet désigné. Cette tâche précède la tâche de manipulation.
- **La manipulation** : c'est l'une des tâches les plus importantes dans un EV. En effet, elle permet à l'utilisateur de devenir un acteur de l'EV en lui permettant de changer les propriétés de cet environnement. La manipulation d'objet 3D correspond aussi bien à des actions du monde réel (saisir un objet, changer sa position ou son orientation,...etc.) qu'à des actions impossibles à réaliser dans la vie quotidienne (création et suppression d'un objet, mise à l'échelle,...etc.).
- **Contrôle de l'application** : c'est ce qui permet à l'utilisateur de communiquer avec le système en dehors des interactions avec l'EV. Il regroupe des tâches telles que les changements des paramètres d'affichage (la résolution par exemple), l'accès à l'aide, le changement des paramètres de connexion,...etc.

1.4 Les Technologies de la Réalité Virtuelle

Les développements des technologies autour de la RV tournent autour de trois axes : la communication, l'interaction homme-machine et la synthèse d'images 3D.

1.4.1 Les technologies de la communication et des réseaux

Les technologies de la communication sont basées essentiellement sur les réseaux informatiques et le développement des architectures logicielles des systèmes répartis. La communication à travers des EV nécessite le transfert d'une grande quantité d'informations. Les réseaux de communications doivent alors garantir la transparence vis-à-vis des utilisateurs. Les développements des réseaux informatiques visent essentiellement à définir de nouveaux standards de communication pour supporter les EV distribués et les communications hypermédias.

1.4.2 Les technologies de la synthèse d'image 3D

La représentation d'un EV est en premier lieu visuelle (Fuchs et al., 2006). Les avancées technologiques dans le domaine de l'infographie et de la synthèse d'image permettent alors d'améliorer la qualité visuelle des EV. La synthèse d'image consiste en deux phases essentielles : une phase de modélisation permettant de reconstruire l'environnement qu'on veut afficher et la phase de rendu qui a pour but de visualiser l'environnement modélisé. Chacune de ces étapes fait appel à des techniques différentes. Les progrès dans le domaine de l'infographie pour la RV se font autour de ces techniques mais aussi autour du matériel informatique qui permet d'optimiser chacune des deux phases (mémoires physiques, CPU, GPU,...etc.). La finalité étant d'améliorer la qualité des images affichées en temps réel et permettre l'immersion de l'utilisateur dans l'EV.

1.4.3 Les technologies de l'interaction homme-machine

La RV permet à l'utilisateur d'interagir au sein de l'EV dans lequel il est immergé. L'utilisateur vit cette expérience dans l'EV à travers des interfaces qui lui procurent des sensations proches de celles qu'il a dans le monde réel. Ceci passe par les activités sensori-motrices qu'il peut avoir dans cet EV. Fuchs et al. (2006) parlent alors d'Interfaces Comportementales qu'ils définissent comme étant « *un dispositif qui exploite la perception et la motricité à la base du comportement humain* ». L'objectif étant de permettre à l'humain d'avoir un comportement le plus naturel possible. Les technologies d'interaction interviennent à travers deux types d'interfaces : les **interfaces sensorielles** qui transmettent des informations sensorielles de l'ordinateur vers l'utilisateur et des **interfaces motrices** qui transmettent vers l'ordinateur la réponse de l'utilisateur aux informations qu'il a reçu. Les développements se font autour des différents dispositifs d'interaction dans l'EV mais aussi autour des techniques d'interaction permettant d'étudier la manière dont ces dispositifs seront utilisés dans l'EV. On retrouve alors les quatre catégories de périphériques suivantes (Fuchs et al., 2006) :

- Les dispositifs permettant la présentation d'informations visuelles à l'utilisateur qui regroupent des périphériques variés : Grand écran, Visiocasque, CAVE, lunettes+écran stéréoscopiques,...etc. (Figure 3),
- Les dispositifs qui permettent la présentation d'informations proprioceptives et cutanées tels que les gants de données, les bras haptiques à retour d'efforts,...etc.

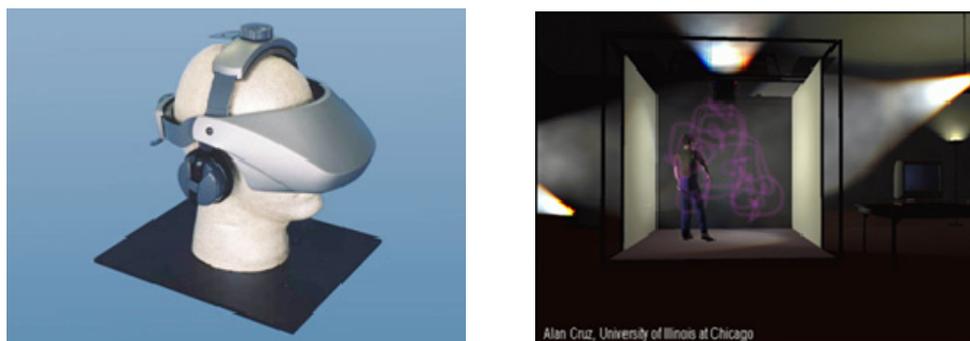


Figure 3 : Casque de données et CAVE

- Les dispositifs permettant la capture de la position et des mouvements de l'utilisateur qui regroupent les capteurs de position magnétiques ou ultrasonores, les combinaisons, les gants de données, ...etc. (Figure 4).



Figure 4 : Gant de données et interface Haptique

- Les périphériques permettant la capture et le retour d'informations sonores : les dispositifs de reconnaissance vocales, les microphones, les casques son 3D spécialisés.

Ces dispositifs permettent alors d'assurer la cohérence entre la rétroaction créée par le système de RV, la position et les actions de l'utilisateur dans l'EV : Le **déplacement** de l'utilisateur doit être accompagné d'un changement de point de vue, le toucher d'un objet doit être accompagné d'un retour haptique,...etc.

1.5 Les acteurs de la Réalité Virtuelle

Les personnes qui accordent de l'importance au développement des technologies de la RV peuvent être regroupées en deux grandes catégories : Les concepteurs et les utilisateurs. Les premiers seront présentés à travers les différents domaines qui contribuent au développement de la RV alors que les seconds seront présentés à travers les différentes applications de la RV.

1.5.1 Les domaines contribuant l'essor de la RV

La RV fait appel à plusieurs domaines qui contribuent à son essor (pour plus de détails, voir Stanney & Zyda (2002)). Dans cette partie, les trois disciplines, qui ont les apports les plus importants dans ce domaine, seront abordées :

- **L'apport de l'informatique** : L'informatique participe considérablement au développement de la RV. L'infographie par exemple contribue à l'amélioration des rendus visuels affichés et à avoir ainsi des EV plus riches. L'informatique temps-réel permet à travers les différents algorithmes de réduire la latence du système et d'améliorer la perception de l'EV. Les études dans le domaine des réseaux contribuent également à améliorer la qualité des EV en assurant le transfert des informations d'une manière transparente pour les utilisateurs. Enfin, l'intelligence artificielle intervient également dans le développement de la RV à travers l'introduction des agents autonomes qui interagissent avec les autres entités de l'EV.
- **L'apport des sciences humaines** : les disciplines des facteurs humains (*human factors*) participent activement aux recherches et développements de la RV à travers la contribution à la conception d'EV mieux adaptées aux tâches, aux besoins et aux caractéristiques des utilisateurs (comme en témoignent les travaux de Bach (2004) pour la définition des critères ergonomiques pour la conception des EV). Au départ les recherches se sont concentrées essentiellement sur des études ergonomiques liées à l'utilisation des technologies de la RV : mal du simulateur, trouble de l'orientation, fatigue visuelle (Burkhardt, 2007). Plus récemment, la psychologie cognitive a fait son apparition dans le domaine de la RV comme moyen d'analyse des besoins des utilisateurs en se basant sur des modèles du fonctionnement cognitif et perceptif des utilisateurs. Comme en témoignent par exemple les études sur les effets des EV sur les interactions sociales des utilisateurs. Le but est de construire des EV qui permettent une interaction naturelle, directe et intuitive.
- **L'apport de la robotique** : La robotique, la téléopération, l'électronique, ou encore la mécanique sont des disciplines qui contribuent grandement au développement de nouvelles solutions d'interactions pour la RV. En effet, à travers les différents dispositifs tels que les capteurs de position ou encore les bras haptiques à retours d'efforts, ces disciplines permettent d'améliorer la perception des utilisateurs et de retranscrire plus fidèlement les actions de ces utilisateurs dans l'EV. Un état de l'art détaillé sur les apports de la robotique et de la téléopération peut être trouvé dans Kheddar, Chellali, & Coiffet (2002).

Aujourd'hui la tendance est à l'émergence d'une communauté pluridisciplinaire pour le développement des recherches autour de la RV. Elle devient alors un objet de recherche en soit, en même temps qu'elle est un outil pour la recherche. Notre approche s'inscrit dans cette optique de recherche pluridisciplinaire.

1.5.2 Les applications de la réalité virtuelle

La RV trouve des applications dans des domaines multiples. On peut alors classer les applications selon leurs finalités :

Formation et entraînement

La simulation de certains aspects du monde réel permet de reproduire des environnements de travail virtuels assez proches des environnements réels. Ces environnements permettent alors à des utilisateurs de se former et de s'entraîner sur des scénarios semblables à des situations réelles et qui sont propices à l'évaluation de la pratique. Ce type d'environnements trouve des applications le plus souvent dans la chirurgie, les traitements des phobies, l'aviation, le domaine militaire, la maintenance, l'industrie ou encore l'éducation. Le but étant d'éviter certains risques liés à l'entraînement dans des situations réelles (la maintenance d'une centrale nucléaire, par exemple), réduire les coûts liés à des situations réelles (les entraînements pour piloter un avion) ou rendre plus accessibles certaines situations rares du monde réel (les entraînements pour la gestion des catastrophes naturelles par exemple). Le concepteur cherche alors le plus souvent le plus grand degré de réalisme pour se rapprocher de la situation réelle, bien que ceci soit contraint généralement par les limites de la technologie. Mais cet aspect ne doit pas être considéré comme étant une restriction. En effet, il est absurde d'utiliser une simulation pour avoir exactement le même comportement que celui du monde réel. Au contraire, certains aspects doivent être écartés (pour des besoins pédagogiques par exemple) ; le concepteur doit alors préalablement définir les aspects à reproduire en fonction des besoins de l'application (ce point sera traité plus en détail dans le chapitre 4). Voici quelques exemples de l'utilisation de la RV dans les différents domaines préalablement cités : en psychologie pour le traitement des phobies (Pan & Slater, 2007; Rothbaum, Hodges, Kooper, Opdyke, Williford, & North, 1995), en Chirurgie à travers les simulateurs chirurgicaux (Hunter, et al., 1993; Bibin, Lécuyer, Burkhardt, Delbos, & Bonnet, 2008), dans le domaine militaire : à travers les systèmes d'entraînement militaire (Macedonia, Zyda, Pratt, Barham, & Zeswitz, 1994), en maintenance, avec comme exemple le système *MOVE* (Wilson, Brown, Cobb, D'Cruz, & Eastgate, 1995) ou encore la formation professionnelle avec l'exemple de l'application *SécuréVi* (voir la Figure 5) utilisée pour former des officiers sapeurs pompiers à la gestion opérationnelle et au commandement (Querrec, Buche, Maffre, & Chevallier, 2003).

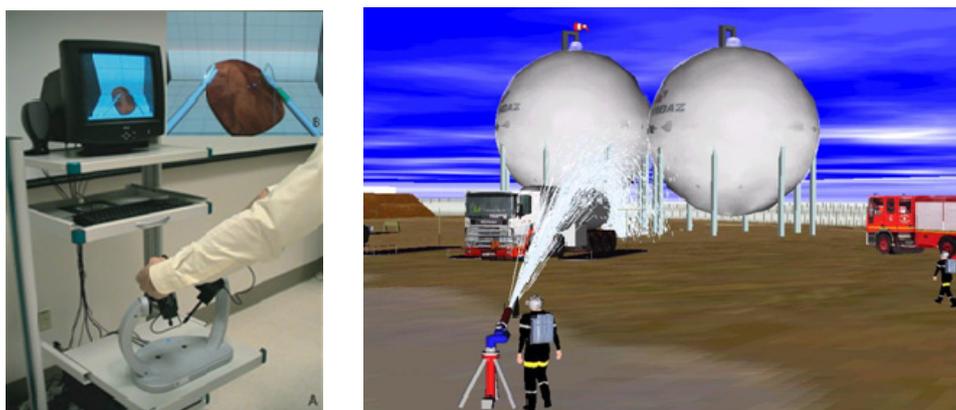


Figure 5 : *MIST-VR* un simulateur d'apprentissage pour la chirurgie minimale invasive (Mentice AB, Göteborg, Suède) et l'application *SécuréVi* du LIIB.

Visualisation et exploration d'informations

Les environnements virtuels dans ce type d'applications permettent de visualiser certains phénomènes du monde réel qui ne sont pas visibles directement. On retrouve par exemple des applications de RV

permettant de faire des analyses exploratoires de données abstraites (visualisation d'information) telles que des tableaux multidimensionnels de données numériques complexes. Les EV permettent alors de matérialiser visuellement ces données en mettant en valeur certaines de leurs particularités invisibles sous la forme brute et de faire ainsi des analyses plus poussées (dans le monde des finances par exemple).

La RV est aussi utilisée pour visualiser des informations scientifiques (visualisation scientifique). Des EV sont utilisés, par exemple, pour représenter certains phénomènes physiques invisibles à l'échelle humaine, en les affichant à plus grande échelle ou sous une forme symbolique (la radioactivité, les nano technologies, l'intérieur du corps humains). Ces représentations permettent de comprendre plus facilement ces phénomènes (Figure 6) : visualisation des informations scientifiques (Hinckley, Pausch, Downs, Proffitt, & Kassell, 1995; Fröhlich & Plate, 2000), visualisation des données (Fröhlich, Barrass, Zehner, Plate, & Göbel, 1999), écoulement des fluides (Bryson & Levit, 1992) et nano technologies (Taylor, et al., 1993).

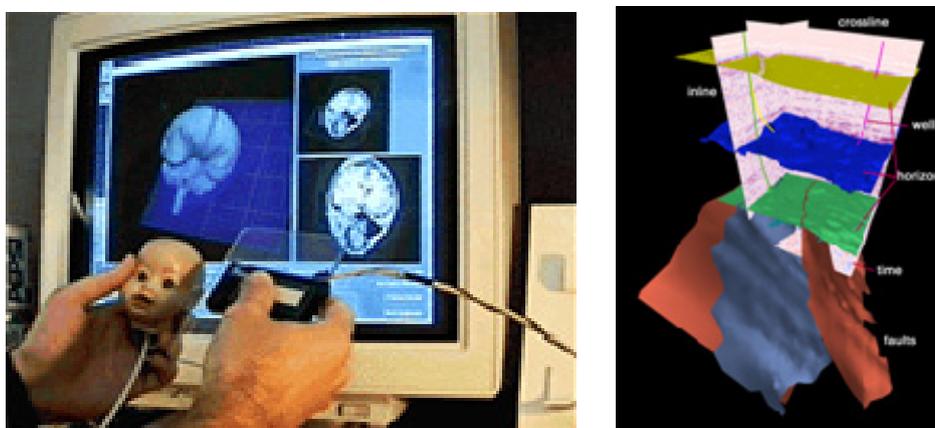


Figure 6 : A gauche, visualisation d'informations en neurochirurgie. A droite, visualisation de données sismiques

Prototypage et démonstrations

Parfois, il est intéressant d'étudier un produit avant sa réalisation. La RV permet alors d'avoir certaines informations sur ce que sera le futur produit. On retrouve alors des applications de la réalité virtuelle en architecture (pour qu'un client puisse visualiser sa future maison par exemple) en design de produit, en marketing ou encore en urbanisme. L'intérêt de ce type d'application est d'élargir l'information vers tous les acteurs concernés par le cycle de vie du produit. Ceci permet alors de donner aux futurs utilisateurs la possibilité d'apporter des modifications sur les produits pendant la phase de conception, ou encore d'étudier les impacts possibles du futur produit dans le cadre de son utilisation. Ce prototypage virtuel permet de réduire les coûts de réalisation de ces produits et de satisfaire les demandes des utilisateurs d'une manière plus précise en leur présentant quelque chose de plus concret que des plans.



Figure 7 : A gauche, le système *R-Screen* (par *Clarté*) permettant la présentation virtuelle des voitures pour la vente chez les concessionnaires. A droite, étude sur l'impact de l'intégration du tramway dans un paysage urbain Nantais (Donikian, Moreau, & Thomas, 1999).

Voici quelques exemples d'applications de la RV : en design (Butterworth, Davidson, Hensch, & Olano, 1992), en marketing et vente : le système *R-Screen* de Renault (Figure 7) ou encore en urbanisme (Donikian, Moreau, & Thomas, 1999).

Divertissement

La RV est présente dans le divertissement à travers différentes applications. Les jeux vidéo 3D contribuent significativement depuis plusieurs années au développement de l'informatique graphique (et donc de la RV). On peut donner l'exemple du jeu *les Sims* qui est une simulation des activités quotidiennes d'un ou de plusieurs personnages virtuels (Figure 8). Par ailleurs, les dernières générations de consoles de jeux prennent en compte les mouvements du joueur (avec des accéléromètres ou de l'analyse vidéo), augmentant les possibilités d'interaction 3D (telle que la console *Wii* de chez *Nintendo*).



Figure 8 : à gauche, le jeu vidéo « *les Sims 3* » (Electronic Arts), à droite, la visite virtuelle de la ville de Nantes en 1757 (musée d'histoire de Nantes).

La RV est présente aussi dans les musées avec, par exemple, des applications permettant de plonger les visiteurs dans le passé. C'est le cas du théâtre virtuel du Musée Canadien de la Civilisation à Hull ou du Musée d'Histoire de la ville de Nantes qui offre aux visiteurs la possibilité de faire une visite virtuelle de Nantes au 18^e siècle, avec photos panoramiques de la ville en 2007 (Figure 8). Cependant, ces applications restent peu interactives. En effet, elles n'offrent le plus souvent aux utilisateurs que la possibilité de naviguer à travers le monde virtuel recréé. Les coûts encore prohibitifs et les problèmes d'accès au grand public rendent l'utilisation de la RV dans les lieux publics encore rare.

1.6 Synthèse

Bien que les développements technologiques offrent depuis quelques années de nouvelles possibilités pour améliorer l'expérience de l'utilisateur à travers la RV, son image populaire la plus futuriste promettant une révolution de l'interaction avec les ordinateurs semble s'atténuer. En effet, les avancées technologiques actuelles ne permettent pas d'avoir une interaction en temps réel, ni une immersion totale de l'utilisateur. De plus, les autres acteurs (psychologues, ergonomes, sociologues) mesurent encore mal les possibilités et les limites des technologies actuelles. Cela ajouté au coût, la RV s'est principalement développée dans l'industrie, et est devenue un outil à part entière grâce aux simulateurs, à la visualisation à grande échelle, ou encore au prototypage dans les chaînes d'outils CAO gérant le cycle de vie d'un produit.

Tous ces éléments font de la RV une opportunité de recherche et de collaborations entre les différentes disciplines qui contribuent à son développement. Une des questions est alors de construire des fondements théoriques plus solides et plus fiables pour pouvoir tirer le maximum de profits de la RV au delà des contraintes technologiques. L'enjeu devient principalement la conception d'EV utilisables et utiles, dont on sait mesurer la qualité. C'est dans cette optique que les recherches autour des EVC se développent. Offrant ainsi une nouvelle dimension à la communication et aux interactions interpersonnelles à travers les outils informatiques.

La section suivante aborde l'autre domaine qui participe au développement des EVC : le travail collaboratif assisté par ordinateur.

2 Travail collaboratif assisté par ordinateur : TCAO

Les EVC permettent à plusieurs utilisateurs de réaliser une activité ensemble. Comme d'autres applications multi-utilisateurs de la RV, ils font appel à des résultats du champ du TCAO.

2.1 Définition

Les nouvelles technologies de communication se sont installées depuis quelques années dans nos sociétés. L'ampleur du développement des téléphones mobiles ou encore d'Internet fait apparaître de nombreux enjeux sociaux et économiques. C'est dans ce cadre que se sont développés différents outils de TCAO (les collecticiels). Ces systèmes traduisent le changement de l'utilisation des ordinateurs : d'un outil de résolution de problèmes à un outil de communication et d'interaction (Ellis, Gibbs, & Rein, 1991). En effet, les activités humaines sont rarement individuelles, elles impliquent souvent des interactions au sein d'un groupe de personnes. D'où le besoin de nouvelles technologies qui supportent le travail de groupe. En 1984, Paul Cashman et Irene Grief (cités par Grudin, 1994) étaient les premiers à avoir utilisé le terme «*Computer-Supported Cooperative Work*» (CSCW, l'équivalent anglais du terme TCAO) lors d'un *workshop* sur les effets de la technologie sur le travail en groupe. L'intérêt pour le domaine de la TCAO naît alors de la volonté des concepteurs de mieux comprendre les activités de groupe à travers le point de vue des économistes, sociologues ou encore des anthropologues. Ceci dans la perspective de concevoir des systèmes mieux adaptés aux interactions homme-homme. Les collecticiels (*Groupware*, en anglais) sont définis par Ellis et al. (1991), comme étant (traduction personnelle) : «*des systèmes informatiques qui soutiennent les groupes de personnes engagées dans une tâche commune (ou objectif commun) et qui fournissent une interface à un environnement partagé*». Cette définition exclut alors les systèmes qui ne sont pas informatisés, ou encore les systèmes multi-utilisateurs qui ne partagent pas une tâche commune. Le travail collaboratif peut se concrétiser par le partage d'informations, ou bien la création et l'échange de données informatisées liées à l'organisation, la synchronisation et la gestion des activités. Les interfaces de ces systèmes ont pour objectif de supporter ce travail collaboratif. La TCAO est le domaine pluridisciplinaire qui permet l'étude de la conception, la construction et l'utilisation de ces systèmes collaboratifs et les impacts psychologiques et sociologiques qu'ils peuvent avoir sur les utilisateurs. La discipline intéresse particulièrement les personnes impliquées dans la conception de logiciels d'une part et dans l'étude des comportements sociaux et organisationnels d'autre part. Ceci inclut alors aussi bien le monde des affaires, que les informaticiens, les psychologues, les chercheurs en communication et les anthropologues (entre autres). Les collecticiels font l'objet de recherches depuis une vingtaine d'années. Cependant, leur utilisation ne s'est généralisée que pour un certain type d'applications (courrier électronique, forums de discussions, réseaux sociaux,...etc.). Ceci laisse penser que beaucoup de travail reste à faire dans ce domaine, pour satisfaire les exigences des utilisateurs en termes d'interactions sociales.

2.2 Typologies des Collecticiels

Les collecticiels sont conçus pour supporter la collaboration au sein d'un groupe de personnes qui travaillent ensemble. Ellis, et al. (1991), ont proposé une classification des collecticiels en introduisant la matrice espace temps (2x2) présentée dans la Figure 9 :

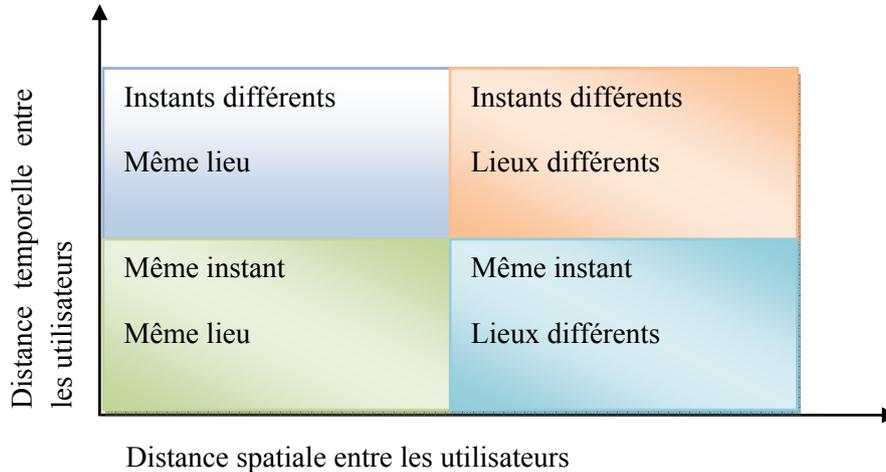


Figure 9: La Classification espace-temps (d'après Ellis et al., 1991).

Cette matrice permet de caractériser les collecticiels selon les groupes d'utilisateurs possibles. Elle est composée d'une dimension temporelle (les moments où les actions sont effectuées par les utilisateurs) et d'une dimension spatiale (l'endroit dans lequel les actions sont effectuées par les utilisateurs). La classification proposée par Ellis et al. (1991) est la suivante :

2.2.1 *Distribution spatiale des collaborateurs*

Elle dépend de la localisation de chacun des utilisateurs du collecticiel. On peut distinguer deux situations :

- **Co-localisée** : Les membres du groupe se trouvent dans le même lieu, c'est à dire dans la même salle. Ils sont dans une situation habituellement dénommée "présentielle". Dans ce cas les partenaires peuvent interagir librement.
- **A distance** : Les membres du groupe sont distribués dans des lieux éloignés qu'ils soient situés dans les étages d'un même bâtiment, à l'intérieur d'un même pays ou disséminés à travers des continents.

Cependant, cette distribution spatiale n'est pas toujours aussi claire. En effet, il est possible parfois de trouver des situations qui combinent une collaboration co-localisée avec une collaboration à distance. On peut considérer aussi deux opérateurs qui collaborent et qui ne se voient pas comme étant à distance même si ils se trouvent dans la même pièce.

2.2.2 *Distribution temporelle*

Elle ne repose pas seulement sur le fait que l'activité de groupe se passe simultanément ou à des moments différents, mais aussi sur les techniques de transmissions de données (transmission synchrone ou asynchrone). Elle permet de distinguer deux catégories :

- **Moments identiques** : Les activités du groupe s'effectuent en temps réel, en même temps. Toute action d'un membre du groupe est immédiatement retransmise aux autres membres. On parle alors de systèmes synchrones.
- **Moments différents** : Les membres du groupe agissent en temps différé. Les actions sont espacées sur l'échelle du temps et un membre du groupe observe la somme des interventions qui se sont effectuées avant son arrivée. Il est nécessaire alors de conserver l'état du système à tout moment. Des notifications sont envoyées aux utilisateurs afin de mettre en valeur les modifications effectuées entre deux visites d'un même utilisateur. On parle alors de systèmes asynchrones.

Mais cette distribution temporelle n'est pas toujours aussi claire et paraît parfois artificielle (Sire & Chatty, 1998). En effet, on peut par exemple avoir un système qui gère, d'une part, les informations sur des utilisateurs déconnectés en envoyant des détails de leurs activités passées aux utilisateurs actuellement connectés (situation asynchrone), et d'autre part, la communication entre les utilisateurs actuellement en ligne (situation synchrone).

Grudin (1994) a étendu la matrice espace/temps d'Ellis et al. (1991) en une matrice (3x3). Il a alors introduit les aspects imprévisibles qui permettent d'inclure d'autres situations de collaborations. Le Tableau 1 résume les situations qui résultent de la matrice de Grudin avec des exemples illustrant chacune de ces situations :

Lieu \ Temps	Temps identique	Temps différents	Temps différents et imprévisibles
Lieu identique	jeux sur console, conversation de vive voix	prise de parole, relais	<i>post-it</i> , tableau d'affichage
Lieux différents	vidéoconférence, médiaspace, téléphone, EVC	<i>workflow</i>	lettres, courrier électronique, répondeur téléphonique
Lieux différents et imprévisibles	jeux en temps réel sur Internet, rencontre informelle, téléphone portable, bipéur, messagerie instantanée	édition partagée,	les jeux asynchrones sur Internet, <i>sms</i> , newsgroup, wiki

Tableau 1: La matrice espace/temps étendue (d'après Grudin 1994)

De part l'intérêt porté au travail simultané de groupe, l'étude est restreinte dans ce qui suit, aux collecticiels synchrones (temps identique).

2.3 Exemples d'applications des collecticiels synchrones

Les collecticiels ont pour objectif de supporter le travail collaboratif entre des partenaires qui se trouvent à distance. La conception des collecticiels dans le domaine du TCAO, repose généralement sur trois approches (Moran & Anderson, 1990) :

- les collecticiels qui favorisent la **communication coordonnée et structurée** entre des personnes se trouvant dans des lieux séparés. Dans le cadre des collecticiels synchrones, ce

type de systèmes regroupe des applications telles que les systèmes de réunions à distance (Figure 10) pour des situations de négociation commerciale où encore de prise de décision.

- Les espaces de travail partagés qui soutiennent la collaboration autour d'**une tâche commune**. Les systèmes synchrones dans cette catégorie regroupent des applications telles que la conception partagée en architecture et en design ou encore l'édition partagée. Ils incluent également, les environnements virtuels partagés.
- Les systèmes qui soutiennent **les communications et les interactions informelles** non planifiées et non structurées entre des partenaires travaillant à distance. Des environnements audio-vidéo spécifiquement conçus pour ce type de communication sont souvent regroupés sous le concept de médiaspace (Mackay, 1999).

Ces différentes catégories se chevauchent entre elles car elles reposent généralement sur les mêmes technologies de communication : les transmissions audio et vidéos entre les partenaires qui se trouvent sur des sites distants. Ces systèmes permettent alors une interaction et une communication homme-homme médiatisées. Le recours à ces technologies est possible à travers les développements récents des réseaux informatiques et la diminution des coûts des technologies multimédias (Mackay, 1999). On peut alors trouver des systèmes qui combinent plusieurs des facettes décrites précédemment. Par ailleurs, les utilisateurs ont souvent tendance à s'appropriier les outils en les utilisant d'une manière différente de ce que les concepteurs avaient prévus. C'est le cas, par exemples, du premier médiaspace développé au Xerox PARC au milieu des années 80. Initialement prévu pour des réunions de travail, cet outil fut principalement utilisé pour des communications informelles (Bly, Harrison, & Irwin, 1993). Il est donc parfois difficile de cataloguer un système dans une catégorie précise.



Figure 10 : Système de visioconférence (Orange)

On retrouve dans la littérature des médiaspace utilisés pour partager un espace de travail et qui supportent des communications formelles et informelles. D'une manière générale, ce sont les outils basés sur des communications audiovisuelles pour les réunions de petits groupes qui ont eu davantage de succès. On peut citer les *Hydra units* utilisées pour étudier les communications médiatisées à travers la vidéo (Buxton, 1992). Le système consistait en plusieurs petits appareils (Figure 11) équipés chacun d'une petite caméra, d'un microphone directionnel et d'un écran. Le dispositif permettait alors de simuler une situation réelle. En effet, les appareils pouvaient être disposés comme le seraient des interlocuteurs physiques autour d'une table lors d'une réunion. Ainsi la voix de la personne provenait de l'endroit où se trouvait son image.

MTV (Multiple Target Video) est un autre système développé dans le but d'améliorer la collaboration en donnant davantage d'information sur l'espace de travail du partenaire (Gaver, Sellen, Heath, &

Luff, 1993). Le système permet alors d'avoir plusieurs vues de l'espace de travail du partenaire affichées chacune sur un écran dédié (Figure 11). Ces vues permettaient d'améliorer l'interaction sociale entre les utilisateurs en leur donnant le maximum d'informations sur leur partenaire et son activité. Cependant, les auteurs ont constaté que la fragmentation de l'espace visuel en plusieurs vues rendait la collaboration difficile entre les partenaires.



Figure 11 : A gauche, le système *Hydra*, à droite le médiaspace *MTV*.

De leur côté, Ishii, Kobayashi, et Arita (1994) ont proposé le système *ClearBoard* qui permettait de contourner ce problème de fragmentation en fusionnant l'espace de travail avec l'espace interpersonnel. Le système consistait en un espace de dessin partagé constitué d'un tableau transparent qui peut être utilisé pour écrire des informations et qui permet également à deux utilisateurs de se voir et de dialoguer. Deux utilisateurs distants ont la possibilité par exemple de discuter d'un itinéraire par l'élaboration d'une carte directement sur la surface de l'écran. Les partenaires peuvent également voir directement les gestes de leur partenaire à travers l'écran transparent (des gestes de désignation par exemple). Ils peuvent ainsi comprendre leur partenaire plus facilement.

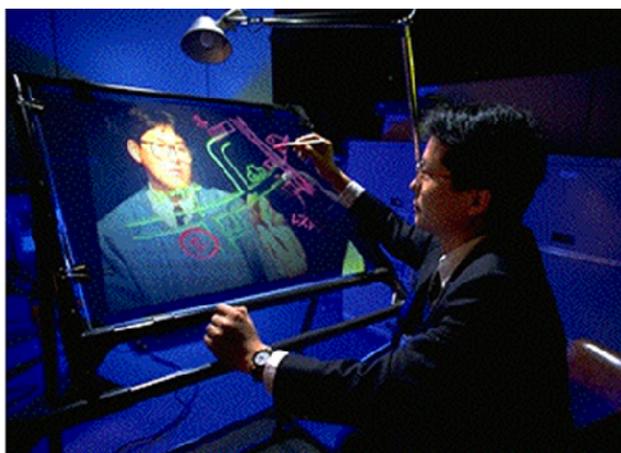


Figure 12 : Le système *Clearboard*

Ces outils audiovisuels ont été conçus dans le but d'améliorer la communication médiatisée par ordinateur. En effet, cette dernière se distingue des situations en face à face en négligeant certains aspects de la communication non verbale : les expressions du visage, le contact visuel, la direction du regard ou encore la retranscription des gestes. L'utilisation de la vidéo permet alors de faire des représentations des interlocuteurs pour simuler leur présence sur le site distant.

Cependant, l'utilisation des vidéos présente certains problèmes. En effet, elle est généralement dissociée du reste des éléments de la réunion (documents,...etc.). Ce qui implique un problème de fragmentation de l'espace visuel qui rend difficile la mise en correspondance entre les représentations visuelles des utilisateurs et l'espace de travail proprement dit (sauf en utilisant des dispositifs particuliers comme le *ClearBoard*). De plus, certains auteurs ont montré que la vidéo a des apports négligeables (par rapport à la parole) pour un bon nombre de tâche dans les situations de communication médiatisée (Whittaker, 2003). Enfin, en termes de transmission réseau, la vidéo nécessite des moyens techniques importants. Ceci peut alors restreindre la quantité d'information transmise entre les partenaires. C'est ainsi que d'autres solutions plus innovantes et moins contraignantes ont été envisagées pour pallier ces problèmes et permettre d'autres types d'interactions collaboratives.

2.4 Synthèse

Bien que les collecticiels offrent une opportunité intéressante pour le travail collaboratif synchrone à travers l'outil informatique, leur utilisation reste limitée par rapport à l'usage individuel de l'outil informatique. Ceci peut être expliqué par le fait que la problématique dans ces deux cas n'est pas la même : le traitement de l'information prévaut dans le cas d'un usage individuel, alors que c'est l'échange qui prévaut pour l'usage de ces outils dans le contexte de la communication et la collaboration. Les principaux efforts en matière de développement se font sur les collecticiels asynchrones. Le coût des développements et certaines lenteurs d'appropriation de l'industrie des innovations, en matière d'interface homme machine, tendent à limiter certaines évolutions. Les efforts de développement autour du Web et de la mobilité, les efforts de limitations des déplacements en entreprise (pour des raisons de coût, de risques, ou d'environnement) devraient permettre de faire évoluer les collecticiels synchrones.

Le manque d'intégration native de la notion de collaboration dans la plupart des outils classiques (les systèmes d'exploitation, les logiciels de bureautique,...etc.) induit des manipulations supplémentaires pour les utilisateurs et un changement dans la nature de la collaboration par rapport à des situations de collaboration réelle. Ainsi une conception centrée davantage sur les utilisateurs et sur les tâches collaboratives qu'ils doivent accomplir, en s'astreignant de l'historique des IHM des applications mono-utilisateur, devrait aboutir à des outils plus efficaces.

Une autre limite à l'utilisabilité des collecticiels classiques (médiaspaces, systèmes de visioconférence) est liée au partage de l'espace de travail. En effet, les systèmes qui permettent de partager un espace de travail sont encore rares (éditeurs partagés). Ainsi, les tâches collaboratives de co-conception ou encore de comanipulation d'objets pour des utilisateurs qui se trouvent à distance, ne sont pas supportées par ce type de systèmes (la conception en architecture en est une illustration). Dans cette optique, l'utilisation des environnements virtuels collaboratifs peut être une solution pour supporter ce type de tâches. En effet, l'utilisation des collecticiels avec un partage d'information plus important à travers un EV commun peut être un outil intéressant. L'enjeu sera alors de tirer profit de cet EV partagé pour soutenir la collaboration entre les différents acteurs.

3 Environnements virtuels collaboratifs : EVC

Les environnements virtuels collaboratifs (EVC) font appel aux technologies de la RV pour supporter les activités collaboratives et coopératives homme-homme. Les recherches sur les EV et le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur ont donc un apport considérable dans le développement de ces systèmes.

3.1 Définition

Un EVC est une application distribuée utilisant un EV qui supporte des communications homme-homme et/ou homme-machine. Ainsi à travers cet environnement partagé, plusieurs utilisateurs peuvent communiquer, interagir (entre eux ou avec les autres composants de l'EV), se toucher, travailler ensemble même s'ils sont éloignés géographiquement (Snowdon & Churchill, 1998). Les EVC se trouvent à l'intersection de plusieurs disciplines qui participent à leur développement, entre autres la RV, la psychologie cognitive, les IHM, l'ergonomie, la sociologie, le design, l'intelligence artificielle, la robotique,...etc. Contrairement à la définition de Churchill, Snowdon et Munro (2001), qui inclut les environnements basés sur le texte ou sur des graphiques 2D, l'étude est limitée ici aux EVC basés sur des représentations 3D. Un EVC permet à deux ou plusieurs utilisateurs de partager un EV. Ainsi, en plus des interactions homme-machine que peut offrir un EV classique (la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application), un EVC permet aux utilisateurs de **communiquer** et d'avoir des **interactions synchrones et collaboratives**, locales ou distribuées, souvent pour des tâches non réalisables individuellement (des tâches de comanipulation, de coplanification,... etc.). Ainsi, toutes les actions d'un utilisateur sur l'EV sont propagées vers les autres utilisateurs qui les perçoivent d'une manière quasi instantanée (modulo les délais de transfert des informations dans le cas de transmission réseau). Ces utilisateurs deviennent eux-mêmes des « parties » avec leur propre point de vue sur cet EV et éventuellement leur représentation graphique qu'on appelle avatar. Ceci permet à chaque utilisateur de voir ses partenaires et de suivre leurs actions dans l'EV. L'objectif sous-jacent à la conception des EVC est l'amélioration des interactions collaboratives à travers les outils informatiques. De part les nouvelles possibilités d'interaction que ces systèmes peuvent offrir, les recherches dans cette thématique se sont multipliées aussi bien dans les établissements académiques que dans le monde de l'industrie (Joslin, Pandzic & Magnenat Thalmann, 2003).

3.2 Classification des EVC

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour classifier les EVC. Dans ce travail, la classification espace/temps (Grudin, 1994) des collecticiels a été préférée (**tout en excluant la distribution temporelle puisque les EVC sont synchrones**). Ainsi, deux catégories d'EVC seront décrites :

3.2.1 Les EVC présentsiels

Dans ce cas, les partenaires se trouvent ensemble face aux dispositifs permettant la visualisation collective de données. Ces dispositifs permettent aux utilisateurs d'avoir la même perception de l'EV partagé. L'avantage de ce type de système est qu'ils permettent aux utilisateurs de partager le même point de vue sur l'environnement et de voir directement leurs partenaires. Ceci leur permet alors de travailler ensemble en interagissant au même moment avec le système d'un côté et avec leur partenaire de l'autre (Bourdot, Jessel, & Thouvenin, 2006). Cependant, leur utilisation pose certains problèmes liés aux dispositifs d'interaction. En effet, ces derniers sont conçus essentiellement pour des interactions mono utilisateur (Aubry, 2007). Il convient donc de les adapter pour un usage en situation multi-utilisateurs ou alors de concevoir de nouveaux dispositifs adaptés à ce type d'interactions

collaboratives. On peut donner l'exemple du système *SmartSkin* (Rekimoto, 2002) basé sur une table interactive multi-utilisateur (Figure 13). Le système permet des interactions collaboratives via la surface de la table (manipulation d'objets virtuels,...etc.).



Figure 13 : La table interactive basée sur le système *SmartSkin* permettant des interactions multi-utilisateurs

3.2.2 Les EVC à distance

C'est la catégorie d'EVC qui va nous intéresser par la suite. Dans ce cas, les utilisateurs de l'EVC se trouvent dans des sites séparés (deux pièces, deux bâtiments, deux villes,...etc.). Les systèmes sont reliés par un réseau de communication. L'avantage de l'utilisation de ce type de système est de permettre la réalisation de projets à distance. L'enjeu est d'assurer que la collaboration ne soit pas altérée par la distance. *SIMNET* (Macedonia, Zyda, Pratt, Barham, & Zeswitz, 1994 ; *US military's distributed SIMulator NETworking project*) était l'un des premiers EVC à distance. Il fut développé dans les années 80 par les militaires américains et a été utilisé pour l'entraînement et la mise en place de tactiques de combat.

3.3 Les choix pour la conception des EVC à distance

Les concepteurs d'un EVC doivent faire certains choix de conception spécifiques dépendant de plusieurs facteurs (entre autres : la nature de la tâche collaborative, les profils des utilisateurs,...etc.). Dans ce qui suit, certaines caractéristiques des EVC, sur lesquelles doivent s'effectuer ces choix, seront présentées :

3.3.1 Les réseaux de communication

Dans un EVC, lorsqu'un utilisateur effectue une action, cette information doit être transmise à tous les participants. Pour assurer la propagation des événements qui surviennent dans l'EV, les terminaux de chacun des utilisateurs sont reliés par un réseau de communication. La transmission de tous ces événements constitue un trafic réseau assez conséquent, en particulier pour des EVC impliquant un grand nombre d'utilisateurs. Il est alors question de choisir l'architecture réseau qui permet de garder la cohérence du système. Le réseau de communication est utilisé également pour la gestion des sessions des différents utilisateurs (Joslin, Pandzic, & Magnenat Thalmann, 2003). Ceci permet au système de gérer les connexions/déconnexions de nouveaux utilisateurs de l'EVC et de savoir qui est actuellement en ligne. Il existe une multitude d'architectures possibles (pair-à-pair uni-source, pair-à-pair multi-sources, client/serveur, multiserveurs,...etc.). En plus des architectures, des protocoles de

communication sont utilisés pour assurer que les différents messages soient correctement transmis à travers le réseau. Deux protocoles sont alors généralement utilisés UDP et TCP. Ces deux protocoles peuvent coexister au sein du même réseau. Gossweiler et al. (1994), présentent un état de l'art détaillé des différentes architectures et des protocoles utilisés dans les EVC. Le choix de l'architecture réseau ou encore du protocole de transmission dépendra de la quantité des informations transmises, de la localisation des différents utilisateurs ou encore du nombre total d'utilisateurs participant.

Ces choix doivent être pilotés par l'activité mise en place dans l'EVC, en particulier en ce qui concerne la nécessité pour les utilisateurs d'avoir plutôt des communications en temps réel, ou des interactions réactives rapidement à distance, ou encore de gros échanges de données,...etc.

3.3.2 Synchronisation des interactions collaboratives

En plus des différentes interactions classiques dans un EV (sélection, manipulation, navigation et contrôle de l'application), un EVC offre la possibilité d'avoir des interactions collaboratives. Les utilisateurs peuvent avoir des actions simultanées et concurrentielles sur un même objet (la sélection simultanée d'un même objet par exemple). Dans ces cas, le système doit assurer la synchronisation entre les différents participants à ces interactions et la synchronisation de leurs différentes actions. En pratique, un grand nombre de systèmes mettent en place des stratégies pour la gestion de ces problèmes de synchronisation. On trouve par exemple des systèmes utilisant des mécanismes d'exclusion mutuelle pour assurer qu'un utilisateur ait l'exclusivité d'actions sur un objet à un instant donné et interdire ainsi les actions simultanées sur ce même objet (Wideström, Axelsson, & Abelin, 2000). D'autres systèmes supportent des actions simultanées mais non concurrentielles (Ho, Basdogan, Slater, Durlach, & Srinivasan, 1998). Le choix des différentes stratégies pour la gestion des actions simultanées dépendra des tâches collaboratives que le système doit supporter mais aussi des dispositifs d'interaction (l'utilisation de dispositifs à retours d'efforts peut permettre d'avoir des actions simultanées sur un même objet).

Ces choix doivent être pilotés par l'activité mise en place dans l'EVC, en particulier en ce qui concerne le besoin pour les utilisateurs d'interagir simultanément sur un même objet ou sur une partie de ces objets, les interactions (et éventuels verrous) devant alors être conçues pour faciliter au maximum la collaboration.

3.3.3 Structuration de l'espace

La structuration de l'espace permet d'organiser les interactions entre les utilisateurs de l'EVC. Il existe plusieurs métaphores pour la structuration de l'espace. C'est ainsi le type des tâches collaboratives supportées par le système qui doit dicter le choix de la métaphore. Généralement, deux approches peuvent être utilisées.

D'abord, l'utilisation de la métaphore du monde virtuel, qui autorise la navigation en divers lieux. Dans ce cas, un grand nombre d'utilisateurs connectés peuvent participer aux différentes activités collaboratives. Ils ont alors la possibilité de se déplacer librement dans l'EV. Cette métaphore est utilisée dans les jeux en ligne massivement multi-joueurs (*World of Warcraft*, *Asheron's Call*), les métavers² (*Second Life*), ou encore des simulateurs de combats (NPSNET; Macedonia, Zyda, Pratt, Barham, & Zeswitz, (1994)). Cependant la taille grandissante de ces mondes virtuels peut entraîner

² Métavers : de l'anglais *metaverse*, terme utilisé pour décrire les monde virtuels 3D hébergeant une communauté virtuelle

des surcharges du réseau. Des stratégies sont alors employées pour diminuer le trafic du réseau (Aubry, 2007; Joslin, Pandzic, & Magnenat Thalmann, 2003).

Pour des tâches plus spécifiques, centrées sur des objets liés à l'activité, où la navigation est limitée autour de ces mêmes objets, une autre métaphore est utilisée : la métaphore de la table de réunion (Dumas, 1999). Cette métaphore est basée sur la notion de pièce caractérisée par un espace clos et associée à une seule tâche. L'objet (ou les objets) 3D, autour duquel les acteurs doivent collaborer se retrouve au centre de la scène virtuelle. Ceci permet aux utilisateurs de se focaliser sur leur tâche collaborative. C'est ce type de métaphore qui a été utilisé pour les EVC développés pour la partie expérimentale de ce travail.

Le choix de l'architecture de l'espace de travail d'un EV doit être piloté par les besoins de la tâche, et s'y limiter autant que possible.

3.3.4 Représentation des utilisateurs

Des représentations graphiques sont parfois utilisées pour incarner chaque utilisateur dans l'EV. Ces représentations ont pour objectif de permettre à chaque utilisateur de percevoir ses partenaires, leurs positions et leurs actions dans l'EV. Il existe alors différentes possibilités pour représenter les utilisateurs : vignettes 2D (fixes ou animées), des apparences primitives (cubes, cônes : Bowers, Pycock, & O'Brien, 1996; Ott & Dillenbourg, 2001), des humanoïdes non articulés (Benford, Bowers, Fahlen, Greenhalgh, Mariani, & Rodden, 1995), des humanoïdes utilisant des segments rigides (Wideström, Axelsson, & Abelin, 2000) ou encore des représentations anthropomorphes assez réalistes avec différentes possibilités d'expression faciales et de gestes (Panzic, Capin, Lee, Magnenat Thalmann, & Thalmann, 1997). Ces représentations sont appelées avatars. Une autre manière souvent utilisée pour donner des informations sur le partenaire consiste à le représenter visuellement par l'outil (ou l'objet) qu'il manipule dans l'EV. Parfois l'utilisateur est représenté par une partie de son corps (une main virtuelle par exemple). Enfin, parfois, aucune représentation des partenaires n'est utilisée. Dans ce cas, chaque utilisateur peut avoir des retours sur les activités des partenaires à travers des mécanismes qui permettent de mettre en évidence leurs actions (changement de couleur d'un objet lorsque celui-ci est manipulé par un des utilisateurs, par exemple). Une étude comparative des différents types de représentations est présentée par Burkhardt, Lourdeaux, & Lequatre (2005).

Du simple télépointeur fonctionnel au clone communicationnel, les choix doivent être pilotés par les besoins en matière de communication et de collaboration, et souvent pallier les risques techniques liés à la distance en supportant les notions de déconnection, de débits et de performances variables, de même que les "risques" humains liés au centre d'intérêt des interlocuteurs et à leur présence.

3.3.5 Communication humaine

La communication homme-homme à travers l'EVC est un facteur très important. En effet, la collaboration est basée sur la communication. Ainsi pour concevoir des EVC qui soutiennent la collaboration, le traitement des problèmes liés à la communication doit être central. Les canaux de communication dans l'EVC distant sont restreints à cause des contraintes techniques imposées par la technologie (bandes passantes limitées, instrumentation des utilisateurs difficile à mettre en place, ...etc.). Ainsi, la communication dans ce cas est souvent réduite à sa partie verbale. En effet, les composantes non verbales (les expressions faciales, les gestes ou encore la direction du regard) sont difficiles à reproduire fidèlement. En général, la plupart des systèmes supportent les communications audio ou basées sur les échanges textuels (messagerie instantanée). Les avatars sont utilisés également

pour communiquer. Ainsi, certains systèmes, permettent de communiquer à travers l'exécution de gestes prédéfinis (Carlsson & Hagsand, 1993). D'autres utilisent l'analyse vidéo pour reproduire les expressions faciales sur des avatars (Pandzic, 1998). Cependant, l'animation des avatars pose de nombreux problèmes technologiques et d'acceptabilité par les utilisateurs (capteurs encombrants,...etc. ; Burkhardt, 2007). Parfois les avatars sont animés d'une manière implicite à partir de l'interprétation de leurs actions (Dumas, 1999).

Les problèmes de la communication dans les EVC seront abordés plus en détails dans le chapitre suivant.

Encore une fois, le choix de prise en compte des informations non verbales (gestes, expressions faciales,...etc.) sera piloté par les besoins de l'activité, mais dépendra aussi beaucoup de la capacité du concepteur à intégrer ces dimensions de façon cohérente et compréhensible dans l'EV.

3.3.6 *Prise de conscience des autres utilisateurs : le sentiment de coprésence*

La communication dans les EVC est souvent liée à la notion de coprésence (présence sociale) dans l'EVC. Cette dernière est définie comme étant l'impression subjective que les utilisateurs ont d'« être ensemble » dans l'EV (Lombard & Ditton, 1997). Elle permet alors aux utilisateurs de collaborer tout en étant conscients de la présence de leurs partenaires dans l'EVC. Ainsi, la représentation des utilisateurs par des avatars peut renforcer ce sentiment de coprésence. La mise en évidence des actions des partenaires permet également d'accroître ce sentiment. Ainsi, cette notion est devenue une des problématiques principales pour la conception des EVC à distance.

Il est donc important de faire des choix précis des représentations pour renforcer ce sentiment de coprésence. Les problèmes autour de cette notion de coprésence seront présentés dans le chapitre suivant.

3.4 Exemples

Globalement, les EVC touchent les mêmes secteurs d'application que ceux des EV mono utilisateur. Cependant, ces systèmes, de part leur capacité à supporter la collaboration, offrent des possibilités d'interaction différentes et donnent ainsi aux utilisateurs l'opportunité d'avoir de nouvelles expériences dans les EV. Plutôt que de passer en revue les différents domaines d'application des EVC qui recouvrent plusieurs secteurs d'activité, seules certains exemples de plateformes conçues essentiellement pour le développement des EVC et des applications utilisant ces plateformes sont présentés ici.

3.4.1 *Les plateformes pour les EVC*

- **DIVE** : Le *Distributed Interactive Virtual Environment*, DIVE (Carlsson & Hagsand, 1993) a été développé par le SICS (*The Swedish Institute of Computer Science*). Le système est une plateforme expérimentale pour le développement d'applications de RV multi-utilisateurs. Il permet à un grand nombre d'utilisateurs et d'applications de naviguer, se rencontrer et d'interagir dans le même environnement virtuel via internet. L'ensemble des applications et des utilisateurs humains sont appelés acteurs. Chaque acteur est représenté par un avatar (Figure 14). Plusieurs dispositifs sont compatibles avec DIVE et peuvent être connectés facilement. DIVE a été utilisé comme plateforme expérimentale dans plusieurs études sur les EVC (Roberts, Wolff, Otto, & Steed, 2003; Schroeder, et al., 2001).

- **NPSNET** : *NPSNET* est l'une des premières plateformes utilisée pour les simulations d'environnements de combat (Macedonia, Zyda, Pratt, Barham, & Zeswitz, 1994). La plateforme a été développée au *Naval Postgraduate School (NPS)*. Elle a été utilisée pendant des années pour l'entraînement des militaires et l'élaboration de stratégies de combat. Elle permet à plusieurs utilisateurs de se connecter ensemble sur une même simulation. L'environnement virtuel est constitué également d'objets virtuels statiques et dynamiques qui peuvent produire des effets sonores et visuelles (des explosions par exemple).
- **SPIN-3D** : *SPIN 3D* est un modèle d'interface 3D pour le travail collaboratif synchrone (Dumas, 1999). La plateforme est basée sur la métaphore de table de réunion. L'interface est donc centrée sur l'objet de l'interaction appelé objet actif. Cet objet peut être manipulé par plusieurs utilisateurs. Chaque utilisateur, possédant son propre terminal, est identifié par une couleur et est représenté par un avatar autour de cette table. Des télépointeurs sont utilisés pour informer un utilisateur des actions de son partenaire (Figure 14).

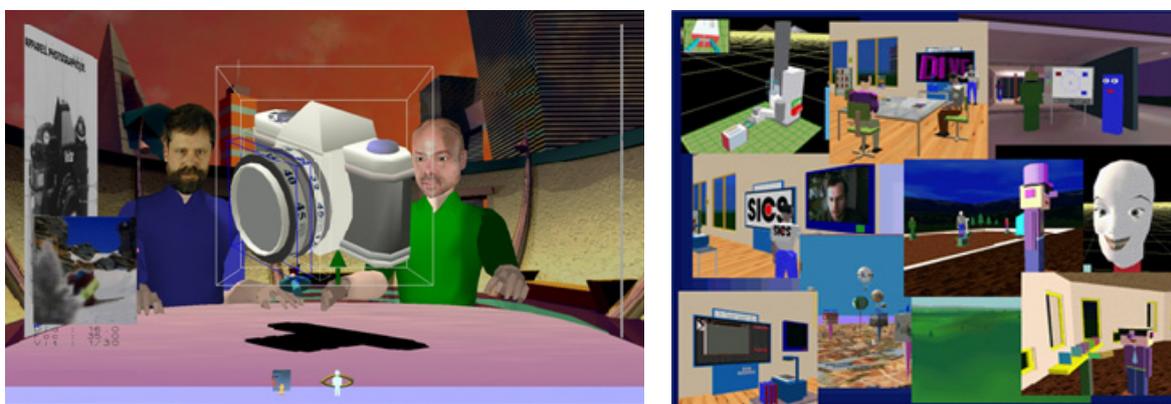


Figure 14 : A gauche, l'utilisation de la plateforme Spin 3D. A droite, l'utilisation de la plateforme DIVE

3.4.2 Quelques applications

- **PIT** : Le système *PIT (Protein Interactive Theater ; Arthur, Preston, Taylor II, Brooks Jr, Whitton, & Wright, 1998)* est une application qui permet à deux utilisateurs de travailler ensemble en étant physiquement proches (EVC présentiel). Le système, développé essentiellement pour la visualisation scientifique, permet aux utilisateurs de partager un EV contenant un modèle d'étude. Chaque utilisateur de *PIT* est doté d'un casque de vision stéréoscopique (qui traque la position de sa tête et lui permet ainsi d'avoir son propre point de vue de l'EV) et partage avec son partenaire un certain nombre de dispositifs d'interactions physiques (Figure 15). Ceci permet aux deux utilisateurs d'avoir les mêmes possibilités d'action dans l'EV. Le système permet aux utilisateurs de communiquer verbalement et à travers les gestes ce qui permet d'optimiser le travail collaboratif.

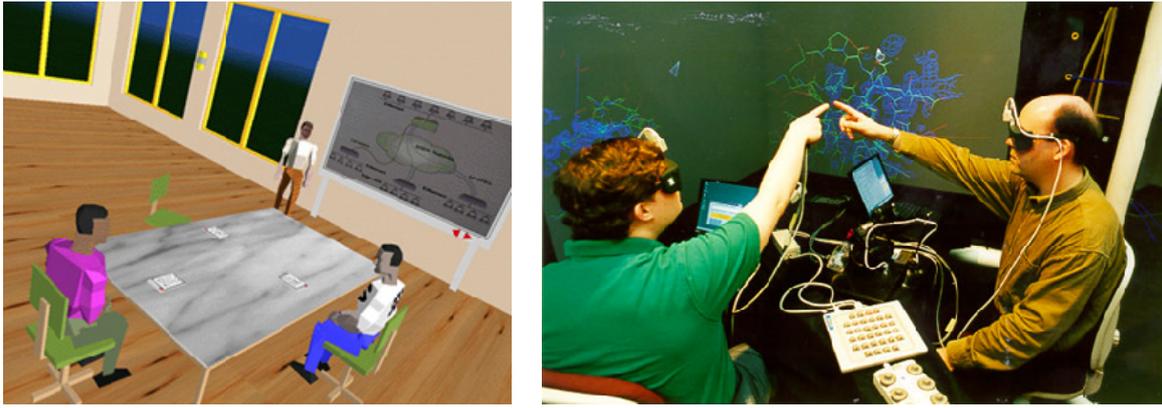


Figure 15 : à gauche l'utilisation de la plateforme *DIVE*. A droite, le Système *PIT*.

- **SIMNET** : *SIMNET* est l'un des premiers EVC à distance développé par la *DARPA* (*Defense Advanced Research Projects Agency*). Il fut développé dans les années 80 et a été utilisé pour l'entraînement de l'armée américaine. Il permet de simuler des combats en temps réel. Il permet également à plusieurs utilisateurs de collaborer pour d'élaborer des stratégies de combats.
- **Doom** : *DOOM* est un jeu vidéo développé et édité par *id Software*, et qui a eu un large succès. Le jeu est reconnu comme étant le pionnier des jeux de tir subjectifs (FPS). Il permet à plusieurs joueurs de se connecter via un réseau et de constituer des équipes qui peuvent se battre les uns contre les autres. La première version du jeu est sortie en 1993. Bien que critiqué à cause des scènes violentes, il est à l'origine de la déclinaison de ce concept en dizaines de titres, créant un genre à part entière, intrinsèquement collaboratifs depuis qu'il offre la possibilité de jouer en réseau.



Figure 16 : le monde virtuel *Second Life* (*Linden Lab*).

- **Les communautés virtuelles** : Les communautés virtuelles se sont généralisées avec la vulgarisation d'Internet. *Second Life* (Figure 16) ou encore *Active World* sont des exemples types de mondes virtuels « habités » par un très grand nombre d'utilisateurs à travers le monde. Les utilisateurs sont distants mais représentés dans le monde virtuel par des avatars. Au départ, les interactions servaient essentiellement à la communication ou à la discussion (messagerie) plutôt qu'à la production effective d'un résultat visuel. Actuellement, Les

utilisateurs peuvent participer aux différents événements sociaux qui ont lieu dans leur monde virtuel (construction du monde virtuel, regroupements, mariages, jeux,...etc.).

3.5 Problèmes liés aux EVC

Comme nous venons de le voir, les EVC ont des applications dans plusieurs domaines. Cependant leur utilisation pose encore beaucoup de problèmes. Certains de ces problèmes sont liés à l'utilisation des technologies de la RV. D'autres sont communs avec les collecticiels. Les EVC engendrent également des problèmes qui leur sont propres.

3.5.1 Du côté de la RV

Les EVC sont basés essentiellement sur les technologies de la RV. Comme exposé plus haut, l'utilisation de ces technologies pose encore des problèmes. Ces derniers sont essentiellement liés à l'interaction de l'homme avec les systèmes et au sens de présence dans les EV. Vient s'ajouter à cela l'absence d'un cadre théorique solide et les divergences des approches de chacune des communautés scientifiques qui participent à leur développement.

3.5.2 Du côté du TCAO

Certains problèmes des EVC sont déjà étudiés depuis quelques années dans la communauté du TCAO. Ces problèmes sont essentiellement liés aux expériences sociales partagées pendant le travail collaboratif et l'appauvrissement du sens de coprésence. En effet la communication médiatisée impose de nouvelles formes d'interactions où l'aspect social est souvent mis de côté. Ceci contraint l'accomplissement des tâches collaboratives et engendre des coûts encore plus importants (en temps et en argent). La richesse potentielle des EVC peut être un moyen pour mieux comprendre le travail collaboratif et les effets de la communication médiatisée sur les interactions interpersonnelles.

3.5.3 Propres aux EVC

Un premier aspect des problèmes des EVC est celui des dispositifs d'interaction. En effet, l'utilisation des EVC induit de nouvelles formes d'interactions homme-homme. Ainsi les dispositifs d'interactions existant doivent être repensés pour supporter d'autres formes d'interactions collaboratives et enrichir ainsi les expériences des utilisateurs au sein de l'EVC. La question qui se pose alors est : Comment les dispositifs peuvent supporter correctement l'activité transposée de l'utilisateur dans le monde virtuel et les besoins liés à la collaboration ?

3.6 Synthèse

Comme précisé tout au long de ce chapitre, l'objectif de ce travail de thèse est d'améliorer la conception d'EVC synchrones et à distance. L'étude du TCAO permet de faire émerger un certain nombre de problèmes lié à la collaboration à travers un système informatique. Ces problèmes définissent une première direction pour l'amélioration des systèmes collaboratifs.

D'un autre côté, les EVC offrent de nouvelles possibilités d'interactions collaboratives en permettant le partage d'un espace virtuel. L'intérêt pour cette nouvelle technologie est grandissant. Cependant, lorsqu'une technologie est encore nouvelle, il existe toujours des incertitudes sur les formes futures qu'elle va prendre ou sur les éventuelles utilisations qu'elle pourra avoir. C'est le cas actuellement pour ces systèmes. Des questions liées à la conception et l'utilisabilité de ces systèmes doivent encore être abordées. Notre objectif est d'étudier certaines interactions collaboratives que les utilisateurs peuvent avoir à travers ce type d'environnement. Deux formes d'interactions nous seront abordées :

les interactions spatiales et les interactions haptiques. Ces deux formes d'interaction sont présentes dans plusieurs tâches collaboratives (tâche de co-construction, de comanipulation,...etc.). En tentant d'améliorer ces deux formes d'interactions collaboratives dans les EVC, **l'enjeu est d'établir des lignes directrices pour une conception centrée sur la collaboration et une meilleure utilisation des technologies**. Pour ce faire, il convient d'étudier le comportement des utilisateurs dans les situations collaboratives basées sur ces formes d'interaction pour comprendre l'impact que les nouvelles technologies peuvent avoir sur la communication. Enfin, l'objectif est d'imaginer des solutions qui peuvent aider à soutenir la collaboration et enrichir les relations interpersonnelles entre les utilisateurs au sein des EVC. Ces solutions tirent parti des caractéristiques des EVC pour améliorer la communication entre les utilisateurs.

4 Conclusion

Ce chapitre était consacré à la définition de notre domaine d'étude : les EVC. Pour ce faire, les EVC sont placés dans le contexte plus large des nouvelles technologies. Le domaine de la RV et ses applications ont été alors définis. En suite, les domaines du TCAO et des collecticiels ont été abordés.

Ce tour d'horizon a permis de mettre en évidence un certain nombre de problèmes liés à l'utilisation de ces technologies. Il a également permis de converger vers les EVC et leurs applications.

L'étude des EVC a mis en évidence l'intérêt de l'utilisation de ce type de systèmes pour la collaboration. Enfin, ce chapitre est conclu par une synthèse sur les problématiques qui entourent la conception d'EV supportant la collaboration entre des utilisateurs distants.

Par la suite, l'étude de la conception des EVC sera essentiellement basée sur les interactions collaboratives. Notre choix s'est porté sur l'étude de deux formes d'interactions présentes dans plusieurs tâches collaboratives. Avant de s'intéresser en détails à ces deux formes d'interactions, il est essentiel d'aborder dans des concepts plus fondamentaux sur lesquels reposent les EVC : la collaboration, la communication et la coprésence. Ces concepts sont traités dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : Collaboration et référentiel commun



Chapitre 2 : Collaboration et référentiel commun

Après avoir défini le champ d'action de notre travail de thèse basé essentiellement sur le domaine des EVC, la littérature fondatrice, sur laquelle repose la notion de collaboration est abordée dans ce chapitre. Comprendre les concepts de base de cette notion est une étape nécessaire pour concevoir des EVC favorisant le travail de groupe.

1 La collaboration

Le travail humain prend le plus souvent une forme partagée, dans laquelle deux ou plusieurs personnes travaillent ensemble autour d'une tâche. C'est ce qu'on appelle une situation collective. Cette dernière regroupe au moins deux acteurs autour d'un projet partagé. Elle peut avoir plusieurs formes. On parle alors de situation collaborative ou de situation coopérative. Ces deux formes sont parfois confondues. Dans la vie de tous les jours, plusieurs types de situation sont considérées comme collectives (collaboratives ou coopératives). Mais il est difficile de donner une définition précise et qui engloberait toutes ces situations. De plus, la collaboration est étudiée dans plusieurs disciplines scientifiques, chacune ayant des préoccupations, une culture et un vocabulaire différent. Trouver une définition universelle est donc une tâche assez ardue. Ainsi, en se basant sur les différentes définitions rencontrées dans la littérature, aussi bien pour la coopération que pour la collaboration, une synthèse est faite pour proposer une définition de la collaboration. Cette définition a pour but de délimiter le cadre de travail et de rendre plus claires les situations étudiées pendant ces travaux de recherche.

1.1 Collaboration ou coopération ?

Différentes définitions de la coopération et la collaboration, qui affinent leur sens respectifs au fur et à mesure, sont abordées dans ce qui suit.

Dans le dictionnaire (Le Robert, 2005), et en dehors de tout contexte, les définitions respectives de la collaboration et de la coopération ne se démarquent pas réellement l'une de l'autre, aussi bien en français qu'en anglais. Il s'agit dans tous les cas, à la fois de l'action de **travailler à plusieurs sur une tâche donnée** et **du résultat** de cette action. Les termes de coopération et de collaboration sont donnés comme des synonymes. De même, dans notre langage de tous les jours, ces deux mots sont souvent utilisés d'une façon interchangeable.

1.1.1 Dans le domaine du Dialogue Homme Machine

Dans le domaine de la linguistique et du dialogue homme machine, **une distinction est faite entre les deux termes**. Ainsi, Allwood, Traum et Jokinen (2000) divisent la coopération en deux dimensions : la **coordination**, définie comme étant la prise en considération cognitive du partenaire et la **collaboration** qui nécessite en plus d'avoir un but commun. De leur point de vue, la collaboration nécessite moins d'exigences dans la relation mutuelle entre les agents qui travaillent ensemble. Ces agents peuvent collaborer sans avoir une confiance réciproque entre eux (Le terme « collaborateurs » est utilisé par un patron, par exemple pour désigner ses contacts professionnelles). La **coopération**, d'un autre côté, nécessite un engagement éthique, une confiance mutuelle et une *égalité sociale* entre les partenaires. Allwood et al. (2000) définissent ainsi quatre critères pour une *coopération idéale* qui sont :

- la prise en considération cognitive entre les agents,
- le partage d'un but commun,
- la prise en considération éthique entre les agents,
- la confiance mutuelle.

La coopération se démarque selon eux de la collaboration et de la coordination par un **plus grand engagement** des agents et par une plus grande confiance mutuelles entre eux.

1.1.2 Dans le domaine de l'Intelligence artificielle

Ce point de vue est partagé par une certaine partie de la communauté d'Intelligence Artificielle. Ainsi, Cohen et Levesque (1991) ont introduit de la notion de travail d'équipe (*Teamwork*) basée sur l'existence et le maintien d'un objectif commun entre un groupe d'agents. Ainsi le travail d'équipe est l'ensemble des actions communes effectuées par le groupe, et le partage de l'intention de faire ces actions ensemble. Selon eux, le terme **collaboration** est suffisant pour décrire les interactions dans les **dialogues axés sur la tâche**. Mais il est nécessaire d'avoir une notion « plus forte » pour inclure les **notions d'engagement éthique** et la **confiance** entre les agents qui travaillent ensemble (sans avoir utilisé le terme coopération).

De son côté, Horacek (2000) a un point de vue différent. En effet, pour lui, la **collaboration** est une façon plus élaborée de travailler ensemble. Elle est basée sur des **interactions dynamiques** (ou créatives) en opposition à la **coopération** basée sur des **interactions statiques** (ou réactives). Alors que la coopération est définie comme un pré-requis pour le succès de la communication (basée sur la sincérité et la construction de croyances partagées), la collaboration nécessite plus d'initiatives et davantage d'interactions entre les agents. Elle inclut les principes de la coopération et aide à résoudre les conflits et à faire des compromis entre les agents impliqués dans des actions communes.

Selon Panitz (1997), la collaboration est davantage une philosophie d'interaction. Il met en évidence la finalité de chacune des situations : dans une situation de **coopération**, l'intérêt est davantage porté sur les **résultats ou le produit final**. Elle implique ainsi une interaction plus structurée, où la contribution de chaque participant est bien délimitée par rapport à celles des autres, alors que dans une situation de **collaboration**, le plus important est le **travail commun**. Elle implique davantage d'acceptation des contributions des autres et donc des interactions moins structurées et un partage égalitaire de l'autorité. Il est difficile alors de faire la distinction entre les apports de chaque participant.

Ceci se rapproche de la théorie de l'activité, où la différence entre les deux termes réside dans la manière dont le travail va être partagé entre les agents. On parle alors de la notion de division du travail. En **coopération**, les partenaires **partagent le travail en sous tâches individuelles** et rassemblent les résultats partiels pour construire un « tout ». En collaboration, les partenaires **effectuent le même travail ensemble** impliquant un engagement mutuel de tous les participants (Lehtinen, Hakkarainen, Lipponen, Rahikainen, & Muukkonen, 2001). Cependant, il faut faire une distinction entre la division du travail sur un plan horizontal et vertical (Dillenbourg, 1999) : en **collaboration**, les rôles de chaque participant peuvent **changer à tout moment** (un qui supervise l'autre). Les individus « *se subsument progressivement en un groupe qui devient une entité à part entière* » (Bénech, 2005). Alors que dans une situation de **coopération** les rôles de chaque participant sont plus explicites. Ceci implique une **division négociée d'une tâche en sous tâches** (Bénech, 2005).

1.1.3 Dans le domaine de la psychologie cognitive

En psychologie cognitive, Rogalski (1994) et Hoc (2003) considèrent que les agents, bien que travaillant dans un même espace temporel et physique en partageant les mêmes ressources, **ne se fixent pas nécessairement les mêmes buts**, que ce soit à court ou à long terme. Selon eux, il est avant tout important de situer la collaboration et la coopération dans un domaine plus global qu'est l'**activité collective** introduite par Savoyant (1984). Cette activité globale est elle-même divisée en deux dimensions de coordination (distribution des tâches entre les agents). Les activités collectives peuvent ainsi se présenter soit de manière verticale ou horizontale. La dimension verticale (hiérarchie) indique la délégation des tâches par un agent (le prescripteur) vers d'autres agents (des exécutants) : on parle alors de médiatisation. La dimension horizontale quant à elle, est caractérisée par l'absence de

prescripteur et de ce fait, l'absence de hiérarchie entre les agents et les tâches à accomplir. Rogalski (1994) reprend la définition structurelle de Savoyant (1984) de la coopération. L'activité collective est constituée dans ce cas, de trois composantes :

- **la collaboration** caractérisée par la présence d'une **tâche commune** qui est le centre d'intérêt des partenaires qui partagent inévitablement **un but commun**,
- **la coopération** où les partenaires travaillent d'une **manière distribuée** pour atteindre des **objectifs individuels différents**, mais qui partagent **un même but final**, ce dernier est moins central,
- **la co-action**, qui est caractérisée par **l'absence de tâche commune** qui est remplacée par des tâches interférentes.

De son côté, Hoc (2003) insiste sur le fait que proposer une définition de la coopération ne se résume pas à la combinaison des nombreuses définitions issues de différentes disciplines mais doit dépendre de son domaine d'application et du contexte expérimental. Hoc (2003) fait la distinction entre deux catégories d'activités collectives :

- La première décrit les agents comme travaillant indépendamment les uns des autres puisque les relations entre les actions individuelles des agents sont établies avant leur exécution mais ces relations sont définies par les agents rapprochant ainsi cette idée de la dimension verticale de l'activité collective.
- La seconde catégorie est celle qui se rapproche le plus de la notion de collaboration décrite par Dillenbourg (1999, Hoc (2003) utilise lui le terme coopération) puisque les **relations entre les activités individuelles** (qui ne sont pas indépendantes) **sont gérées durant l'exécution** en temps réel. Il parle alors de la notion de **gestion des interférences**. Ces interférences sont générées par la poursuite de buts individuels par chacun des opérateurs. Une action de l'un des opérateurs peut devenir pertinente pour la poursuite d'un but individuel d'un autre opérateur. La gestion des interférences par un opérateur a alors pour but de faciliter les activités de ses coéquipiers et/ou de la tâche commune (si celle-ci existe).

1.1.4 Dans le domaine du TCAO

Dans le domaine de la TCAO, l'approche est plutôt centrée sur la technologie utilisée. En effet, l'accent est mis sur l'architecture du système et la dimension temporelle des interactions et de la synchronisation des communications entre les partenaires. La coopération est souvent associée à une communication asynchrone alors que la collaboration implique une communication synchrone (travailler ensemble). On parle alors de **collaboration synchrone** qui recouvre la notion **d'une tâche effectuée par plusieurs utilisateurs en même temps** : des problèmes de synchronisation et de gestion de concurrence se posent alors. Cela inclut par exemple des réunions ponctuelles d'utilisateurs pour une vidéoconférence ou une discussion. Chaque action d'un participant peut avoir des incidences sur les actions des autres participants. On parle également de **collaboration asynchrone** qui permet à un groupe de personnes souvent à distance, de **travailler sur un projet commun, quand ils sont disponibles**. L'état du projet doit être, dans ce cas, conservé en permanence, (généralement dans une base de données connectées au réseau) pour permettre aux différents participants de suivre les changements apportés par leur partenaires. Un système asynchrone pur est aussi nommé coopératif (pas de concurrence), (Leigh, Johnson, Defanti, & Brown, 1999).

Salber (1995) fait aussi la distinction entre système synchrone et système asynchrone en se basant sur la classification espace-temps d'Ellis, Gibbs et Rein (1991). Par ailleurs il décrit d'une manière plus globale les systèmes multiutilisateurs qui incluent ces deux types de systèmes collaboratifs. Sa définition est basée sur le modèle en Trèfle (Figure 17). Ainsi, un système multiutilisateur est divisé en trois composantes :

- **Espace de Communication** : Les échanges d'information entre les partenaires. Ces échanges incluent aussi bien les formes explicites de la communication que les formes implicites.
- **Espace de coordination** : c'est la vue dynamique du système qui permet de définir les tâches à effectuer et le rôle de chaque participant.
- **Espace de production** : qui permet de manipuler les artefacts c'est-à-dire les entités manipulées (aussi bien physiques que numériques) permettant aux participants d'interagir entre eux et avec le système.

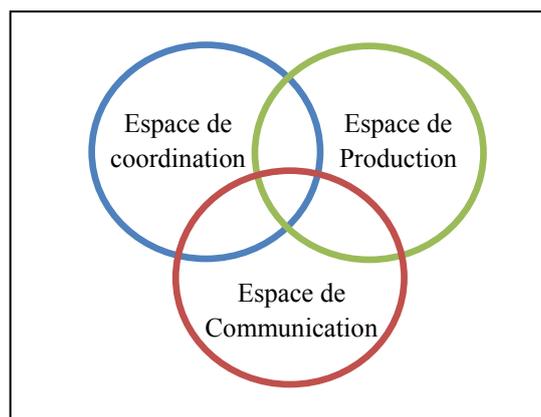


Figure 17 : Le modèle en trèfle des systèmes (d'après Salber, 1995)

Ce modèle qui caractérise les collecticiels est donc une décomposition en plusieurs fonctionnalités. Cette décomposition fonctionnelle est principalement imposée par les contraintes technologiques liées à la conception des collecticiels. Cependant, dans le monde réel, cette décomposition d'une activité collaborative n'est pas aussi évidente. Par exemple, les artefacts manipulés dans l'espace de production peuvent eux même devenir des outils de communication (ce point de vue sera exposé plus

en détails par la suite). Ainsi, cette décomposition n'est pas forcément pertinente pour décrire une activité collaborative.

Dillenbourg (1999) explique que la « **synchronicité** » devient davantage une contrainte technique qu'une règle sociale. Il définit alors une situation de la collaboration comme une situation dans laquelle il existe une symétrie dans les interactions entre les partenaires (symétrie d'action, de connaissance et de compétence), qui ont un but commun et qui travaillent ensemble. Elle implique une interactivité entre les participants, une communication synchrone et de la négociation. Elle n'entraîne pas une division de travail. Cependant plusieurs situations considérées comme collaboratives ne sont pas complètement compatibles avec cette définition. En effet, parfois, l'intérêt même du travail collaboratif est d'avoir des acteurs de compétences et de connaissances différentes mais complémentaires pour résoudre un problème. On peut donner l'exemple de la coopération confrontative (le contrôle mutuel et l'intégration de différent point de vue) qui vise à augmenter la fiabilité (Loiselet & Hoc, 2001).

Roschelle et Teasley (1995) mettent l'accent sur une forme de méta activité (qu'on appellera par la suite élaboration d'un référentiel commun) qui accompagne la collaboration. Ils définissent ainsi la collaboration comme : « **une activité synchrone et coordonnée qui est le résultat de la construction et du maintien d'une conception partagée d'un problème** ».

Dillenbourg (1999) et Roschelle et Teasley (1995) s'accordent à faire la distinction entre la collaboration et la coopération par rapport à la coordination. En effet, selon ces auteurs, la collaboration implique la **coordination des efforts des participants** vers un objectif commun. Alors que la **coordination n'est nécessaire** dans la coopération **que pour rassembler les résultats partiels de la tâche distribuée**.

1.1.5 Synthèse

Le tableau 1 résume certains points de vue sur les différences et similitudes entre collaboration et coopération présentées dans notre revue de littérature. Ce tableau a pour objectif de mettre en évidence les traits les plus importants qui caractérisent les différentes définitions.

	Coopération	Collaboration	
Allwood et al. (2000) Cohen et Lévesque (1991)	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite en plus un engagement éthique et une confiance mutuelle 	<ul style="list-style-type: none"> Un but commun+une prise en considération du partenaire 	
Horacek (2000)	<ul style="list-style-type: none"> Interactions statiques 	<ul style="list-style-type: none"> Interactions dynamiques Nécessite davantage d'initiatives de la part des agents 	
Panitz (1997)	<ul style="list-style-type: none"> L'intérêt est porté sur le résultat final Les contributions de chaque participant sont délimitées 	<ul style="list-style-type: none"> L'intérêt est porté sur le travail commun Acceptation des contributions des autres Partage des responsabilités 	
Hoc (2003)	<ul style="list-style-type: none"> Les relations entre les actions individuelles des agents sont établies avant leur exécution 	<p>Coopération :</p> <ul style="list-style-type: none"> Relations entre les activités individuelles gérées durant l'exécution Buts individuels + Gestion des interférences 	
Rogalsky (1994)	<p>Coaction :</p> <ul style="list-style-type: none"> Pas de but commun Différentes tâches 	<p>Coopération</p> <ul style="list-style-type: none"> Un but commun + Des objectifs individuels centraux Différentes tâches 	<p>Collaboration</p> <ul style="list-style-type: none"> Un but commun central Une même tâche
Dillenbourg (1999) (Roschelle & Teasley (1995)	<ul style="list-style-type: none"> Les rôles des participants sont différents Division du travail en sous tâches différentes La synchronisation n'est nécessaire que pendant l'assemblage des résultats individuels 	<ul style="list-style-type: none"> Les rôles des participants sont interchangeable Les participants travaillent sur la même tâche Activité synchrone 	
Salber (1995)	Activité asynchrone	Activité synchrone	
	Plus globalement : un système multi utilisateur avec trois espaces (production, communication et coordination)		

Tableau 2 : récapitulatif des différentes approches pour définir la collaboration et la coopération

Ce débat est d'autant plus intéressant qu'il permet d'extraire des attributs qui pourront servir à caractériser le travail collaboratif. Ces deux attributs sont : la division du travail et les dimensions espace/temps des interactions.

Dans la section suivante nous tentons de mettre en évidence les traits qui peuvent permettre de caractériser le travail collaboratif sans pour autant faire une distinction entre collaboration et coopération. A la fin de cette section, une définition de la collaboration qui caractérise au mieux notre vision des EVC sera proposée.

1.2 Caractéristiques du travail collaboratif dans les EVC : les modes de collaboration

La classification proposée est basée sur les attributs identifiés par la revue de littérature présentée précédemment. De plus, nous avons jugé important d'inclure le nombre d'acteurs impliqués dans la situation de travail collaboratif comme critère supplémentaire de cette classification. En effet, plusieurs auteurs (Grudin, 1994; Johnson, 1995; Schroeder, 2002), font la distinction entre des situations collaboratives impliquant un petit groupe de participants (de deux à quatre participants) et celles impliquant un nombre d'acteurs plus important.

Trois attributs peuvent servir à caractériser le travail collaboratif :

- la division du travail,
- la dimension espace temps des interactions,
- le nombre d'acteurs.

1.2.1 La division du travail

Lorsqu'on discute de la collaboration sous l'angle de la division du travail, on distingue deux formes :

- **Collective** : Chaque participant prend en charge une partie de la tâche commune à effectuer, mais les partenaires travaillent « ensemble » (c'est-à-dire qu'ils partagent la même tâche). Il existe alors une symétrie dans les actions et les rôles des participants. On peut donner l'exemple de deux partenaires qui collaborent pour déplacer un carton lourd pendant un déménagement. Les tâches de chacun des opérateurs dans ce cas sont interdépendantes et les rôles interchangeables (Dillenbourg, 1999). En effet, L'allocation des tâches dans ce cas est dynamique (gérée en temps réel selon le contexte instantané). Ceci peut être expliqué par le fait que le travail collaboratif est dynamique et se décompose en trois niveaux (Bardram, 1998) : Co-construction, Co-operation et Co-ordination (Figure 18).

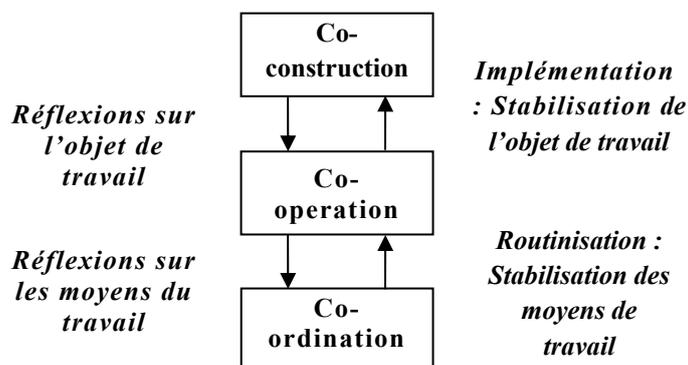


Figure 18 : La dynamique du travail coopérative selon (Bardram, 1998)

Dans ce cas, Une activité ne peut pas exister uniquement sur un seul niveau. Ce qui implique un changement permanent des rôles des participants tout au long de l'activité collaborative. Il est alors difficile de distinguer l'apport de chaque participant dans le résultat final. Cette forme de collaboration nécessite une conscience permanente (i) de la coprésence des partenaires pendant l'exécution de la tâche commune et (ii) de leurs activités courantes (la notion de coprésence sera abordée à la fin de ce chapitre).

- **Distribuée** : Les partenaires dans ce cas, sont semi-autonomes (Schmidt, 1990). Ils se répartissent alors les tâches et travaillent séparément. Les sous-tâches sont alors indépendantes les unes des autres. On peut encore distinguer à la fin l'apport de chacun des participants dans le résultat final. De plus, l'allocation des tâches dans ce cas est souvent statique (préalable à l'action). Pendant l'exécution des tâches, les participants ne sont pas forcément conscients de l'existence de leurs partenaires ni informés de leurs activités courantes (Schmidt, 1990).

Cependant, la division du travail dépend aussi du niveau de granularité. En effet, il est toujours possible de trouver une division du travail entre les partenaires dans un niveau de granularité plus haut. Si on reprend l'exemple de déménagement dans lequel deux partenaires collaborent, on peut imaginer le cas où les deux partenaires se partagent les tâches en déplaçant chacun les cartons qui vont dans une pièce particulière. Dans ce cas, on considère que les tâches de déplacement des cartons sont indépendantes. On parle alors de collaboration distribuée. On peut aussi considérer l'activité collaborative à un niveau superordonné comme étant le « déménagement ». Dans ce cas, les opérateurs travaillent ensemble pour accomplir cette tâche.

1.2.2 Classification temps/espace

Ellis, Gibbs, & Rein (1991) ont introduit en premier la matrice espace temps (2x2), elle est composée d'une dimension temporelle (les moments où les actions sont effectuées par les opérateurs) et d'une dimension spatiale (l'endroit dans lequel les actions sont effectuées par les opérateurs) vues dans le chapitre 1 et qui sont discutées ici plus en détails :

Distribution spatiale des collaborateurs

Elle dépend de la localisation de chacun des participants durant l'activité collaborative. On peut distinguer deux formes possibles :

- **Co localisée** : Les membres du groupe se trouvent dans le même lieu, c'est à dire dans la même salle. Ils sont dans une situation habituellement dénommée "présentielle". Dans ce cas les partenaires peuvent interagir librement (Schmidt, 1990).
- **A distance (ou distribuée)** : Les membres du groupe sont distribués dans des lieux éloignés, qu'ils soient situés dans les étages d'un même bâtiment, à l'intérieur d'un même pays ou disséminés à travers des continents.

Cette distribution spatiale n'est pas toujours aussi claire. En effet, il est possible parfois de trouver des situations qui combinent une collaboration co-localisée avec une collaboration à distance (les médiaspace par exemple). De plus, il semble plus intéressant de lier cette distribution spatiale à la notion de visibilité. En effet, une situation dans laquelle deux opérateurs ne se voient pas, même s'ils sont dans la même pièce, est comparable à une situation à distance.

Distribution temporelle des collaborateurs

Elle ne repose pas seulement sur les activités du groupe mais aussi sur les techniques de transmissions des données (transmission synchrone ou asynchrone). Elle permet de distinguer deux formes de collaboration :

- **Moments identiques** : Les activités du groupe s'effectuent en temps réel, en direct. Toute action d'un membre du groupe est immédiatement retransmise aux autres membres. Il s'agit alors d'une **collaboration synchrone**.
- **Moments différents** : Les membres du groupe agissent en temps différé. Les actions sont espacées sur l'échelle du temps et un membre du groupe observe la somme des interventions qui se sont effectuées avant son arrivée. Il est nécessaire alors de conserver l'état du système à tout moment. Des notifications sont envoyées aux utilisateurs afin de mettre en valeur les modifications effectuées entre deux visites d'un même utilisateur. On prévoit aussi dans ce cas des systèmes indiquant qui est actuellement connecté. On parle alors de **collaboration asynchrone**.

Mais cette distribution temporelle n'est pas toujours aussi claire et peut paraître parfois artificielle (Sire & Chatty, 1998). En effet, on peut, par exemple, avoir un système qui gère d'une part, les informations sur des utilisateurs déconnectés et qui envoie des détails de leurs activités passées aux utilisateurs actuellement connectés (situation asynchrone) et d'autre part la communication entre ces utilisateurs actuellement en ligne (situation synchrone).

1.2.3 ***Classification selon le nombre d'acteurs***

Une distinction est faite entre les activités collaboratives impliquant un grand nombre d'acteurs (*large group*) et ceux impliquant un nombre limité d'acteurs (*small group*). En effet, selon Hare (1962), les interactions au sein d'un groupe sont influencées par sa taille. Cette influence concerne notamment la performance du groupe, les prises de décision et la communication. Des études sur la communication (Stasser & Taylor, 1991) montrent que l'augmentation de la taille du groupe diminue le temps de parole donné à chacun. Ceci rend la communication moins interactive et peut ainsi affecter l'entente qui s'instaure entre les membres du groupe. Shaw (1976) explique que l'augmentation de la taille du groupe favorise l'apparition du leadership et des conflits, et rend la cohésion plus difficile entre les membres du groupe. Ceci influence inévitablement les interactions entre les membres du groupe. D'un autre côté, l'étude de Fay, Garod et Carletta (2000) montre que les petits groupes tendent à être plus dynamiques que les grands groupes. Ainsi, ce critère a été pris en compte comme attribut pour définir deux formes de collaboration possibles :

- **Collaboration dans un petit groupe** : Elle concerne un petit groupe de participants (deux à quatre participants) impliqués ensemble dans des tâches à court terme.
- **Collaborations dans un grand groupe** : le nombre d'acteurs de la collaboration dans ce cas est démultiplié. On parle alors d'environnements « ouverts ». Ce type de collaboration implique des milliers (voir des millions) de participants. Elle inclut par exemple les réseaux sociaux sur le web.

Cette distribution implique des différences en ce qui concerne les architectures des systèmes mais aussi le type d'interactions. Par ailleurs, il est parfois possible d'avoir une combinaison des deux types de collaboration (collaboration d'un grand groupe de participants avec un autre grand groupe de participants).

1.3 Synthèse

Cette classification peut aider à couvrir un certain nombre de situations collaboratives, mais ne permet probablement pas de donner une définition exacte de la collaboration. En effet, beaucoup de situations restent difficiles à caractériser et peuvent se trouver à l'intersection de plusieurs catégories. Cependant, cette classification est utile pour délimiter les situations que étudiées durant ces travaux de recherche sur les EVC. Ainsi, les études seront limitées à des activités collaboratives de type synchrone. De plus, nous nous sommes focalisés sur des situations de collaboration à distance. Par ailleurs, bien que les partenaires soient à distance, on suppose qu'ils partagent le même environnement (virtuel). Enfin, nous avons choisi de nous intéresser à des situations impliquant un petit groupe de partenaires (des binômes) dont l'activité est finalisée par une tâche particulière. Ces choix seront justifiés par la suite. Ceci nous permettra alors de définir un cadre de travail et de mettre en évidence les questions de recherche auxquelles notre travail tente de répondre. Le tableau suivant récapitule les différents éléments qui peuvent permettre de caractériser une situation collaborative :

Eléments Caractérisant une situation collaborative	Formes de collaboration	
Division du travail	Collective	distribuée
Distribution temporelle des participants	Synchrone	Asynchrone
Distribution spatiale des participants	Co localisée	A distance
Nombre de participants	Grand groupe	Petit groupe

Tableau 3 : Caractéristiques du travail collaboratif

1.4 Définition proposée

La collaboration consiste en un travail commun et synchrone dans lequel des partenaires partagent les moyens et les problèmes pour atteindre un même but : accomplir une tâche commune (mais ils peuvent avoir également des buts personnels). Ils ont des activités synchrones et une réflexion commune qui permet de résoudre le problème. A la fin il peut être difficile de distinguer l'apport de chacun des partenaires dans la solution finale.

La collaboration implique plus d'interactions entre les participants. Ces interactions influencent constamment le déroulement du processus, ce qui cause un changement des rôles des participants.

Dans nos cas d'étude, il existe une symétrie dans les interactions entre les partenaires. C'est-à-dire qu'ils ont les mêmes statuts et les mêmes possibilités. Ainsi, les rôles ne sont plus définis à l'avance et sont souvent interchangeables. Les participants doivent adapter leurs activités en fonction de ces interactions et en s'adaptant aux actions de leurs partenaires. **Pour éviter toute confusion terminologique, cette définition, sera à partir de maintenant notre seule référence pour parler de la collaboration.**

Pour arriver à concevoir des environnements virtuels propices à la collaboration, il est nécessaire de pouvoir décrire cette notion complexe en fonction des processus actifs qui la caractérisent. En effet, comme décrit dans notre définition précédente, la collaboration est dynamique et dépend de plusieurs critères :

- la tâche partagée (et les sous tâches),
- les acteurs, le type d'interactions qui peuvent survenir entre ces acteurs,
- le temps.

Pour collaborer en fonction de ces propriétés, les opérateurs doivent construire et maintenir une représentation commune de leur environnement. C'est ce qu'on appelle **l'élaboration de leur Référentiel Commun**. Ce processus actif engendre la définition de différentes stratégies d'action entre les partenaires (incluant la division du travail) pour atteindre leur but final (accomplir la tâche commune). Comprendre comment ce processus dynamique fonctionne, peut aider à mieux nous se rendre compte de la façon dont les opérateurs travaillent ensemble. Cette étape sera un pas de plus pour concevoir des systèmes interactifs qui permettent de soutenir la collaboration homme-homme. En effet, selon Giboin (1994), des systèmes conçus à partir de modèles appropriés de construction de référentiels communs seront mieux acceptés par les opérateurs. La section suivante va permettre de définir ce que c'est qu'un référentiel commun et son rôle dans la collaboration.

2 Le référentiel commun

2.1 Représentations mentales

Pour pouvoir agir dans une situation donnée, un opérateur doit construire une image mentale de cette situation. Cette image mentale est une représentation temporaire construite à partir de l'extraction continue des informations provenant de l'environnement et l'intégration de ces informations avec ses connaissances antérieures (ces dernières incluent ses connaissances, ses compréhensions et ses suppositions, toutes stockées dans sa mémoire à long terme). L'opérateur utilise cette représentation pour guider ses activités et prédire les événements futurs (Dominguez, 1994). Ce processus est connu en psychologie sous le nom de conscience de la situation (CS, *Situation Awareness*). La CS (et la représentation mentale qui en résulte) est dynamique : elle est modifiée et mise à jour en permanence (Salas, Prince, Baker, & Shrestha, 1995). Elle permet à l'opérateur d'interagir avec son environnement. Elle implique d'être conscient de ce qui se passe autour de l'opérateur pour lui permettre de comprendre comment les informations, les événements et ses actions auront un impact sur ses buts et objectifs, aussi bien dans l'immédiat que dans le futur proche.

De la même manière, dans une situation de collaboration, chaque participant construit sa propre représentation de la situation. Mais celle-ci n'est pas suffisante dans ce cas. En effet, la représentation de chaque opérateur est individuelle. Elle peut donc être différente voir contradictoire avec celles des autres participants. Ce qui peut gêner le déroulement de l'activité collaborative. Ainsi pour collaborer, les partenaires devront construire ensemble une représentation commune de la situation qui est plus complexe que la simple intersection de l'ensemble de leurs représentations individuelles. La construction de cette représentation commune nécessite des activités additionnelles telles que la coordination et les échanges d'information (Salas, Prince, Baker, & Shrestha, 1995). Hoc (2003) utilise la notion de Référentiel Commun (RC) pour décrire cette représentation commune.

2.2 Définition du référentiel commun

Cette notion a été initialement introduite par De Terssac et Chabaud (1990) dans leurs travaux sur la fiabilité, ils parlent alors du référentiel opératif commun défini comme étant :

« La mise en commun des compétences pour préparer et réaliser une action ; cette mise en commun des compétences, en même temps qu'elle complète la représentation que chacun se fait de la tâche à réaliser, constitue un référentiel commun permettant d'ajuster les décisions de chacun en fonction des connaissances de l'autre ».

Selon Leplat (1991) cité par Loiselet et Hoc (2001) le RC est une *«représentation fonctionnelle commune aux opérateurs, qui oriente et contrôle l'activité que ceux-ci exécutent collectivement»*. On parle alors de représentations communes qui concernent l'environnement et/ou l'activité de l'équipe. Elles peuvent être identiques ou différentes mais dans ce cas compatibles, c'est-à-dire non contradictoires (Giboin, 2004). Leplat (1991) souligne à cet égard : *« chacun comprend ce que l'autre fait mais se le représente différemment »*. Les agents construisent et maintiennent leur RC qui facilite leurs communications et leur coopération. Ainsi, ces représentations communes sont mises à jour continuellement pendant l'activité collaborative.

2.3 Autres définitions

D'autres notions assez proches du concept du RC ont été définies dans la littérature. Quelques une de ces notions sont présentées dans ce qui suit :

Dillenbourg (1999) met l'accent donc sur le processus qui permet de construire la représentation commune. Il parle alors de la notion de **modélisation mutuelle** (*mutual modeling*) qu'il définit comme étant l'effort produit par chaque participant pour se construire une représentation des : connaissances, des buts, des stratégies, des compréhensions de la situation, des croyances et des plans de son partenaire.

Roschelle and Teasley (1995) ont défini, de leur côté, **l'espace commun d'un problème** (*joint problem space*) qu'ils décrivent comme étant (traduction personnelle) : « *Une structure de connaissance partagée qui supporte l'activité de résolution de problème en intégrant les buts, la description de la structure courante du problème, la conscience des actions disponibles pour résoudre le problème et une association qui relie les buts, les caractéristiques de l'état actuel du problème et les actions disponibles* ». Cette définition met en évidence les composants de cette représentation commune ainsi que les relations qui les relient.

Nova (2005) définit la construction d'une conception partagée de la situation par l'apport de nouvelles informations à la représentation commune du problème ; la conscience de chacun des participants de la possibilité de divergences d'opinions ou de représentations, et la possibilité de venir à bout de ces divergences. Ainsi pour cet auteur les participants à l'activité collaborative doivent produire des **efforts pour maintenir une compréhension partagée de la situation** en prenant en compte les attentes et les considérations de chacun.

Dans leurs recherches dans le domaine de l'aviation, Salas et al. (1995) parlent du concept de **conscience mutuelle de la situation** (*team situation awareness*) qui permet d'étendre la CS individuelle à des situations de travail en équipe. Ils définissent alors cette notion comme étant « *la compréhension partagée entre les membres d'une équipe d'une situation à un instant donné. Elle est facilitée par les comportements des membres de l'équipe pour assurer son développement et son maintien* ».

Dans le domaine de communication, Clark et Brennan (1991) parlent de **Terrain Commun** (*common ground*) qu'ils définissent comme étant (traduction personnelle) : « *la somme des informations (compréhensions, des connaissances, des croyances et des suppositions...) partagées entre des participants d'une activité collaborative* ». Ces informations partagées portent sur les objets, les événements, les états ou les processus. Pour que ce processus soit efficace il est nécessaire de mettre à jour fréquemment ces informations. Ainsi le « *grounding* » est le processus actif de communication qui permet d'élaborer et de maintenir le contexte partagé dans une activité collaborative (Clark, 1996). Le contexte partagé peut se construire à partir de la connaissance directe (des partenaires), des dynamiques interactionnelles (discussions, informations partagées) et des suppositions selon les appartenances sociales. Cette définition met donc l'accent sur le processus actif qui permet de construire le contexte partagé.

2.4 Synthèse

Ces définitions, bien que différentes, sont assez proches les unes des autres. Elles convergent toutes vers un même concept : le Référentiel Commun (RC). Une synthèse de ces définitions permet d'avoir une idée des caractéristiques de ce RC et du processus qui permet de le construire. Le RC a le même

rôle dans l'activité collaborative que celui des représentations personnelles dans une activité individuelle : il en est la structure centrale (Loiselet & Hoc, 2001). Il est composé de l'ensemble des propriétés communes au sein des représentations individuelles. Ces propriétés communes incluent :

- la connaissance du but commun,
- la structure courante du problème,
- les actions disponibles pour résoudre ce problème, qui incluent à leur tour le plan d'action,
- la liaison entre ces trois composants.

Le RC constitue alors une représentation actualisée et dynamique de la situation qui se retrouve à l'intersection des différentes représentations individuelles. Il est actualisé aussi à partir des attentes implicites provenant du contexte et des interactions des opérateurs avec leur environnement. Ils conservent alors un historique de l'évolution de leur RC tout au long de l'accomplissement de la tâche. Chaque participant peut affecter l'élaboration du RC (par la participation à la clarification de la tâche ou par la prise d'une décision pouvant contribuer à mettre à jour le RC, par exemple). D'un autre côté, le RC permet de compléter les représentations individuelles de chacun des participants (De Terssac & Chabaud, 1990).

De ce fait, le Référentiel Commun facilite la compréhension des communications entre les partenaires, c'est le cas par exemple de « l'humour de connivence », qui empêche généralement (par défaut de référentiel commun) les non-initiés de comprendre une blague privée.

De la même manière, le RC aide à la gestion des interférences lors de la planification d'une action (Loiselet & Hoc, 2001), cela permet d'élaborer des stratégies partagées et d'agir simultanément avec des actions différentes et complémentaires. C'est ainsi que, pendant une opération chirurgicale, les membres de l'équipe médicale réalisent chacun une tâche différente, tout en anticipant les actions des autres pour éviter toute interférence (leur expertise pourrait presque ne pas nécessiter de communication directe). Il en est de même au sein d'un orchestre musical, chaque membre sait quelle note il doit jouer et à quel moment, sinon le morceau n'a pas de cohérence. Le RC se trouve au centre de l'équipe et permet « d'inhiber » des informations ou des actions non pertinentes. Il doit aider les opérateurs à mener à bien leur tâche commune.

2.5 Processus d'élaboration du référentiel commun

Les différentes définitions de la notion de RC ont permis d'extraire une des caractéristiques les plus importantes : son aspect dynamique. Ainsi, le terme **élaboration** du RC sera utilisé plutôt que construction du RC. Ce terme est plus adapté car il inclut aussi bien la construction du RC, que sa mise à jour et son maintien tout au long de l'activité collaborative.

Pour élaborer leur RC, les participants à une activité collaborative doivent confronter leurs propres représentations à celles des autres en prenant conscience des divergences qui peuvent exister et de la possibilité de venir à bout de ces divergences. Cette confrontation continue est un échange actif d'information qui consiste à rechercher des indices de compréhension chez l'autre et à lui fournir ses propres indices de compréhension (Brennan, 1998). On parle alors de communication référentielle, qui consiste pour chaque opérateur, à s'assurer que l'information qu'il transmet est suffisamment pertinente pour être comprise par ses collaborateurs. Ces derniers doivent alors répondre en donnant des signes de compréhension de cette information, c'est-à-dire qu'ils accusent réception de l'information transmise par leur partenaire. Ce processus appelé *Grounding* par Clark et Brennan (1991) est donc plus qu'un simple échange d'information. Les partenaires s'appuient en effet dans ce processus sur leurs connaissances communes (ou supposée l'être) mais aussi sur le contexte qui les

réunit pour assurer leur intercompréhension (un mot et/ou une phrase ne prennent sens que dans le contexte dans lequel ils sont produits, par exemple la phrase « prends ça et mets le là » ne peut être comprise en dehors de son contexte car les pronoms « ça » et « là » font référence à des objets/endroits qui sont liés au contexte).

Le *Grounding* permet donc aux opérateurs de mettre à jour continuellement leurs représentations personnelles de la situation tout au long de l'activité collaborative et d'acquérir ainsi de nouvelles connaissances autour de cette situation. Ils passent alors par un processus d'ajustement du RC (Giboin, 2004) qui consiste à réduire les écarts entre leurs représentations individuelles. Il peut alors être question d'une remise en cause d'une partie (voire de la totalité) de la représentation individuelle d'un ou plusieurs participants. Ceci peut avoir pour but de :

- transmettre un savoir en complétant une représentation individuelle,
- négocier pour rendre compatible des représentations individuelles divergentes,
- créer ensemble une nouvelle représentation, c'est le cas par exemple d'une prise de décision (Loiselet & Hoc, 2001).

Ainsi, plus les représentations individuelles de la situation se superposent entre elles, plus les opérateurs parviennent à maintenir et à enrichir leur RC et à gérer les conflits.

La figure 3, permet de schématiser le processus d'élaboration du RC entre deux opérateurs :

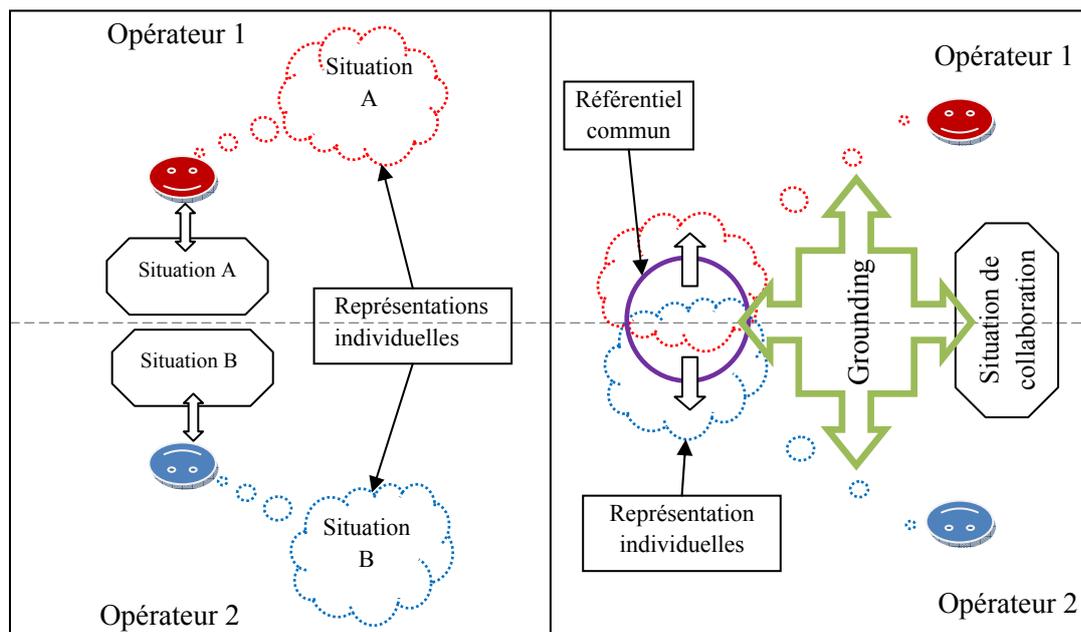


Figure 19 : Elaboration du référentiel commun : dans une situation d'interaction individuelle (à gauche), la mise à jour de la représentation mentale se fait à partir de l'interaction avec l'environnement. Dans une situation de collaboration (à droite), chaque opérateur commence par construire sa propre représentation de la situation. Par la suite, les deux opérateurs confrontent leur représentations individuelles ce qui permet de construire un RC. Une fois ce RC construit, il permet de mettre à jour les représentations individuelles. La confrontation entre ces nouvelles représentations individuelles combinées à l'interaction avec la situation permettent d'alimenter le RC. Le processus se poursuit tout au long de l'activité collaborative, ce qui explique le caractère évolutif du RC.

2.6 Synthèse

Pour que l'élaboration du RC soit efficace, chacun des partenaires doit donc pouvoir partager ses connaissances et ses expériences en référence à la situation avec ses partenaires, mais aussi être

conscient de ce partage d'information (Cottone & Mnatovani, 2003). Les informations partagées sont de nature différentes (buts, plans d'action, structure du problème,...etc.). Concevoir des systèmes collaboratifs qui facilitent l'élaboration d'un RC, dépendra de la nature des informations partagées entre ces utilisateurs. Pour ce faire, il est important de s'intéresser :

- au processus de partage d'information entre les opérateurs qui fait référence à la communication,
- à la conscience de ce partage d'information qui fait souvent référence au sens de présence sociale ou coprésence.

Dans la suite, ces deux notions sont approfondies.

3 Communication dans les EVC

Après avoir défini de la notion de RC ainsi que son processus d'élaboration, la communication est définie dans cette section. La communication est le moyen principal utilisé pour accomplir une activité collaborative. En effet, elle permet aux opérateurs l'élaboration de leur RC. Il est donc essentiel de comprendre ce qu'est la communication et comment ce processus complexe fonctionne

Avant d'aborder la communication dans le cadre des EVC, il est nécessaire de s'intéresser d'abord à la communication humaine et à toutes les formes qu'elle peut prendre. Ceci nous permettra par la suite, de mieux cerner les problèmes qui peuvent perturber la communication dans une activité collaborative à travers un EV.

3.1 Définition de la communication

La communication est le processus par lequel un message porteur d'une information est encodé puis transmis par un émetteur vers un récepteur via un canal de communication. Le récepteur décode alors ce message et donne un feedback à l'émetteur. La communication implique donc plusieurs éléments :

- Des acteurs, c'est-à-dire l'émetteur et le récepteur,
- un canal ou encore un média de communication,
- un message porteur de l'information,
- un code ou un langage donné, supposé être connu par l'émetteur et le récepteur et qui permet de formuler le message.

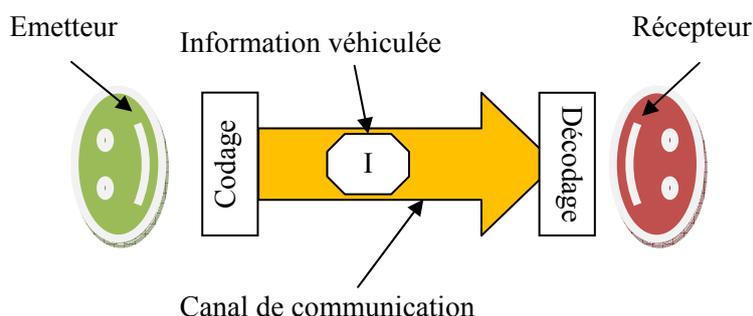


Figure 20 : les composants d'un système de communication (l'information est codée vers langage puis envoyée par l'émetteur à travers un canal ; le récepteur reçoit l'information puis la décode)

Les informations transmises peuvent être des pensées, dès idées ou encore des sentiments. La communication humaine utilise différents canaux. Plusieurs de ces canaux peuvent être combinés au sein d'un même système de communication. On peut alors, distinguer deux formes de communication :

3.1.1 Communication Verbale

La communication verbale est considérée comme **une forme explicite** (ou formelle) de communication. C'est le type de communication le plus étudié. Elle peut avoir plusieurs formes : orale, écrite, gestuelle (langage des signes), tactile (le braille) ou encore graphique. L'écriture, la voix et le langage des signes sont des exemples de canaux possibles pour ce type de communication. La communication verbale utilise le langage comme moyen pour transmettre une pensée ou exprimer un sentiment. Elle consiste alors en un dialogue qui est un échange réciproque entre deux ou plusieurs

interlocuteurs. Chacun d'entre eux utilise le langage comme moyen pour coder ses pensées et les transmettre.

3.1.2 **Communication non verbale**

La communication non verbale est considérée comme **une forme implicite** ou informelle de communication. C'est un processus de communication sans la parole. Elle utilise alors tous les signes qui ne font pas appel à un langage verbal. Ces signes peuvent être communiqués à travers les gestes, l'haptique, les postures du corps (le langage du corps), les expressions faciales ou encore les regards. La communication non verbale inclut aussi la communication à travers les objets tels que l'habillement ou encore l'architecture. La communication orale peut aussi contenir des signes non-verbaux tels que l'intonation et la hauteur de la voix, l'articulation des mots, le style, ou encore les émotions. On parle alors de paralangage. Les marqueurs émotionnels (tels que les signes du stress ou de tristesse) peuvent aussi être une forme de communication non verbale. De même, la communication écrite peut contenir des signes non-verbaux tels que la forme des lettres et leur arrangement spatial. L'utilisation des symboles (tels que les émoticônes) dans les messages électroniques pour exprimer des émotions est considérée aussi comme une communication non-verbale.

3.2 **Combinaison de la communication verbale et non-verbale**

La séparation entre communication verbale et non-verbale est peu évidente à faire. Selon Abric (2008), la signification naît de l'ensemble des signaux verbaux et non verbaux. Les deux types de communication sont d'ailleurs souvent combinés. Parfois, pour signifier la même chose, leur combinaison permet de conforter une information transmise. Certaines études montrent que la direction du regard et les postures corporelles permettent de simplifier l'attribution des tours de parole et d'interpréter les messages communiqués (Sire & Chatty, 1998). Dans certains cas, l'un des deux systèmes peut suppléer l'autre pour transmettre la même information (Lefbvre, 2008). La communication non verbale peut être utilisée par exemple, en substitution de la communication verbale pour économiser du temps dans certaines situations (Hoc, 2003). Dans d'autre cas au contraire, les signaux transmis par ces deux types de communication ont des significations différentes (Lefbvre, 2008). L'interprétation des informations transmises dépendra alors du contexte et des interlocuteurs qui utilisent les deux types de signaux pour décoder l'information. Given (2000) souligne à cet égard (traduction personnelle) : *« Lorsque nous parlons (ou écoutons), notre attention est focalisée plutôt sur les mots que sur le langage corporel. Cependant, notre jugement inclut les deux. Une audience traite simultanément les signaux verbaux et non-verbaux. Les postures du corps ne sont pas généralement positifs ou négatifs en soit ; c'est plutôt la situation et le message qui en détermine l'interprétation »*. Les signaux non verbaux permettent alors de maintenir les règles sociales pendant les conversations.

Les recherches dans le domaine des communications humaines se sont focalisées essentiellement sur les communications verbales (Lefbvre, 2008). En effet, Contrairement aux discours, les paramètres non-verbaux sont difficilement manipulables expérimentalement, essentiellement pour des raisons techniques. Cependant, l'importance de la communication non-verbale ne doit pas être négligée, particulièrement lorsqu'il s'agit de situations collaboratives dans lesquelles l'interprétation des informations transmises est primordiale pour l'élaboration du RC. Ainsi, des études sur la communication en face à face montrent que la communication non-verbale permet de simplifier la compréhension mutuelle (Sire & Chatty, 1998). Toutefois, les communications à travers un EV ou plus généralement, les communications médiatisées, de part leurs caractéristiques, introduisent des formes de communication différentes par rapport à la communication humaine en face à face. Ces

différences sont perçues principalement au niveau des échanges non-verbaux. En effet, ces derniers sont parfois difficiles à reproduire quand les interlocuteurs sont à distance et communiquent à travers un médium. Il est donc important de comprendre l'impacte que peut avoir la communication médiatisée sur le processus de communication homme-homme et donc sur la compréhension mutuelle dans une situation de collaboration à travers un EV.

Dans un premier temps, communication médiatisée est définie. Il sera alors question de comprendre les principes qui la gouvernent. Ceci permet de savoir en quoi cette forme de communication diffère de la communication en face à face et de mieux cerner les effets que la médiatisation peut avoir sur le processus de communication à travers un EV. Il est à noter que notre intérêt ne portera que sur les communications médiatisées bidirectionnelles, ce qui exclura les communications unidirectionnelles à grande échelle telles que les communications à travers les radios et télévisions.

3.3 Les communications médiatisées

Pour bien comprendre ce qu'implique la communication médiatisée en termes de coût pour l'interlocuteur, il faut avoir à l'esprit ce qui la différencie de la communication directe.

La communication directe (appelé aussi communication non médiatisée ou communication en face à face) est tout mode de communication qui n'utilise pas une tierce partie pour transférer l'information. Ce type de communication a pour avantage d'être riche. En effet, elle permet de combiner plusieurs canaux de communication et de transférer des signaux inhérents simultanément (voix, signaux non verbaux, odorat,...etc.). Ceci implique l'utilisation de plusieurs sens (visuel, olfactif, haptique, auditif,...etc.) pour percevoir l'information transférée. On parle dans ce cas de communication multimodale. Les intentions et les sensations transmises sont alors plus facilement interprétées. C'est pourquoi la communication humaine en face à face est l'une des formes les plus riches de communication. Cependant, la communication directe est parfois difficile à réaliser voir parfois impossible. Par exemple lorsque deux interlocuteurs sont éloignés géographiquement. Il existe en effet, des limites à la distance à laquelle la parole est audible, et les comportements visibles (les gestes, les regards ou les expressions faciales) sont perceptibles (Whittaker, 2003). A cause de ces limitations, on a recourt à un intermédiaire ou un médium pour assurer le transfert de l'information. On parle alors de communication médiatisée (à distance). Whittaker (2003) donne une classification détaillée des technologies de communication médiatisée en se basant sur la dimension temporelle. Il parle alors de médiums interactifs lorsqu'il s'agit de communication synchrone (messagerie instantanée, vidéoconférence, téléphone,...etc.) et de médiums non-interactifs pour des communications asynchrones (Courrier électronique, Fax, forum de discussion,...etc.).

La communication médiatisée est souvent moins riche que la communication directe car elle n'est pas toujours multimodale. Le téléphone passe uniquement par l'audition et les lettres uniquement par la vue. Avec les nouvelles technologies de la RV, il est possible d'imaginer de nouvelles formes de communication médiatisée qui permettent de s'adresser à plusieurs sens à la fois. Il est donc important de s'intéresser à la valeur ajoutée que peuvent apporter ces nouveaux médiums à la communication interpersonnelle.

Dans notre cadre de recherche sur les EV, nous allons nous restreindre à des communications médiatisées de type synchrone. De plus, nous allons focaliser notre attention sur l'utilisation de l'ordinateur comme médium principal de communication, on parlera alors de communication médiatisée par ordinateur (*computer-mediated communication*). Ceci inclus bien évidemment les communications vocales à travers l'ordinateur (la téléphonie IP par exemple).

3.4 Communication médiatisée par ordinateur

Lawley (1994) définit la Communication Médiatisée par Ordinateur (CMO) comme (traduction personnelle) : « *le processus d'envoi de messages (principalement, mais pas limité aux messages textuels) à travers l'utilisation directe par les participants de l'ordinateur et des réseaux de communication* ». L'ordinateur devient alors l'intermédiaire entre les participants au processus de communication. Les vidéoconférences, la messagerie instantanée, le courrier électronique, les collecticiels, ou encore les forums de discussions sont des exemples de systèmes utilisant ce type de communication. Ces systèmes offrent l'avantage de permettre à des collaborateurs de travailler ensemble à distance sans devoir se déplacer. Cependant, ils induisent, une nouvelle forme de communication. En effet, selon Navarro (2001), les canaux de communication sont porteurs de changements dans l'accès à l'information et dans la communication entre les individus. Ceci sous-entend que l'utilisation de l'ordinateur comme canal de communication introduit des modifications dans les interactions entre partenaires dans une activité collaborative synchrone à distance par rapport à une activité collaborative en face à face. Il est donc question d'identifier les caractéristiques de ce type de communication pour comprendre les éventuels problèmes qui peuvent survenir dans une situation d'interaction à distance, en raison des spécificités du canal de communication utilisé.

3.5 Influence du médium sur la collaboration

Selon le système utilisé, la CMO peut restreindre les canaux de communication entre les interlocuteurs. Le plus souvent ces derniers peuvent se parler (téléphonie IP). Dans certains cas ils peuvent se voir et parfois avoir accès à ce que font leurs partenaires. Or, dans une situation de collaboration le partage d'information est primordial pour assurer le bon déroulement de l'activité collaborative. En effet, l'élaboration du RC dépend des échanges d'information ainsi que des signaux de compréhension échangés entre les partenaires. Si ces signaux sont mal transmis, ceci peut influencer négativement sur le déroulement de l'activité collaborative. Clark et Brennan (1991) donnent un exemple intéressant de l'influence du médium de communication sur le processus de l'élaboration du RC : deux interlocuteurs qui communiquent pendant une situation de collaboration. L'utilisation d'un régulateur phatique (dans ce cas « ok ») peut alors, selon le médium utilisé, avoir des effets différents. En effet, dans une communication téléphonique, cet indicateur peut être utilisé facilement comme signe de compréhension du message du partenaire. Cependant, si l'information est transmise à travers un message textuel, l'utilisation de cet indicateur peut avoir des implications différentes. En effet, si deux idées sont transmises successivement, l'indicateur peut arriver au mauvais moment (pour répondre au mauvais message). De plus, l'envoi de l'indicateur peut interrompre l'émetteur. Cet exemple montre bien que le médium peut avoir un effet sur l'élaboration du RC. Clark et Brennan (1991) ont alors identifié huit critères qu'un médium impose à la communication entre deux personnes :

- La **coprésence** : les interlocuteurs partagent un espace physique,
- la visibilité mutuelle : chacun des interlocuteurs peut voir son partenaire et ses actions,
- L'**audibilité** : aussi bien la possibilité d'échanges oraux d'informations que le rythme et l'intonation de la voix,
- La **cotemporalité** : le message envoyé par l'émetteur est aussitôt reçu par l'interlocuteur,
- la synchronicité : chacun des interlocuteurs peut envoyer et recevoir des messages en même temps que son partenaire (un des deux peut sourire pendant que l'autre parle),
- La **séquentialité** : les tours de paroles se succèdent les uns les autres,

- la persistance des informations échangées : chacun des interlocuteurs peut avoir un accès aux messages précédents de son partenaire,
- La possibilité de révision : possibilité de chacun des interlocuteurs à réviser son message avant de l'envoyer.

Ces huit contraintes peuvent alors servir à caractériser un médium de communication. Par exemple, la communication à travers un EVC synchrone, sans représentation anthropomorphique des participants et permettant des communications par téléphonie IP est caractérisée par : l'audibilité, la cotemporalité, la simultanéité et la séquentialité. Les deux dernières caractéristiques ne sont pas supportées en raison du caractère synchrone de l'EVC. Cependant, la question qui se pose est la suivante : **quels effets peut avoir le non partage d'un environnement physique et la non visibilité du partenaire sur l'élaboration du RC ?** Les problèmes de communication dans les EVC sont abordés dans la section suivante.

Par ailleurs, dans une situation de communication en face à face (lorsque tous les canaux sont disponibles), le choix du canal de communication est dépendant de la tâche. Il est alors, parfois possible de communiquer certaines informations par le toucher (pour transmettre des émotions par exemple). Il est donc nécessaire d'étendre la liste de contraintes de Clark et Brennan (1991) en incluant d'autres caractéristiques comme le contact physique. On parle alors de communication haptique (cette notion est abordée plus en détail dans le chapitre 4).

3.6 Les problèmes de communication dans les EVC

Une bonne communication est très importante dans les situations collaboratives. En, effet, selon Dillenbourg (1999), pour que la collaboration soit efficace, la communication doit être optimisée. Les EVC permettent à des personnes de travailler ensemble dans un EV partagé. La communication dans les EVC, comme pour toute interaction humaine est une combinaison entre une communication verbale et non-verbale. Mais comme précisé auparavant, **l'utilisation de différents médiums introduit des modifications dans les comportements humains**, ce qui rend la communication quelque peu différente (et parfois problématique) par rapport à une communication en face à face. Ceci dépend particulièrement de la technologie utilisée. En effet, la communication à distance est contrainte par la largeur de la bande passante et par le temps de réponse du média utilisé (Schmidt, 1990). Ce qui implique une réduction des informations transmises entre les interlocuteurs. Ainsi, certains aspects utilisés pour optimiser la communication dans les situations en face à face deviennent difficiles à manipuler d'une manière flexible dans des interactions à distance. La dimension implicite de la communication (la dimension non-verbale) est alors généralement mise de coté au profit de la communication explicite. En effet, cette dernière est plus facile à reproduire à distance. Ceci peut devenir dans certaines situations une source d'incompréhensions entre les interlocuteurs. Dans une situation de collaboration, le processus d'élaboration du RC peut être handicapé par un manque d'informations échangées entre les partenaires et par les incompréhensions qui peuvent en résulter.

Les différences entre les situations de communication en face à face et les situations de communication médiatisée et leur influence sur la collaboration ont été largement étudiées dans la littérature. Ces deux formes de communication ont été comparées selon les contraintes décrites par Clark et Brennan (1991). L'hypothèse de base était qu'un médium plus riche permet une meilleure performance lorsque les personnes collaborent à distance. Plusieurs études comparatives ont montré un avantage pour les situations de communication en face à face (D'Ambra, Rice, & O'Connor, 1998; Lefebvre, 2008; Michailidis & Rada, 1997) confirmant ainsi cette hypothèse. Plusieurs autres facteurs ont également été identifiés pour justifier les altérations de la communication lorsque les partenaires

sont à distance : les délais de transmission, la qualité des transmissions, le type de transmission (synchrone ou asynchrone) (Navarro, 2001). Une des conclusions les plus importantes des études sur la communication médiatisée est l'importance de la communication vocale. En effet, plusieurs études ont montré que la communication vocale a une influence importante sur les performances dans les situations de collaboration synchrones et médiatisées (Fish, Kraut, & Chalfonte, 1990; Jensen, 2000; Tang & Isaacs, 1993). **Les personnes ont alors de meilleures performances lorsque la communication vocale est disponible.** Ce résultat est généralement expliqué par le fait que la communication vocale est plus facile à produire qu'une communication à travers les messages écrits (Clark & Brennan, 1991).

D'un autre côté, et après la comparaison entre plusieurs études, Navarro (2001) conclut que les **effets du canal de communication sur la collaboration dépendent fortement du type de tâche.** Ceci nous amène au cœur de notre problème : le type de tâche collaborative détermine la nature des informations échangées. Les **utilisateurs doivent pouvoir utiliser le canal de communication le mieux approprié pour véhiculer ces informations.** Ceci donne une première indication sur les propriétés qu'un EVC doit respecter pour favoriser la collaboration.

3.7 Synthèse

Cette étude sur la CMO permet d'extraire certaines propriétés importantes :

- tout type de médiums de communication est caractérisé par un certain nombre de contraintes,
- selon ces contraintes, l'utilisation du médium introduit des modifications dans la façon dont les opérateurs construisent leur RC,
- la communication vocale permet d'avoir de meilleures performances dans les situations collaboratives,
- la nature de la tâche détermine le canal le mieux approprié pour véhiculer l'information.

Après avoir identifié les caractéristiques des EVC qui nous intéressent (Audibilité, cotemporalité, synchronicité, et séquentialité), il est donc important, de s'intéresser à la nature de la tâche collaborative que cet EV doit supporter. Ceci permettra dans un premier temps de déterminer la nature des informations qui seront utiles à transmettre pour assurer l'élaboration d'un RC efficace entre les partenaires. Par la suite, il faudra faire des choix quant au canal de communication (verbal ou non verbal) le mieux adapté pour véhiculer ces informations. Selon le canal choisi, il sera alors possible d'imaginer le renforcement de certains indices utiles à la communication et qui permettront la construction et le maintien d'un RC efficace.

Travailler en collaboration nécessite une bonne communication mais aussi des interactions sociales entre les partenaires. Dans la suite, cette dimension sociale des interactions homme-homme est abordée à travers l'étude de la notion de coprésence ou encore de présence sociale dans les EVC.

4 La coprésence dans les environnements virtuels collaboratifs

Pour mieux comprendre la notion de coprésence dans un EVC il est important de s'intéresser d'abord au concept plus général qu'est la présence.

4.1 La présence

Le concept de présence est étudié depuis plusieurs années. Le terme «présence» est lié à un vaste domaine de recherche dans lequel plusieurs définitions et théories coexistent. Ces définitions sont basées sur des théories différentes et ont généré différents courants. Dans cette partie nous allons simplement tenter de définir les éléments de base de la notion de présence qui sont utiles pour comprendre la notion présence sociale qui lui est associée. Le sentiment de présence est défini par Witmer et Singer (1998) comme étant (traduction personnelle) :

« L'expérience subjective d'être dans un lieu ou un environnement tout en étant physiquement situé dans un autre ».

Dans notre cadre de recherche, la définition de Slater, Linakis, Usoh, Kooper, et Street (1996), qui est davantage utilisée dans la littérature des EV, a été choisie. En effet, la présence dans un EV est souvent dissociée de la notion de télé-présence utilisée en téléopération et définie comme étant (traduction personnelle) « *la sensation d'être sur le lieu de travail distant et non pas à la station de contrôle de l'opérateur*» (Witmer & Singer, 1998).

Slater et al. (1996) définissent donc la présence dans un EV comme étant **un phénomène subjectif lié à la sensation qu'a l'utilisateur d'être là dans l'EV**. La présence est donc liée à un état psychologique de l'utilisateur qui caractérise son expérience vécue dans l'EV. Ce terme regroupe plusieurs phénomènes perceptifs et psychologiques (Kalawsky, 2000). Sheridan (1992) le compare à d'autres concepts subjectifs tels que la charge mentale ou les modèles mentaux. Prothero, Parker, et Furness (1995) affirment que la présence et la conscience de la situation sont des notions qui se chevauchent. Cependant, mesurer ce sentiment de présence reste difficile en raison de sa nature subjective. Une bonne partie des recherches autour de cette notion a été dirigée vers la définition de mesures qui permettent de rendre compte de ce sentiment. Deux types de mesures sont généralement utilisés (Schuemie, van der Straaten, Krijn, & van der Mast, 2001) :

- Les mesures subjectives : ces mesures sont basées essentiellement sur des questionnaires post-expérimentaux qui donnent la possibilité aux utilisateurs d'exprimer leur sentiment de présence dans un EV. L'avantage d'utiliser de telles mesures est qu'elles offrent un feedback sur l'expérience de l'utilisateur dans l'EV. Ceci procure ainsi, de nouvelles opportunités pour mieux comprendre les phénomènes liés à la présence. Cependant, les questions sont souvent dépendantes d'une théorie ou d'une définition de la présence. Ceci peut limiter la portée des résultats de ces questionnaires.
- les mesures objectives : ces mesures se divisent à leur tour en deux catégories :
- des mesures basées sur les comportements, tels que les réponses réflexes (l'évitement d'un obstacle qui surgit subitement dans l'EV) ou encore la direction du regard,
- des mesures physiologiques telles que la vitesse des battements du cœur, la température du corps ou encore l'activité cérébrale.
- Cependant l'utilisation de ces mesures objectives reste limitée et leur validation passe paradoxalement par des comparaisons avec les mesures subjectives.

4.2 Synthèse

La notion de présence est très importante dans l'étude des technologies de la RV. Cependant, les résultats dans ce domaine restent très peu concluants. En effet, les questions sur la corrélation entre la présence et la performance des utilisateurs dans les EV restent encore sans réponse. Ceci est essentiellement dû à un manque important de mesures fiables, l'absence d'une définition universelle et un manque de connaissances sur les éléments clés qui interviennent dans ce concept. Pour rendre la notion de présence plus claire, des mesures plus pertinentes doivent être définies. Il sera alors possible d'utiliser ces mesures pour mieux comprendre les phénomènes liés à la présence et concevoir ainsi des EV qui favorisent ce sentiment.

4.3 Définition de la notion de présence sociale

L'étude de la présence sociale a pris une grande importance avec l'apparition des nouvelles technologies de communication à distance et avec le développement de nouvelles relations interpersonnelles à travers les réseaux sociaux et les jeux multi-joueurs sur internet. La présence sociale est définie comme étant **le sentiment d'être ensemble avec une autre personne** (De Greef & IJsselsteijn, 2000). Dans un EVC, cette notion de présence sociale ou de convivialité peut être considérée comme une contrepartie à la notion de présence dans un environnement virtuel mono utilisateur (bien que la notion de présence existe également dans un EVC). Le terme utilisé alors pour désigner cette notion dans les EVC est la **coprésence** (Sallnäs, Rasmus-Gröhn, & Sjöström, 2000). La coprésence est très largement étudiée dans le domaine des EVC, aussi bien à travers les interactions homme-homme qu'à travers les interactions des utilisateurs avec les humains virtuels. Elle est considérée comme une mesure d'évaluation de ces environnements. Cependant, Sallnäs (2004) souligne que dans de nombreux cas, les études de coprésence dans les EVC mettent l'accent sur l'évaluation des avatars en tant que représentation réaliste d'un humain plutôt que sur la richesse des interactions interpersonnelles.

Les origines de la notion de présence sociale peuvent être liées à la notion de « d'immédiateté » (*immediacy*) définie par Mehrabian (1969) cité par (Sallnäs E.-L. , 2004). Cette notion fait référence à la distance psychologique qu'une personne met entre elle-même et une autre. Cette distance peut se manifester à travers le discours produit par cette personne et qui reflète soit des sentiments de proximité ou de séparation. Lier ces deux concepts peut donner une mesure d'évaluation de la présence sociale. En effet, il est possible de trouver des indicateurs du sentiment de présence sociale à travers l'étude des conversations produites par des partenaires pendant leurs communications dans une situation de collaboration.

Des questionnaires sont souvent utilisés pour mesurer ce sentiment de coprésence (Comment était le sentiment d'un utilisateur d'être lié à un autre à travers l'interface ? Quel était le niveau approprié de l'interaction ? Est ce que l'utilisateur s'est senti socialement et psychologiquement connecté à un «autre» lors de l'interaction avec l'agent humain virtuel? (Biocca, Harms, & Burgoon, 2003)). Bien que d'après les auteurs ces mesures ne soient pas toujours fiables, nous pensons qu'elles pourront être suffisantes pour rendre compte du sentiment de coprésence dans les EVC utilisés.

4.4 La conscience mutuelle de la situation et la présence sociale

Le concept de conscience mutuelle de la situation (*team situation awareness*) a été introduit par Salas et al. (1995). Il permet d'étendre le concept de conscience de la situation (*situation awareness*) à des situations collaboratives. Ce concept traduit le fait de savoir, dans une interaction homme-homme, si oui ou non chacun des partenaires est conscient de la situation dans son ensemble. Ceci inclus la

conscience des activités et de la position du partenaire, ce qu'il peut voir, la compréhension de ses intentions d'action,...etc. Cette notion est donc très importante pour le déroulement d'une activité collaborative. Bien que la notion de conscience mutuelle de la situation soit souvent confondue avec la notion de présence sociale (ou de coprésence), Sallnäs (2004) met en évidence les différences entre ces deux notions. Mais au-delà des différences dans la définition, ces deux notions sont en fait fortement reliées. En effet, Daly-Jones, Monk, et Watts, (1998) cité par (Navarro, 2001) montrent que **la présence sociale permet de maintenir une conscience mutuelle de la situation.**

4.5 Synthèse

A travers la définition de la notion de coprésence, l'accent est mis sur les métriques qui permettent de mesurer le sentiment d'être avec une autre personne. Ces métriques sont essentiellement subjectives et basées sur l'utilisation de questionnaires. Nous avons également montré que l'étude des conversations interpersonnelles peut donner certaines indications sur ce sentiment. Enfin, la relation existante entre la coprésence et la notion de conscience mutuelle de la situation a été abordée. Nous avons montré alors qu'il peut y avoir un effet direct du sentiment de coprésence sur le maintien d'une conscience mutuelle de la situation.

4.6 Le rôle de la présence sociale dans l'élaboration du RC

Dans une situation de collaboration à distance, permettre aux partenaires d'avoir un sentiment de coprésence, favorisant l'établissement d'une communication fluide, reste toujours problématique (Cottone & Mnatovani, 2003). En effet, la limitation des médiums en termes de transmission des indices non verbaux peut avoir des effets négatifs sur les interactions sociales entre les partenaires distants. Cependant, les EVC représentent potentiellement un médium plus riche en termes de présence sociale. En effet, ils soutiennent le sentiment «d'être là ensemble» dans un environnement autre que celui dans lequel les opérateurs sont physiquement présents (Spante, Schroeder, & Axelsson, 2004). La question qui se pose alors est : quel effet peut avoir le sentiment de coprésence sur l'élaboration d'un référentiel commun dans un EVC ?

La revue de littérature précédente a permis de comprendre que la présence sociale a un effet sur la conscience mutuelle de la situation. Or, nous avons montré auparavant que cette notion est très importante pour le processus d'élaboration du RC. **Ceci laisse penser qu'un sentiment de coprésence élevé encouragerait les partenaires à travailler ensemble.** Il est donc important de tirer profit des caractéristiques des EVC pour accroître le sentiment de coprésence. Bien que la théorie autour de ce sentiment de coprésence reste mal définie, l'utilisation des mesures actuelles (questionnaires), combinées éventuellement avec de nouveaux indicateurs (études des discours) peut permettre d'analyser différemment nos expériences dans les EVC.

5 Notre démarche

Notre objectif est de définir les lignes directrices pour une démarche de conception des EVC. Cette revue de littérature permet de définir la démarche de travail pour atteindre cet objectif. Cette démarche consiste à :

- Étudier la nature des informations contenues dans le RC à travers des situations collaboratives concrètes. Ceci permet de mettre en évidence les canaux de communication nécessaires pour véhiculer ce type d'informations,
- tenter d'agir sur les informations multimodales issues et dirigées vers les divers utilisateurs d'un EVC pour enrichir les interactions et favoriser ainsi l'élaboration d'un RC efficient.

Cette démarche de conception est soutenue par des études expérimentales qui permettent de valider les différentes solutions proposées pour améliorer la communication dans les EVC. Ces études expérimentales permettent de mettre en évidence la construction du référentiel commun à travers deux situations concrètes. L'étude du contenu du référentiel commun sera utilisée pour évaluer la collaboration à travers les environnements virtuels utilisés. En tirant profit des caractéristiques des environnements virtuels, les solutions proposées se basent essentiellement sur l'amélioration de la communication dans les situations de collaboration.

6 Conclusion

Ce chapitre a permis de comprendre les concepts de base sur lesquels s'articule la collaboration. Pour que celle-ci soit efficace, les partenaires doivent pouvoir élaborer ensemble une représentation commune de la situation, c'est à dire un RC. Celui-ci est construit et mis à jour continuellement à travers un processus actif d'échange d'information entre les partenaires. Ces informations sont véhiculées à travers un ou plusieurs canaux de communication. Les partenaires doivent pouvoir choisir le canal le mieux approprié pour transmettre les informations selon la nature de la tâche collaborative.

Dans une situation de collaboration à distance, les caractéristiques du médium de communication utilisé peuvent avoir une influence importante sur l'élaboration du RC. De plus, la dimension sociale des interactions collaboratives doit être prise en considération. Ceci passe par l'amélioration du sentiment d'être ensemble dans l'environnement d'interaction. Nous avons vu sur ce plan l'apport essentiel que peut avoir un EVC comme support à l'interaction. Dans la suite de ce travail, la démarche de conception est mise à l'épreuve dans des situations de collaboration concrètes. Cette approche théorique est validée à travers des études expérimentales.

Chapitre 3 : communication spatiale dans un environnement virtuel collaboratif



Chapitre 3 : Communication spatiale dans un environnement virtuel collaboratif

Dans ce chapitre, la notion de **collaboration spatiale** est étudiée. Elle est définie comme une activité collaborative reposant sur l'organisation spatiale d'un espace de travail commun, où l'activité est liée à des problèmes d'agencement, de disposition, de déplacement d'objets. Par exemple, un groupe de personnes qui travaillent ensemble pour le rangement des fournitures dans une pièce, ou encore qui s'échangent des informations sur des directions dans l'espace. Lorsque deux personnes partagent le même environnement de travail, pour une telle tâche, elles sont amenées à parler des objets présents ou faire référence à ces objets. On appellera cette activité **la référenciation** d'objets. Luff, Hidmarsh, & Heath (2000) ont montré que la communication et la collaboration sont fortement dépendantes de la capacité des personnes à invoquer et à référencer les caractéristiques de leur environnement immédiat. Dans une situation d'interaction entre deux opérateurs, cette activité de référenciation a pour objectif de mettre en évidence un objet d'intérêt qui deviendra par exemple l'objet de l'interaction entre les opérateurs pendant un certain temps « peux-tu me donner **le livre** qui est au dessus de ton bureau ? ». Pour faire référence à un objet dans une discussion, le locuteur peut alors utiliser plusieurs stratégies possibles :

- Nommer l'objet cible : « *donnes moi le **livre*** »,
- Utiliser les caractéristiques intrinsèques de l'objet telles que sa forme, sa couleur, sa texture,...etc. pour le décrire : « *donnes moi le **livre blanc*** ». Cette description permet à l'auditeur de distinguer le livre en question parmi d'autres (à condition que ce soit le seul livre blanc),
- Utiliser des expressions déictiques telles que : « *donnes moi **ce livre*** », ces expressions sont généralement accompagnée d'un geste de pointage du locuteur vers l'objet cible pour aider l'auditeur à le repérer,
- Décrire la position de l'objet dans l'espace pour que l'auditeur puisse distinguer de manière unique l'objet cible : « *donnes moi le **livre qui est au dessus de ton bureau*** ».

Dans ce dernier cas, le locuteur utilise ce qu'on appelle un langage spatial pour référencer l'objet. Ce langage spatial est utilisé dans notre vie de tous les jours pour décrire les relations spatiales entre les objets de notre environnement. Par exemple, « *Tu peux poser les clés à droite de mon lit* », « *je suis en face de l'entrée de l'immeuble* », sont des phrases qu'on utilise couramment pour décrire à une autre personne une position dans l'espace (notre position, la position d'un objet ou encore décrire une action dans l'espace). L'objectif étant de permettre à l'auditeur de localiser sans ambiguïté cette position spatiale. Le langage spatial de tous les jours a été très largement étudié en psychologie cognitive (Lawton, 2001), mais les études de ce langage dans le cadre des communications médiatisées sont moins importantes. Dans le cadre de notre investigation sur l'utilisation des EV dans des situations collaboratives, notre objectif est d'étudier l'impact de ce langage sur les activités de référenciation d'objets (et plus précisément les descriptions spatiales). En effet, comme précisé dans le chapitre précédent, les caractéristiques des EV introduisent un changement dans les interactions entre les utilisateurs. Il est donc important de comprendre quelle est l'influence des EV sur l'utilisation du

langage spatial, les problèmes qui peuvent résulter des changements dans les interactions introduit par les EV et enfin, proposer des alternatives pour améliorer l'utilisation du langage spatial dans les EVC.

Dans ce chapitre, la façon dont les opérateurs construisent des cartes (images) spatiales personnelles de leur environnement est étudiée. Ceci permettra par la suite, de comprendre comment ces opérateurs peuvent utiliser leurs propres images pour construire avec leur partenaire ce qu'on appellera un **référentiel spatial commun**. Ce dernier est inclus dans la notion plus générale de RC. Le référentiel spatial commun assure aux partenaires une compréhension mutuelle lorsqu'ils utilisent le langage spatial pour décrire des positions ou encore des actions dans l'espace. Les changements introduits par certaines caractéristiques des EV dans l'utilisation du langage spatial, et comment ces caractéristiques peuvent affecter les activités spatiales collaboratives dans ce type d'environnement sont abordés par la suite. Les solutions proposées dans la littérature pour surmonter ces problèmes dans le cadre des EVC sont enfin abordées. Dans la deuxième partie de ce chapitre, il est question de proposer notre propre solution au problème de référentiation d'objets dans les EVC. Cette solution est illustrée dans le cadre d'une étude expérimentale. Ce chapitre est conclut par une présentation des résultats de l'étude et par une discussion permettant de tirer des conclusions sur l'apport de la solution proposée dans le cadre de la conception des EVC.

1 Les systèmes de référence et les représentations spatiales

Un opérateur doit pouvoir effectuer des tâches de localisation ou de manipulation d'objets dans l'espace en fonction de sa perception de l'environnement. Il doit alors commencer par construire une représentation de la situation qui inclut le codage des informations concernant les positions des objets dans l'espace ainsi que les opérations possibles sur ces objets. Cette représentation lui permettra de planifier des actions simples (localiser un objet, saisir un objet, déplacer un objet, déposer un objet,...etc.) ou des actions plus complexes (emboîter deux objets, déplacer un objet en respectant certaines contraintes, décrire la position de l'objet à un partenaire,...etc.). La planification de toutes ces actions sur les objets, ainsi que leurs exécutions, requièrent que la représentation spatiale de l'opérateur soit la plus précise possible. Celle-ci est incluse dans sa représentation globale de la situation.

Pour définir une représentation spatiale de son environnement, un opérateur doit se baser sur ce qu'on appelle un système de référence.

1.1 Définitions

Pour coder les coordonnées spatiales d'un objet, un opérateur doit utiliser un système de référence. Cela consiste à utiliser un repère dans l'espace et à donner une direction à celui-ci. On peut définir deux catégories de systèmes de références :

- un système de référence égo-centré,
- un système de référence exo-centré.

Si l'opérateur veut définir la position d'un livre sur une table (voir la Figure 21), il peut le localiser de deux manières différentes : i) par rapport à lui-même : « le livre se trouve sur ma droite », dans ce cas le repère est centré sur le corps de l'opérateur (ou l'observateur). On parle alors d'un système de référence égo-centré. L'opérateur peut aussi localiser cet objet ii) par rapport à un autre objet de l'environnement « le livre se trouve sur la gauche de mon écran ». Dans ce cas, le repère est centré sur un objet de l'environnement. On parle alors d'un système de référence exo-centré (ou allo-centré).

1.1.1 Système de référence égo-centré

Dans un système de référence égo-centré, c'est le corps de l'observateur (ou une partie de son corps) qui sert de point de repère pour localiser et déplacer les objets de l'environnement. L'observateur se base alors sur les informations proprioceptives le renseignant sur sa propre position et celle de ses segments corporels dans l'espace (Blouin, et al., 1993). Ce système de référence est privilégié lorsqu'il s'agit d'effectuer une action comme saisir un objet, effectuer des rotations mentales, ou viser une cible (Birdgemen, 1999). Le codage de la position spatiale de l'objet est donc déterminé par la perspective de l'opérateur sur l'environnement. Ce système est fortement dépendant de la position de l'opérateur dans l'espace (et de son point de vue).

1.1.2 Système de référence exocentré

Un système de référence exocentré (appelé aussi allocentré) est construit en se basant sur les indices externes liés à l'environnement de l'opérateur et qui restent stables (fixes) lorsque le corps de celui-ci est en mouvement (Blouin, et al., 1993). Ce type de système est privilégié pour localiser un objet, une personne ou tout simplement une zone de l'espace (faisant référence à un environnement : au milieu, au dessus, devant...). Ce référentiel est approprié pour créer ou accéder à une représentation, lors d'une description spatiale d'une pièce ou encore la lecture d'une carte. Un système de référence exocentré (« point de vue de l'objet ») permet donc d'avoir une vue plus globale de l'environnement (un codage cartographique des informations spatiales).

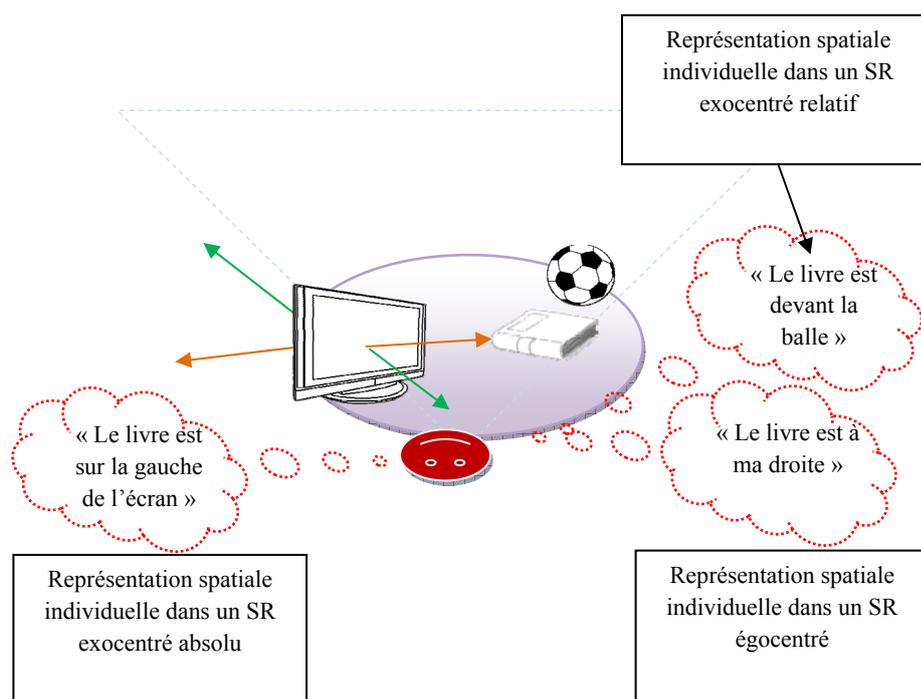


Figure 21 : Utilisation des systèmes de référence pour localiser un livre ; dans un système exocentré, l'opérateur se base sur un objet latéralisé et fixe (l'écran) pour localiser le livre. Dans un système de référence égocentré l'opérateur se base sur sa propre position pour localiser le livre. Dans un système de référence exocentré relatif, l'opérateur se base sur la balle qui est un objet non latéralisé pour localiser le livre.

Il est important de faire la distinction entre deux types de systèmes exocentrés :

Un système exocentré absolu

Ce système est lié à un repère absolu dans l'environnement de l'opérateur. Il peut alors s'agir des directions cardinales (nord, sud, est, ouest) ou encore d'un objet **fixe et orienté** (voir plus loin) dans l'environnement. Par exemple, la présence d'une statue dans l'environnement permet à l'opérateur de localiser les objets par rapport à celle-ci dans un repère absolu (devant, derrière, à gauche ou à droite de la statue). Cette localisation est neutre c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la position de l'opérateur dans l'espace. Elle correspond à une vision plus globale de l'environnement.

Pour qu'un objet de l'environnement soit utilisé comme repère absolu il doit donc être fixe et orienté (c'est-à-dire qu'il a une gauche, une droite, un haut, un bas, un devant et un derrière clairement définis). L'orientation de cet objet qu'on appellera à partir de maintenant la **latéralisation** est alors définie selon les critères fonctionnels de l'objet (Levinson, 2003). Par exemple, l'avant d'un bâtiment est le coté par lequel on entre dans celui-ci et le devant d'une télévision correspond à son écran, ... etc.

Un système exocentré relatif

Le repère spatial correspond à des objets dont l'orientation dans l'espace n'est pas fixe (un objet mobile) ou impossible à déterminer clairement. Par exemple, une balle n'a pas forcément un devant et un derrière. Dans ce cas, l'opérateur localise les objets en référence à cet objet, mais cette localisation sera également dépendante de son propre point de vue (dans la Figure 21, le livre se trouve « devant la balle » parce qu'il se trouve entre l'opérateur et la balle, si l'opérateur était de l'autre côté de la table, le livre serait vu comme étant « derrière la balle » parce que la balle se trouverait entre lui et l'opérateur).

1.2 Choix du système de référence à utiliser

Selon plusieurs auteurs, le choix d'un système de référence plutôt qu'un autre serait déterminé par : les contraintes de la tâche, la disponibilité des indices contextuels et leur nombre (Carlson-Radvansky & Jiang, 1998; Desmurgeta, PéliSSona, Rossettia, & Prablanca, 1998; Verjat, 1994). Ainsi, dans une tâche consistant à effectuer un jugement concernant la position d'un objet (dans un référentiel égocentré ou exocentré), Carlson-Radvansky et Jiang (1998) démontrent que la sélection d'un référentiel égocentré versus exocentré implique l'inhibition du système de référence non sélectionné, ceci se traduisant par une augmentation du temps de réponse lorsque le système de référence dans lequel la réponse doit être produite diffère de celui spécifié par un indice préalable. En opposition à ce résultat, Presson (1980, cité par Verjat, 1994) montre qu'on peut recourir à la fois à un système égocentré et un système exocentré.

Par ailleurs, selon certains auteurs, la présence d'indices contextuels favorise le choix d'un système exocentré. Ainsi, Blouin et al. (1993) observent dans une étude expérimentale que les gestes de pointage vers une cible visuelle sont plus précis en présence d'indices visuels, par rapport à la situation où les pointages sont réalisés dans le noir. Ce résultat laisse penser qu'en présence d'un contexte visuel les opérateurs se place dans un système de référence exocentré.

De son côté, Verjat (1994) regroupe dans une revue de la littérature, les éléments qui semblent avoir une influence sur le choix d'un système de référence plutôt qu'un autre. Selon elle, les facteurs en question sont :

- L'orientation (ou la latéralisation de l'objet de référence),
- Le rôle et les exigences de la tâche à effectuer par l'opérateur,
- L'aspect statique ou dynamique de l'opérateur.

Donc le choix d'un système de référence plutôt qu'un autre semble dépendre de plusieurs facteurs. De plus, l'utilisation de différents systèmes de référence simultanément n'est pas impossible.

Ces facteurs seront traités en détails dans la suite de ce chapitre.

1.3 Utilisation des Systèmes de Référence dans les Environnements Virtuels : Points de vue, navigation et manipulation

On s'intéresse maintenant à l'utilisation des systèmes de référence dans les environnements virtuels.

Dans un environnement virtuel en 3D, le point de vue est dicté par la tâche à accomplir. La manipulation du point de vue est une activité essentielle pour réaliser une tâche dans ce type d'environnement (se déplacer par exemple). Non seulement, cette manipulation favorise l'immersion visuelle mais aussi l'exploration de l'environnement 3D et aide donc à la construction dynamique

d'une représentation spatiale de l'environnement. Lors d'une interaction dans un EV, un utilisateur peut avoir deux possibilités :

- Il peut être « présent » à l'intérieur même de la représentation spatiale de l'EV. Il a alors ce qu'on appelle un point de vue à la première personne (*first person perspective*). C'est le cas par exemple des jeux vidéo FPS (First Person Shooter). Dans ce cas, le champ visuel de l'utilisateur simule celui du personnage qu'il incarne dans le jeu. On parle alors d'une perspective égocentrée (à ne pas confondre avec le système de référence égocentré). Cette perspective favorise l'immersion de l'utilisateur dans l'EV (Leigh & Johnson, 1996),
- L'utilisateur peut aussi avoir un point de vue plus global de la scène. Ce point de vue permet à l'utilisateur de survoler la scène. On parle alors d'un point de vue *bird-eye* ou d'une perspective exocentrée (à ne pas confondre avec le système de référence exocentré). Cette perspective favorise l'exploration de l'EV.

Plusieurs EV permettent l'utilisation simultanée des deux points de vue. Ceci permet à l'utilisateur d'avoir plusieurs perspectives de son environnement et de pouvoir profiter des avantages de chacune d'elles. Des recherches ont montré que dans un EV, le point de vue égocentré est mieux adapté aux manipulations fines et précises d'objets et aux ajustements (manipulation d'objet au dessus d'une table par exemple) alors que le point de vue global est plutôt préféré pour les manipulations d'objet à plus grande échelle, ou alors pour avoir une idée plus globale sur la disposition des objets dans l'espace (Leigh & Johnson, 1996; Stoakley, Conway, & Pausch, 1995).

Il sera alors intéressant d'étudier les échanges d'information spatiale dans le cadre d'une situation collaborative impliquant deux partenaires qui ont une perspective égocentrée de l'EV.

2 Systèmes de référence et Référentiel Commun : définition de la notion de référentiel spatial commun

Dans les sections précédentes, la façon dont un opérateur construisait sa propre représentation mentale de l'espace (que ce dernier soit réel ou virtuel) a été abordée. Cependant, dans une situation de collaboration, où cet opérateur partage l'environnement avec un partenaire, comment les deux coéquipiers peuvent-ils échanger des informations spatiales sur les objets et interagir ensemble sur ces derniers tout en étant certains d'être compris? Cela implique l'élaboration d'un répertoire spatial commun, réalisé dans le cadre du processus d'élaboration du RC entre les partenaires. Cela nécessite une compréhension mutuelle entre les partenaires en ce qui concerne les références spatiales utilisées. On parlera alors de référentiel spatial commun. Ce dernier n'est en fait qu'un sous-ensemble du RC global.

2.1 Communication spatiale et systèmes de références

Pour agir conjointement sur les objets d'un environnement partagé, deux interlocuteurs doivent construire ensemble une représentation spatiale commune de cet environnement. Cette représentation commune qu'on appellera un Référentiel Spatial Commun, permet aux deux partenaires de faire des descriptions spatiales de leur environnement, c'est-à-dire : leur permet :

- d'avoir des références communes autour des objets de l'environnement,
- de décrire éventuellement les actions à faire sur ces objets.

Dans le cadre de l'élaboration de ce référentiel spatial commun, les interlocuteurs doivent alors s'assurer que ces informations sont transmises entre eux sans ambiguïtés. Avant de définir davantage ce qu'est le référentiel spatial commun, il est question de comprendre comment un interlocuteur décrit spatialement son environnement à son partenaire. Quel système de référence utilise-t-il pour le faire ?

Carlson et Van Demana (2008) font une modélisation intéressante des éléments qui constituent une description spatiale. Ils la décomposent alors en :

- un objet de référence, sa position est supposée être connue par les deux interlocuteurs,
- un objet à localiser (ou l'objet cible), le but de la description spatiale est de guider l'auditeur pour trouver cet objet,
- une expression spatiale qui appartient à une classe de relations spatiales (incluant des termes tels que gauche, droite, ou au dessus de, en dessous de, ... etc.).

On revient maintenant à l'exemple de la Figure 21. En imaginant un deuxième opérateur se trouvant à coté du premier. Le tableau 1 permet de faire la décomposition des descriptions spatiales que peut donner *l'opérateur1* (qui sera le locuteur) à *l'opérateur2* (qui sera l'auditeur) selon nos trois systèmes de références :

	Objet de référence	Objet à localiser	expression spatiale
Situation 1 : Système égo-centré	Le corps du locuteur	Le livre	A droite
Situation 2 : système exocentré relatif	La balle	Le livre	Devant
Situation 3 : système exocentré absolu	L'écran	Le livre	A Gauche

Tableau 4 : Eléments de la description spatiale

Que se passe-t-il alors si chacun des interlocuteurs choisit d'utiliser un système de référence différent de celui de son partenaire pour coder les informations spatiales ? Dans ce cas des ambiguïtés peuvent très vite apparaître. Reprenons notre exemple de la Figure 21 pour illustrer quelques scénarios susceptibles de produire de telles ambiguïtés. Selon les trois systèmes de références définis, trois situations peuvent être évoquées :

- **Cas de l'utilisation d'un système de référence égo-centré (situation 1) :** On remarque que la description spatiale devient « erronée » si le locuteur change de position par rapport à la table pour se mettre en face de l'auditeur (Figure 22). En effet, dans un système égo-centré, l'arrangement spatial des objets de l'environnement dépend du point de vue du locuteur. Or, les deux interlocuteurs peuvent avoir deux points de vue différents de la scène selon leur position. Ainsi, si chacun des interlocuteurs utilise son propre système de référence égo-centré, cela conduit à une incompréhension et à une ambiguïté dans la description spatiale. Par exemple, « ma droite » correspond à « la gauche de mon interlocuteur » lorsque celui-ci est en face de moi. Cette situation montre bien que les deux systèmes de références utilisés par chacun des opérateurs sont « incompatibles » car ils utilisent deux repères indiquant des directions opposées. Dans le monde réel, pour lever cette ambiguïté, chacun des interlocuteurs doit prendre en considération le point de vue de l'autre. Deux situations sont alors possibles :
 - Si les deux interlocuteurs sont immobiles (situation statique), le locuteur doit intégrer le point de vue de son partenaire lorsqu'il effectue une description spatiale.
 - Si le locuteur (ou l'auditeur) est en mouvement (situation dynamique) il doit faire une réactualisation du repérage de l'objet cible par rapport à son propre point de vue et faire ensuite une réactualisation de la description spatiale à faire pour son le partenaire.

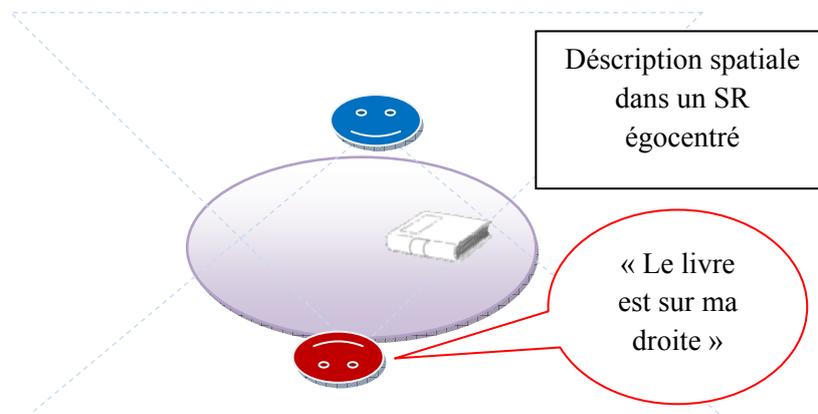


Figure 22 : description spatiale à travers un système de référence égo-centrée

Dans les deux situations, le locuteur construit un modèle mental de son partenaire pour adapter son discours. Nova (2005) nomme ce processus le *mutual modelling* : « l'habilité d'une personne à sympathiser avec la situation d'une autre » (traduction personnelle). Le locuteur dans ce cas effectue une prise de recul sur son partenaire : il doit se projeter dans le corps de son interlocuteur et imaginer ce que son interlocuteur voit (Roberts & Aman, 1993). Des recherches ont montré qu'il est plus facile de produire un message selon une perspective égocentrée, mais que pour des tâches complexes, les opérateurs ont tendance à utiliser la perspective du destinataire pour produire une description spatiale (Levelet, 1989; Miller & Johnson-Laird, 1976; Schober, 1993). Ce genre de situations arrive souvent dans les conversations de tous les jours (Schober, 1993). Par exemple quand une personne demande à une autre où se trouve un objet, celle-ci répond en prenant la perspective de la première : « sur ta droite ». Cependant, cette prise de perspective ou projection dans l'autre nécessite d'effectuer une rotation mentale ce qui peut être un handicap. En effet, Hermann et Grabowski (1994) cités par (Fischer, 2007) affirment que la prise de la perspective de l'autre nécessite un temps de traitement plus important (par rapport à l'utilisation d'une perspective égocentrée), ce qui implique une surcharge cognitive pour le locuteur. Cette surcharge cognitive est liée au fait que (i) l'opérateur doit être constamment conscient du point de vue de son interlocuteur et (ii) qu'il doit effectuer des rotations mentales pour prendre en compte le nouveau point de vue de son partenaire.

L'auditeur, de son côté, étant dans la même pièce que le locuteur, peut prendre en considération le contexte de la discussion (par exemple, la position de son interlocuteur dans la pièce) pour comprendre cette description spatiale. Il est alors question d'un échange d'indices de compréhension (processus de *grounding*) entre les interlocuteurs pour s'assurer que l'information a été correctement transmise. En effet Schober (1993) a montré l'influence du retour d'information (feedback) de l'auditeur vers le locuteur sur le choix du système de référence. Il montre également dans son étude que lors d'un transfert d'information sur la localisation d'objets dans l'espace, lorsque les deux interlocuteurs sont en coprésence et que le feedback de l'auditeur suggère qu'il a bien compris l'information transmise, le locuteur a tendance à utiliser un système égocentré. D'un autre côté, lorsque le locuteur n'a aucun feedback de son partenaire ou lorsqu'il doit imaginer sa présence, il a davantage tendance à utiliser la perspective de ce partenaire. De même, Schober (1998) montre dans une autre étude que lorsque le locuteur s'aperçoit que son partenaire a des capacités spatiales limitées, il a tendance à basculer vers l'utilisation de la perspective de son partenaire pour lui faire une description spatiale.

- **Cas de l'utilisation d'un système de référence exocentré relatif (situation 2) :** On s'intéresse maintenant à l'utilisation d'un système de référence exocentré relatif, lié à un objet non latéralisé (la balle). La description spatiale dans ce cas, bien que relative à un objet de l'espace, dépend du point de vue du locuteur (Figure 23). Ainsi, si ce dernier se déplace autour de la table, la description spatiale « devant la balle » peut devenir erronée. Dans ce cas, le contexte général et l'environnement peuvent donner des indices supplémentaires à l'auditeur pour comprendre la description spatiale. En effet, selon Verjat (1994), le contexte général permet d'orienter la scène indépendamment de la position du locuteur. Elle donne ainsi l'exemple d'une salle de classe avec un tableau. Ce dernier permet alors l'utilisation d'un objet non latéralisé (la brosse) comme objet de référence exocentré relatif sans introduire d'ambiguïté (« l'objet est devant la brosse » signifie que cet objet se trouve entre la brosse et le tableau, puisque l'avant de la salle de classe est déterminé par la position du tableau). Cette description semble être plus facile à produire par le locuteur et à comprendre par le destinataire. En effet, sa production nécessite moins d'efforts cognitifs. Cependant, elle nécessite l'existence d'un contexte qui aiderait le destinataire à mieux l'interpréter. De plus

elle semble être moins précise que la précédente (une information telle que « à côté de la balle » ne me donne pas d'indices sur le côté dans lequel je dois chercher ma cible).

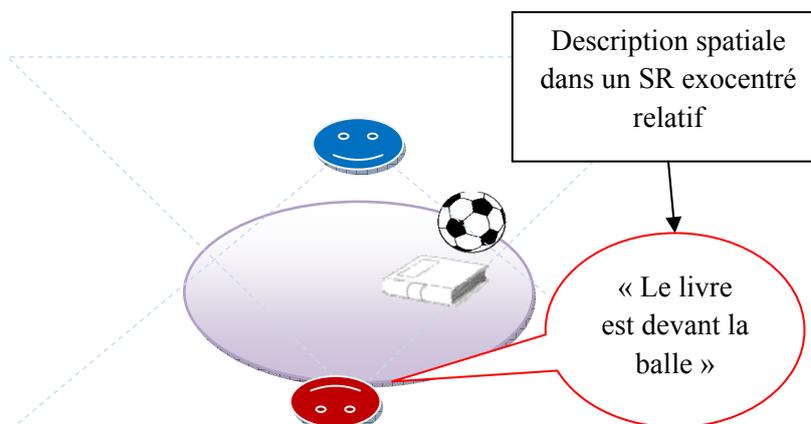


Figure 23 : description spatiale à travers un système de référence exocentré relatif

- **Cas de l'utilisation d'un système de référence exocentré absolu (situation 3) :** Explorons maintenant le cas d'une description spatiale en utilisant un système de référence exocentré (par rapport à l'écran qu'on suppose fixe et latéralisé dans ce cas, Figure 24). Cette description permet aux deux interlocuteurs de se comprendre mutuellement sans devoir se préoccuper de la position de leur partenaire dans l'espace (ou son point de vue). En effet, ce système de référence est « neutre », c'est-à-dire que les positions relatives des objets de l'environnement par rapport à l'objet de référence latéralisé et fixe est la même pour tous. Ainsi, les interlocuteurs peuvent construire des références communes à partir de leurs connaissances communes du monde qui les entourent. Cette description spatiale reste donc vraie indépendamment des points de vue des interlocuteurs. Cependant, l'utilisation d'un tel système nécessite que les deux interlocuteurs maintiennent une carte mentale de leur environnement (Majid, Bowerman, Kita, Haun, & Levinson, 2004). Cette carte sera utilisée pour faire des rotations mentales et calculer les positions relatives des objets de cet environnement. Pour ce faire, le locuteur doit alors effectuer une rotation mentale pour se projeter dans l'objet de référence et localiser la cible (« Où se trouve le livre par rapport à l'écran ? »). Cette opération lui permettra ainsi de coder cette information spatiale (« à gauche de l'écran ») et de la transmettre correctement à son interlocuteur. Ce dernier de son côté, doit effectuer une autre rotation pour restituer l'information spatiale selon sa position à lui (« Où se trouve la gauche de l'écran ? »). Il reporte alors la position relative de l'objet à localiser par rapport à son point de vue pour enfin décoder et comprendre cette information spatiale. Bien que cette description semble difficile à produire et à comprendre, elle a l'avantage de rester neutre et indépendante par rapport aux points de vue des deux partenaires. De plus elle ne nécessite pas de mise à jour constante à chaque changement de point de vue des opérateurs.

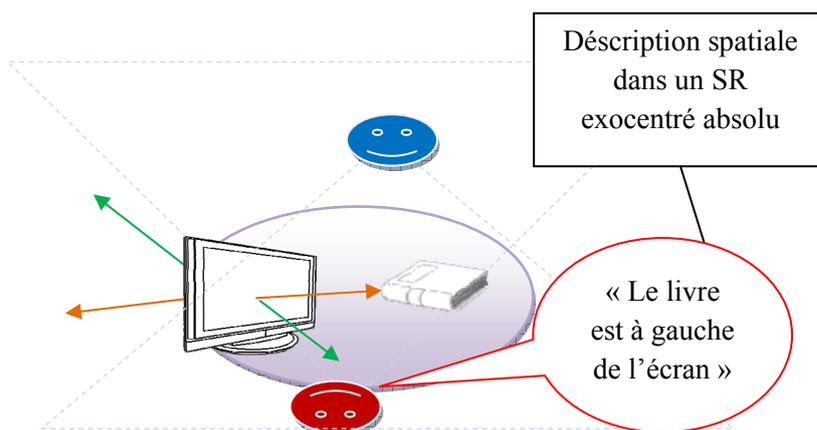


Figure 24 : description spatiale à travers un système de référence exocentré absolu

2.2 Indices complémentaires pour la communication spatiale

D'autres indices permettent également aux deux interlocuteurs de se comprendre mutuellement. Ainsi, les signaux non verbaux peuvent être employés pour lever les ambiguïtés. En effet, ces signaux permettent de coordonner l'attention conjointe des interlocuteurs. Selon Watt (1995), le regard favorise la création des références communes autour des objets de discussion et des événements. C'est le cas par exemple, lorsqu'un des interlocuteurs dirige son regard vers un objet, l'autre interlocuteur déduit que l'attention du premier est portée sur cet objet. Celui-ci devient alors l'objet d'intérêt, ce qui aide les interlocuteurs à construire leur dialogue autour de cet objet sans créer d'ambiguïté. Les gestes de pointage sont aussi utilisés pour soutenir la référenciation des objets (Lefebvre, 2008). L'opérateur peut par exemple, pointer l'objet cible et ainsi renforcer l'information transmise à travers une description spatiale pour aider son interlocuteur à lever toute ambiguïté. Par ailleurs, le partage d'un même environnement physique favorise la compréhension mutuelle des références spatiales. En effet, des études ont montré que le partage d'informations visuelles permet d'alléger les communications verbales et de favoriser les gestes de pointage et les expressions déictiques (« celui-ci », « celle-là », ...etc.) ; le RC est dans ce cas, plus explicite et se construit plus rapidement entre les interlocuteurs (Kraut, Fussell, & Siegel, 2003; Whittaker, 2003). L'exploitation de ces indices permet aux opérateurs de mieux comprendre les descriptions spatiales de leur partenaire et de lever les éventuelles ambiguïtés qui en résultent. Cependant, l'utilisation de ces indices nécessite que chacun des partenaires soit conscient de la présence de son partenaire, de sa position dans l'espace, de ses possibilités d'action ainsi que de ses activités courantes. Ceci favorise alors la construction du référentiel spatial commun.

2.3 Synthèse

Le choix d'un système de référence pour faire une description spatiale à un partenaire semble dépendre donc de plusieurs facteurs :

- le contexte général qui réunit les partenaires. Ainsi, la présence d'objets latéralisés ou encore le partage d'informations visuelles peuvent avoir une influence directe sur ce choix,
- la mobilité des opérateurs : selon que les opérateurs sont statiques ou en mouvement pendant la tâche, ils n'utiliseront pas les systèmes de référence de la même façon. Ainsi, le mouvement d'un opérateur peut induire une surcharge cognitive et rendre difficile la prise en compte du point de vue de l'autre dans le cas de l'utilisation d'un système de référence égocentré,

- les retours d'information en provenance du partenaire peuvent également influencer sur le choix du système de référence. Ainsi, un opérateur peut adapter son discours en fonction des indices de compréhension que son partenaire lui donne.

Enfin, l'influence de ces facteurs dépendra des exigences de la tâche (certaines tâches exigent que les opérateurs soient en mouvement : le partage d'un environnement physique n'est pas possible pour des tâches de guidage à distance, ...etc.).

De plus, l'utilisation de chacun des systèmes de références peut avoir ses avantages et ses inconvénients. Ainsi, le système de référence égocentré semble être le plus intuitif à utiliser. De plus, il est utilisable dans toutes les situations. Cependant, comme il est fortement dépendant du point de vue du locuteur il peut induire des ambiguïtés. Même si la prise en compte de la perspective du partenaire peut être une alternative pour le problème du changement de point de vue. Cette solution est plus difficile à utiliser car elle induit des surcharges cognitives. De plus, elle s'avère impossible à utiliser si le locuteur n'a pas d'informations sur le point de vue de son partenaire (quand les deux opérateurs sont à distance par exemple). Le système de référence exocentré relatif est le plus facile à produire pour le locuteur. Cependant, dans ce cas, les descriptions spatiales sont moins précises. De plus, l'utilisation d'un tel système nécessite la présence d'un contexte particulier et il est aussi dépendant des points de vue des opérateurs. Enfin, l'utilisation d'un système exocentré « pure » semble être la solution qui induit le moins d'ambiguïtés puisqu'il est neutre et donc indépendant des points de vue des opérateurs. Néanmoins, l'utilisation d'un tel système contraint les deux interlocuteurs à effectuer des rotations mentales. De plus, l'utilisation de ce type de système n'est possible qu'en présence d'un objet latéralisé.

Pour finir, comme le montre plusieurs études (Garrod & Anderson, 1987; Schober, 1993), chacun des interlocuteurs cherche à minimiser ses efforts cognitifs et ceux de son partenaire pour assurer la compréhension mutuelle (principe du moindre effort collaboratif introduit par Clark & Brennan (1991)). Tous les systèmes de références peuvent donc être utiles dans différentes situations. Un EVC qui nécessite des échanges d'informations spatiales doit alors être conçu pour permettre aux utilisateurs d'élaborer le plus facilement possible leur référentiel spatial commun. Il convient ainsi, de laisser aux utilisateurs la possibilité de choisir le système de référence le mieux adapté pour la situation à laquelle ils sont confrontés.

Avant de penser à la conception d'un tel environnement, les problèmes spécifiques de la communication spatiale dans le cadre des EV doivent être pris en considération.

3 Les systèmes de référence dans les EVC : Localisation des objets dans l'espace

On présente dans cette section les (i) problèmes de communication spatiale dans les EVC, (ii) les solutions proposées dans la littérature (iii) et l'hypothèse sur laquelle se base la solution que nous proposons.

3.1 Problèmes

Dans les situations de coprésence dans le monde réel, les partenaires exploitent certains aspects de leur environnement commun pour collaborer autour d'une activité spatiale. Plusieurs études ont montré que la communication et la collaboration dans ce type d'activités dépendent de la capacité des personnes à invoquer et référencer les composants de leur environnement (Goodwin & Goodwin, 1996; Guye-Vuillème, Capin, Pandzic, Thalmann, & Thalmann, 1998; Heath, Jirotko, Luff, & Hindmarsh, 1995). En coprésence, l'accès aux informations spatiales partagées est direct et facilite la construction d'un référentiel spatial commun. Cependant, du fait des caractéristiques propres aux EV, certaines informations deviennent inexploitablement directement lorsque les opérateurs collaborent à distance :

- les opérateurs ne partagent plus forcément les mêmes points de vue visuels et ne sont pas forcément conscients du point de vue de leur partenaire,
- les personnes avec lesquelles ils interagissent ne sont pas à proximité,
- le partage d'informations concernant l'activité de leur partenaire est limité,
- les objets avec lesquels ils interagissent ne sont plus à proximité.

Cela peut entraver la communication spatiale entre les opérateurs et gêner la construction du référentiel spatial commun. Par exemple, avoir un point de vue différent de l'EV peut gêner la collaboration (Schafer & Bowman, 2004). C'est ainsi que des informations référentielles de type « gauche/droite » ne sont plus pertinentes suivant le point de vue des opérateurs. En effet, si l'utilisation d'un système de référence égo-centré ne pose, à priori, aucun problème lorsque l'opérateur doit interagir seul avec un objet de l'environnement 3D, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de travailler en commun dans un EVC. Dans ce cas la compréhension entre les opérateurs lors des échanges verbaux implique :

- Dans le cas où les opérateurs ont le même point de vue : qu'ils en soient conscients.
- Dans le cas où les opérateurs ont un point de vue différent : que chaque opérateur ait un retour sur le point de vue de l'autre et intègre en permanence ce point de vue dans l'interprétation du discours. La compréhension des actions et intentions d'actions du partenaire nécessite alors d'effectuer deux rotations mentales ; la première afin de resituer le point de vue du partenaire par rapport à la figure et la seconde afin de resituer la figure par rapport à son propre point de vue.

On voit donc que dans le cas où deux opérateurs doivent collaborer dans un EV, l'utilisation d'un référentiel égo-centré peut vite devenir problématique et compromettre l'établissement d'un référentiel commun efficace. D'un autre côté, la gestuelle et les expressions faciales sont rarement reproduites dans un EV. En effet, leur utilisation nécessite des dispositifs matériels et logiciels assez onéreux (Valin, Francu, Trefftz, & Marsic, 2001). On ne peut donc pas utiliser facilement ces indices pour faciliter la collaboration entre les partenaires. La communication spatiale ne se base, dans ce cas, que sur les systèmes de références. L'utilisation de ces derniers doit donc être adaptée aux spécificités des

EV, ce qui permet aux utilisateurs de se consacrer à leur tâche principale, sans que l'activité de référencement d'objets ne vienne les perturber. Ceci implique une nouvelle forme d'interaction collaborative entre les partenaires autour des activités spatiales.

3.2 Quelles sont les possibilités (littérature et solution proposée)

Pour faciliter la communication spatiale et la référencement des objets dans les EVC plusieurs solutions ont été proposées :

3.2.1 Partage du même point de vue de l'EV

Cette solution consiste à donner le même point de vue à tous les utilisateurs de l'EVC. Le WYSIWIS, l'acronyme du *What You See Is What I See* (« ce que tu vois est ce que je vois »), est un paradigme utilisé dans le domaine du TCAO (Stefik, Bobrow, Lanning, & Tatar, 1987). Dans un EVC, il transcrit le principe du partage du même point de vue de la scène virtuelle commune entre tous les partenaires à tout instant. Chacun des participants dans ce cas, a la possibilité de modifier le point de vue commun. Ceci est répercuté sur tous les points de vue de ses partenaires. Cockburn et Greenberg (1998) ont comparé quatre niveaux de partage de point de vue :

- un WYSIWIS strict (le même point de vue de la simulation à tout moment),
- un WYSIWIS souple (le même état de la simulation mais différents points de vue possibles),
- la possibilité de modifier localement l'état de la simulation sans que cela soit visible pour les partenaires,
- la possibilité de modifier l'état global de la simulation à sa guise et à tout moment.

Les résultats de cette étude ont montré que la condition du WYSIWIS strict est la meilleure pour encourager les discussions entre partenaires. En effet, le partage du même point de vue semble faciliter la construction d'un RC. Les trois autres conditions ont introduit des problèmes d'incompréhension. Par la suite, d'autres variantes du WYSIWIS ont été proposées. Ainsi, Valin, et al. (2001) ont développé un EVC basé sur un WYSIWIS « relâché ». Les utilisateurs ont dans ce cas le choix de partager ou non le même point de vue. Lorsque le point de vue est partagé, chacun des partenaires peut prendre le contrôle pour manipuler le point de vue. Les résultats montrent que le partage du point de vue est efficace pour des tâches d'exploration de l'environnement et des objets (trouver les différences entre deux bureaux virtuels). Pour une tâche de manipulation d'objets (déplacement des fournitures d'un bureau virtuel), les utilisateurs se sont moins servis du partage de point de vue.

On peut donc supposer que le partage d'un même point de vue facilite la construction d'un référentiel spatial commun, puisqu'il permet de faire des descriptions spatiales en utilisant un système de référence égocentré qui sera le même pour tous. Bien que cette solution soit efficace pour la construction du référentiel spatial commun, elle est mal adaptée pour des tâches synchrones de manipulation d'objets. En effet, dans une tâche collaborative synchrone, où des partenaires ont la possibilité de manipuler en parallèle des objets différents, chacun des partenaires a besoin d'atteindre ses objectifs propres (explorer l'objet, déplacer l'objet, ...etc.). Le partage strict du même point de vue peut gêner l'accomplissement de ces sous-tâches et restreindre l'expérience des utilisateurs dans l'EV (Stefik, Bobrow, Lanning, & Tatar, 1987).

3.2.2 Retour sur le point de vue de l'autre

Cette deuxième approche consiste à donner des retours sur le point de vue du partenaire. C'est donc une autre forme relâchée du WYSIWIS. Dans ce cas, le point de vue d'un utilisateur de l'EV est

présenté explicitement dans une fenêtre juxtaposée séparée ou un écran dédié pour le partenaire. Cette solution permet à la fois d'avoir un retour sur les actions du partenaire et de montrer les objets qui se trouvent dans son champ visuel. Ceci permet alors de faciliter la référenciation des objets et permet de mieux comprendre les actions du partenaire tout en ayant sa propre vision de l'EV. En effet, avoir un retour sur la vue du partenaire facilite l'utilisation de la perspective de ce dernier pour faire référence aux objets présent dans son champ visuel. Dans ce cas, le locuteur peut simplement se baser sur le système de référence égocentré de son partenaire puisqu'il peut voir ce que celui-ci voit. Cette solution a été aussi bien utilisée dans les médiaspace (Gaver, Sellen, Heath, & Luff, 1993) que dans les EVC (Pang & Wittenbrink, 1997; Provenzano, Delzons, Plénacoste, & Vandromme, 2007). Avoir des informations sur ce que son coéquipier peut voir et faire peut aider les partenaires à mieux collaborer dans l'EV (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford, & Greenhalgh, 1998; Spante, Schroeder, & Axelsson, 2004). Cependant, avoir un retour sur le point de vue du partenaire présente certains problèmes. C'est le cas par exemple dans le système MTV présenté par Gaver et al. (1993). Dans cette étude expérimentale, les utilisateurs distants d'un médiaspace avaient différentes vues de leur partenaire et de son environnement de travail. Une vue de face de leur partenaire (*Face-to-Face view*), une vue présentant la configuration globale du partenaire dans son environnement de travail (*In-Context view*) et une vue focalisée sur les objets manipulés par le partenaire (*Desktop view*). Chacune des vues était présentée sur un écran séparé. Les participants devaient accomplir une tâche simple nécessitant la référenciation des documents et autres objets de l'environnement de leur partenaire. Les résultats de l'étude montrent que les participants ont eu beaucoup de difficultés à accomplir la tâche. Ces difficultés étaient liées principalement à des incompréhensions pour déterminer les objets référencés et les objets pointés par leur partenaire. Ces problèmes provenaient essentiellement de la discontinuité de l'espace visuel qui était affiché sur les trois écrans. En effet, les participants avaient des difficultés à mettre en correspondance les différentes vues qui leurs étaient présentées et à réassembler les différentes parties. Ainsi, la fragmentation des images du partenaire et celles des objets auxquels ils faisaient référence empêchaient les partenaires de construire correctement une orientation mutuelle de l'espace. Ce qui induisait des erreurs de compréhensions et compliquait l'élaboration d'un référentiel spatial commun.

On peut donc supposer que donner un retour visuel du point de vue du partenaire sur l'EV partagé peut aider les utilisateurs à partager un espace référentiel commun. Cependant, le problème de la discontinuité de l'espace visuel d'un utilisateur entre son propre point de vue et celui de son partenaire peut induire des problèmes. En effet, l'opérateur dans ce cas tente continuellement de reconstruire la cohérence de la scène fragmentée pour connaître la position de son partenaire dans l'EV et ainsi comprendre les descriptions spatiales de celui-ci. Ceci conduit inévitablement à une surcharge cognitive et à une baisse des performances de résolution de la tâche collaborative principale.

3.2.3 Utilisation des avatars

L'utilisation des avatars dans les EVC est une autre alternative pour pallier les problèmes de référenciation d'objet. Un avatar correspond à l'incarnation de l'utilisateur dans un corps virtuel, visible par lui-même et par les autres utilisateurs de l'EV (Benford, Greenhalgh, Bowers, Snowdon, & Fahlén, 1995). Cette représentation peut aller d'une simple image 2D de l'utilisateur à un personnage graphique en 3D très sophistiqué. Cependant, pour des raisons de performances ou de simplification des messages véhiculés, il est courant d'utiliser des représentations symboliques simplifiées dans les EVC (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford, & Greenhalgh, 1998). Les avatars sont utilisés dans les EV pour simuler la présence de l'utilisateur dans l'EV. Ils permettent alors de localiser un utilisateur dans le monde virtuel, de connaître son orientation dans l'espace et de comprendre certaines de ses actions.

On parle alors du paradigme WYSIWITYS (*What You See Is What I Think You See*) dans lequel un utilisateur n'a pas de retour direct du champ visuel du partenaire. Cependant, il peut inférer implicitement cette information à partir de la position de l'avatar du partenaire dans l'EV (Smith, Hixon, & Horan, 1998). Plusieurs études sur les CVE ont utilisé les avatars comme solution aux problèmes de référenciation d'objets (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford, & Greenhalagh, 1998; Ott & Dillenbourg, 2001; Stefik, Bobrow, Lanning, & Tatar, 1987). Ils permettent à chacun des utilisateurs d'avoir son propre point de vue et de connaître la position de son partenaire et donc d'inférer son point de vue.

Dans leur étude, Ott et Dillenbourg (2001) ont testé l'efficacité de deux outils pour faciliter la référenciation des objets entre deux partenaires dans un EV. Le premier outil consistait à utiliser une représentation de chacun des participants (un avatar en forme de cône) qui permettait de localiser le partenaire dans l'EV (sans connaître la direction de son regard). Cet outil représentait une métaphore de *proximité à l'objet référé*³. L'autre outil consistait à utiliser une métaphore visuelle (*View Awerness Tool*) qui permettait à un opérateur de connaître l'objet visualisé par son partenaire (en mettant en valeur l'objet référé). Leurs résultats montrent que la proximité à l'objet d'intérêt permettait de clarifier le contexte et de réduire donc les ambiguïtés liées à la référenciation des objets. D'un autre côté, la mise en valeur de l'objet visualisé n'a pas eu d'effet sur la référenciation d'objet.

Cependant, bien que la métaphore de proximité aux objets d'intérêt semble être efficace pour améliorer la compréhension mutuelle liée à la référenciation d'objet, il est clair que, pour des tâches de coplanification et de manipulation d'objets dans l'espace, l'outil de proximité risque de ne pas être très utile. En effet, cela induirait des déplacements inutiles à chaque fois qu'un utilisateur veut désigner un objet. De leur côté, Hindmarsh et al. (1998) ont utilisé des représentations simples en forme d'humanoïdes (pourvu d'une tête, d'un torse et de membres reconnaissables). Ces représentations permettaient de reconnaître des actions simples telles que le pointage d'un objet avec la main et la direction du regard. Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de ces avatars a été bénéfique pour la référenciation d'objets. Cependant, plusieurs nouveaux problèmes ont été identifiés. Tout d'abord, le champ visuel réduit (55°) a engendré une fragmentation de l'espace des actions et les objets de discussion. Par exemple, un utilisateur ne pouvait pas voir un geste de pointage et l'objet pointé en même temps. Cette fragmentation gênait les utilisateurs qui avaient recouru à des explicitations verbales de leurs actions pour pallier ce problème. Ceci a contribué à détourner l'attention des utilisateurs de leur tâche principale (réorganisation spatiale d'un bureau virtuel). La présence de l'avatar a également causé des problèmes d'occultations du champ visuel du partenaire. Ceci l'empêchait parfois de voir les actions de son partenaire. Un autre problème identifié était le manque d'informations sur les actions de l'autre. En effet, certaines actions n'étaient pas reproduites sur l'avatar (déplacement d'un objet par l'avatar par exemple). Ceci impliquait une incompréhension des actions du partenaire et gênait donc la collaboration.

On peut alors conclure que l'utilisation des avatars peut être efficace dans certaines situations collaboratives lorsqu'il s'agit de donner des informations sur la position du partenaire dans l'EV. Cependant, l'utilisation de représentations simplifiées peut restreindre la compréhension des actions du partenaire. L'utilisation de représentations graphiques plus sophistiquées reproduisant des comportements humains plus complexes (tels que les expressions faciales et les gestes involontaires) peut être une solution. Cependant, celle-ci nécessite des équipements spécifiques souvent chers, qui

³ Cette métaphore consiste à dire que l'utilisateur se place à proximité d'un objet pour le désigner

sont intrusifs ou qui manquent de robustesse. Enfin, il est à noter que ces représentations sophistiquées sont parfois inutiles pour une variété de tâches collaboratives (Valin, Francu, Trefftz, & Marsic, 2001).

3.2.4 Autres techniques : représentation explicite du point de vue de l'avatar

D'autres alternatives ont été proposées pour compenser certains des problèmes évoqués précédemment. C'est ainsi que Fraser, Benford, Hindmarsh, & Hea (1999) ont proposé deux nouvelles techniques pour résoudre les problèmes de l'utilisation de l'avatar dans l'EVC. La première, consistait à utiliser des caméras à grand angle (fish-eye) pour étendre les champs visuels des utilisateurs. Cependant, ce type de caméras introduit des distorsions ce qui limite leur utilité. L'autre technique consistait à représenter explicitement le champ visuel du partenaire par des lignes virtuelles qui s'étendent de son avatar aux objets présents dans son champ visuel. Cependant les résultats ont montré que ces lignes n'ont pas été très efficaces pour informer les participants de ce que leur partenaire pouvait voir. Une technique similaire a été utilisée par Pang et Wittenbrink (1997) dans leur système *CSpray* de visualisation d'informations. Leur technique consistait à utiliser un cône pour représenter le champ visuel du partenaire. Cependant les auteurs n'ont pas présenté d'évaluation de cette technique. De leur côté Valin, Francu, Trefftz, & Marsic (2001) ont utilisé des télépointeurs : une représentation primitive du partenaire en forme de flèche dirigée selon la direction de son regard. L'utilisation de ces télépointeurs a été comparée à l'utilisation du système de partage de point de vue (un WYSIWIS relâché). Leur résultats montrent que les utilisateurs préféraient partager leur point de vue quand cela était possible plutôt que d'utiliser les télépointeurs. Enfin les radars 2D combinés avec des vues perspectives sont très utilisés dans les jeux vidéos ainsi que dans certains EVC (Schafer & Bowman, 2004). Bien que ces radars semblent être efficaces pour certaines tâches de navigation en permettant aux utilisateurs de localiser leurs partenaires, leur utilité semble plus limitée pour des tâches de manipulation d'objets dans un espace virtuel de taille limitée.

3.3 Alternative proposée : paradigme de la référence spatiale fixe

Dans la revue de littérature précédente, certaines possibilités proposées par les chercheurs pour améliorer la communication spatiale dans les EVC ont été exposées. Les solutions proposées traitent essentiellement **le problème de divergence entre les points de vue des opérateurs et leurs difficultés à élaborer un référentiel spatial commun lorsqu'ils travaillent à distance à travers un EV**. Cependant, ces solutions comportent encore certaines lacunes et induisent un certain nombre de problèmes qui empêchent une bonne collaboration dans les activités spatiales. Ce domaine de recherche reste donc ouvert et des améliorations quant à la conception des EV favorisant la collaboration spatiale sont encore nécessaires.

Notre contribution traite le problème sous un autre angle. En effet, l'idéal serait que l'EV offre aux opérateurs la possibilité d'utiliser implicitement des repères visuels qui les aideraient à comprendre mutuellement leurs descriptions spatiales. **Une façon de faire consiste à favoriser une représentation de l'espace centrée sur l'objet et pas uniquement sur l'utilisateur (en évitant les représentations explicite ou implicite des points de vue des opérateurs dans l'EV)**. Cela revient à d'abord se baser sur les propriétés de l'environnement lui-même avant d'y superposer des techniques d'interactions pour palier ces carences. Les objets doivent pouvoir être localisés en référence aux éléments de l'environnement de l'opérateur (en utilisant un système de référence exocentré ou relatif) et non plus uniquement en référence aux opérateurs (ce qui permet de se détacher de la contrainte du point de vue égocentré propre à chaque opérateur). Ce type de localisation est bien adapté pour faire une description spatiale d'une salle ou d'une carte. En effet, Erickson (1993) explique les utilisateurs agissent en fonction des possibilités que leurs offrent les contraintes spatiales de leur environnement.

Dans l'EV, même si les utilisateurs ne partagent pas le même point de vue, ils doivent pouvoir partager et utiliser d'autres indices afin de faire des descriptions spatiales de leur environnement. On peut donc supposer que, lorsque la situation devient suffisamment complexe (des points de vue différents, des manipulations multiples des objets de l'environnement...), les opérateurs privilégient spontanément l'utilisation d'un référentiel exocentré lorsqu'elle est rendue possible par la présence d'éléments contextuels dans l'environnement. Ce système de référence peut conduire à une meilleure coordination des actions entre les partenaires et à réduire les ambiguïtés liées à la référenciation des objets. Notre contribution est donc basée sur le paradigme de la référence spatiale fixe :

La présence d'un repère spatial dans l'EV peut jouer un rôle fonctionnel pour améliorer la collaboration entre les opérateurs.

Ce paradigme sera développé et détaillé dans la section suivante. La Figure 25 montre un exemple de l'utilisation d'une référence spatiale fixe comme repère pour faire des descriptions spatiales. Dans ce cas, l'utilisation d'un système exocentré permet de lever l'ambiguïté d'une description spatiale égocentrée et diminue considérablement le nombre de rotations mentales.

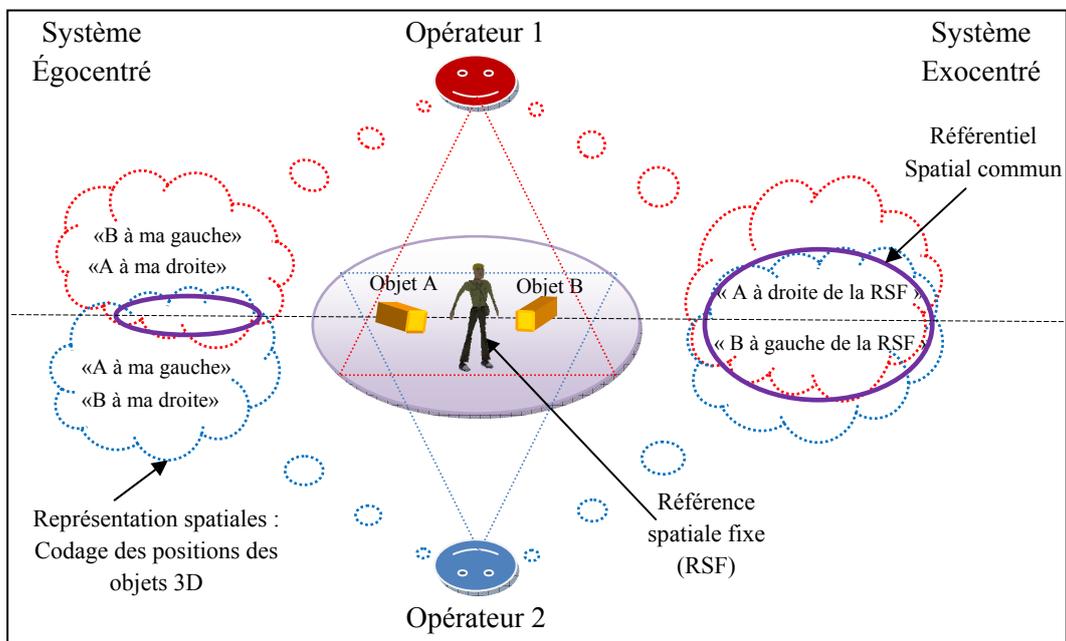


Figure 25 : Utilisation des systèmes des références dans un EVC. Notre hypothèse met en avant l'utilisation de la référence spatiale fixe pour un système exocentré.

Une étude expérimentale pour évaluer l'efficacité de cette solution a été mise en place.

4 Etude expérimentale

4.1 Analyse d'une tâche simple : Résolution d'un problème spatial d'assemblage de polyminos

Un polyminos est le nom donné à un assemblage connexe de carrés. On parle d'un mino (1 carré), un domino (2 carrés), un trimino (3 carrés), un tétramino (4 carrés),...etc. Les carrés qui composent un polyminos peuvent être agencés de différentes façons ce qui donne des formes différentes aux polyminos composés de plus de 2 carrés. Les polyminos ont donné naissance à différents jeux tels que *Tetris* et *Pentaminos*.

4.1.1 Choix de la tâche

Pour cette étude, une tâche de résolution de problème spatial simple a été choisie. Le problème est de type puzzle et consiste à manipuler et assembler un certain nombre de pièces pour aboutir à une configuration spécifique (Butler, 1994). Ce type de tâche est souvent utilisé comme tâche « prétexte » pour étudier la collaboration dans les EV (Roussou, Oliver, & Slater, 2008; Roberts, Wolff, Otto, & Steed, 2003; Wideström, Axelsson, Shroeder, Nilsson, Heldal, & Abselin, 2000). En effet, la résolution d'un problème spatial en collaboration nécessite la confrontation des représentations spatiales individuelles de chacun des participants pour construire la solution commune. Ce type de tâche devrait donc nous permettre d'atteindre notre objectif, à savoir : l'étude de la communication spatiale dans l'EV et vérifier l'utilité de la présence d'une référence spatiale fixe pour l'élaboration d'un référentiel spatial commun. Le choix de cette tâche est justifié par :

- C'est une tâche simple, connue et qui permet la réflexion de deux collaborateurs
- Cette tâche permet de recruter des personnes motivées, parmi un public large d'étudiants (jeu de casse tête),
- Cette tâche est assez épurée, n'introduisant pas d'éléments perturbants la possibilité d'étudier la collaboration potentielle des personnes.
- Il est possible d'avoir une réflexion commune pour résoudre le problème,
- L'habileté manuelle ou la dextérité entre peu en jeu,
- La situation reste simple à comprendre, mais une difficulté graduelle des réalisations peut favoriser les échanges entre partenaires.

Les pièces choisies dans le cadre de cette étude sont des tétramino 3D : des polyminos composés de 4 cubes (voir la Figure 26). Ces pièces ont des formes abstraites et géométriques et devaient être assemblées pour former un modèle tridimensionnel connu. Cependant, avant la conception de l'EV pour l'étude expérimentale, une analyse de l'activité a été effectuée pour extraire les contraintes liées à la tâche choisie. Ces contraintes ainsi que les hypothèses posées ont servi de guide pour la conception de l'EV.

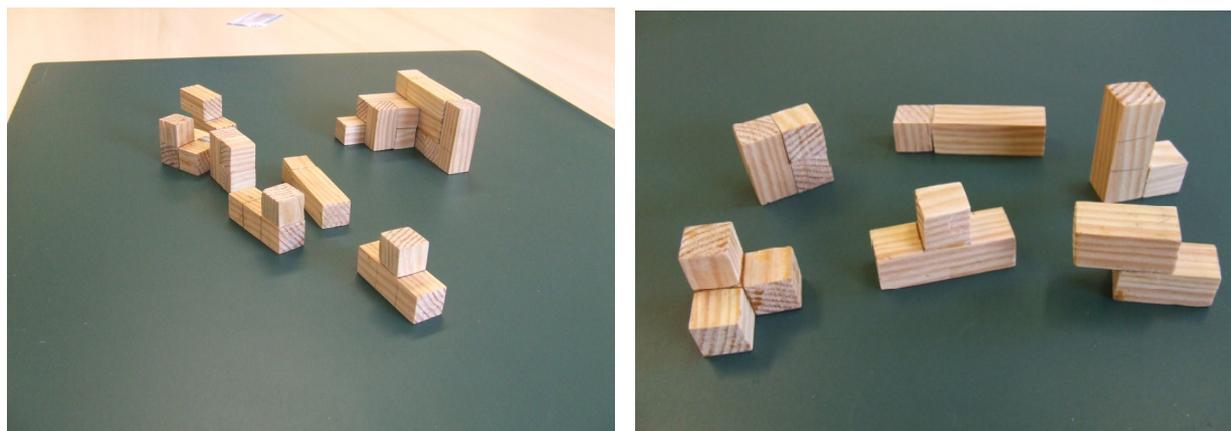


Figure 26 : Analyse de la tâche à partir d'une situation réelle

4.1.2 Analyse de l'activité

La procédure suivie pour réaliser l'analyse de l'activité consistait à observer des participants pendant la réalisation de la tâche. 8 collègues (doctorants de l'École des Mines de Nantes) ont participé à cette phase d'analyse. Les participants devaient reconstruire individuellement ou collectivement 8 figures différentes. Les figures étaient réalisées à partir de pièces (tétraminos) en bois déposées sur une table (voir la Figure 26). L'analyse de l'activité était basée sur deux techniques (Bisseret, Sébillotte, & Falzon, 1999): la technique des protocoles verbaux et la technique pourquoi/comment.

La Technique des Protocoles Verbaux TPV

Cette technique consiste à demander au sujet de réaliser la tâche à voix haute. Les données recueillies sont des enregistrements audio (ou vidéos) pour analyser les comportements et les verbalisations. Cette méthode permet d'accéder au processus de raisonnement pendant la réalisation de la tâche. Les verbalisations simultanées permettent d'accéder à des informations non accessibles par l'observation. Cette méthode était utilisée afin d'identifier et de comprendre les processus mentaux pour résoudre le problème. Le choix de cette méthode nécessite que les verbalisations produites n'altèrent pas le déroulement de l'activité.

La Technique du Pourquoi ? Comment ? TPC

Cette technique consiste à faire une interview semi-dirigée grâce à des questions « Pourquoi ? Comment ? » après la réalisation de la tâche. Les questions étaient choisies à partir des observations obtenues par la première méthode. C'est donc une demande d'explications a posteriori. Les questions de type « pourquoi » permettent d'identifier les buts et préciser les tâches (identification des tâches principales, leur objectifs et les conditions nécessaires à leur exécution). Les questions de type « comment » permettent de mettre en évidence la décomposition des tâches en sous-tâches (procédure de réalisation), c'est-à-dire les actions nécessaires pour atteindre les buts (identifiés précédemment). L'utilisation de cette technique avait pour but de faire la description de la tâche principale sous forme d'un arbre de décomposition hiérarchique en tâches et sous tâches. Elle a permis de faire une formalisation sous forme d'un modèle de la tâche en faisant ressortir son aspect hiérarchique.

4.1.3 Résultats de la phase d'analyse de la tâche

Cette phase d'analyse de l'activité a permis de définir la hiérarchie des tâches nécessaires à la résolution du problème mais aussi de mettre en évidence les stratégies de résolution utilisées par les participants.

Le Modèle hiérarchique des tâches : explication des tâches et des sous tâches

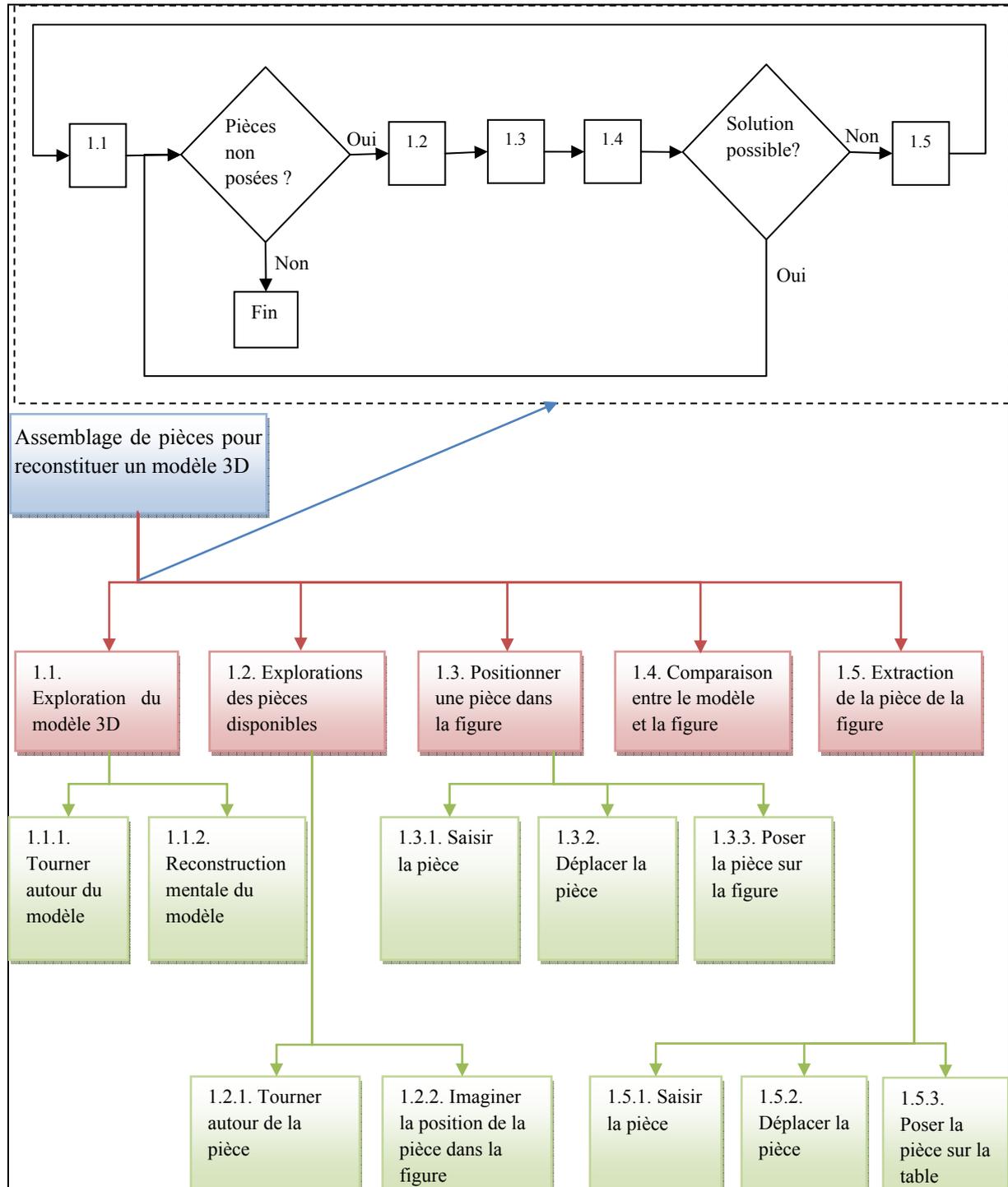


Figure 27 : Modèle hiérarchique des tâches

Les Stratégies de résolution

Deux stratégies de résolutions ont été observées et correspondent aux stratégies couramment envisagées pour ce type de problèmes : une stratégie guidée par les données qu'on appelle stratégie d'essais-erreurs et une stratégie guidée par les buts qu'on appelle une stratégie fin-moyen. Caulier et Houriez (1996) cité par Caplat (2001) définissent ces deux types de stratégies de résolution :

« La stratégie de type fin et moyen se rencontre dans les situations où l'opérateur a la possibilité d'évaluer les écarts au but et de tirer parti de tels écarts pour choisir les actions les mieux à même de les résoudre ». Dans notre problème, la tâche de reconstruction mentale du modèle (c'est-à-dire imaginer la structure de la figure et essayer de la reconstruire à partir des pièces disponibles, la tâche 1.1.2 de la Figure 27) devient très importante pour pouvoir choisir les positions les mieux adaptées pour chaque pièce. Si cette tâche est correctement exécutée, ceci devrait réduire le nombre d'erreurs.

« La stratégie d'essais-erreurs consiste, dans chaque état, à explorer des chemins possibles de l'espace de recherche pour tenter d'atteindre le but. Quant un chemin s'avère infructueux, l'opérateur revient à un état antérieur pour explorer un autre chemin ». Dans notre problème de résolution spatiale, ceci devrait se traduire par la négligence de la tâche « reconstruction mentale du modèle » (la tâche 1.1.2 de la Figure 27). Chaque erreur sera la conséquence de l'exécution de la tâche « extraction de la pièce de la figure » (la tâche 1.5 de la Figure 27).

La stratégie de type fin et moyen devrait donc permettre d'avoir de meilleures performances pour accomplir la tâche. Cependant, elle semble moins facile à utiliser dans une situation collaborative. En effet, les opérateurs doivent se mettre d'accord pour choisir à l'avance les actions les mieux adaptées pour résoudre le problème. Ils doivent alors faire ensemble la reconstruction mentale de la figure. Cette reconstruction mentale nécessite de faire des descriptions spatiales du type : un objet X se trouve à l'emplacement de la figure. Ainsi, ils doivent élaborer un référentiel spatial commun assez efficace pour pouvoir faire ces descriptions. Dans le cas où les opérateurs ne parviendraient pas à élaborer de référentiel spatial commun, ils devraient davantage opter pour une stratégie de résolution essais-erreurs qui nécessite moins de coordinations entre les opérateurs. En effet, ils pourront effectuer les actions sans nécessairement les décrire à l'avance. Le choix de la stratégie de résolution peut donc être un bon indicateur de la qualité du RC construit entre les opérateurs.

Dans cette analyse de l'activité il a été constaté que les interlocuteurs qui échangeaient le plus sur les positions spatiales des objets utilisaient davantage la stratégie fin/moyen. Dans ce cas les interlocuteurs utilisaient davantage le système de référence égocentré ou à défaut les gestes déictique pour se faire comprendre. Cette analyse nous renforce donc dans l'idée que la construction d'un référentiel spatial commun efficace est impérative pour ce type de tâche, et implique la conception d'un EV adapté permettant de pallier l'inutilité voire l'impossibilité d'utiliser les références égocentrées et les gestes déictiques pour ce type de tâche.

Les Choix pour la conception de l'EV

Cette analyse de l'activité a permis de faire certains choix quant à la conception de l'EV. Ainsi, nous nous sommes arrêtés sur la reproduction de figures simples, chacune construite à partir de plusieurs tétramino différents. Chaque figure devra être conçue de façon à ce que la référence spatiale fixe (lorsqu'elle sera présente) puisse se trouver en son centre. L'idéal serait donc de concevoir des figures ouvertes et plus ou moins irrégulières. Les figures à reproduire seront (représentées) en 3D. Il ne sera pas possible de discerner les différents tétramino qui composeront la figure, mais chacun des petits cubes formant un tétramino sera matérialisé (contours noirs). Les figures seront toutes composées d'un ensemble de petits cubes convexes. Les participants n'auront à leur disposition pour reproduire la figure, que les tétramino utilisés pour construire le modèle. Plusieurs contraintes seront introduites pour éviter que les tétramino soient utilisés comme référence externe à la place du repère spatial fixe :

- Les tétramino auront des formes géométriques assez proches,
- Les tétramino ne seront pas latéralisés,
- Une couleur unique sera utilisée pour tous les tétramino.

Pour distinguer la figure en construction de la figure à reproduire, le nom de « **modèle** » a été donné à cette dernière. Le modèle est posé à côté de la figure en construction.

Pour les tâches d'exploration du modèle et de comparaison entre le modèle et la figure en construction, chaque opérateur aura la possibilité de tourner autour de la figure et de choisir le point de vue le plus approprié. Le changement du point de vue sera aussi utile pour la tâche de déplacement des pièces. Par ailleurs, le point de vue choisi sera propre à l'opérateur et pourra donc être différent de celui de son partenaire. Ceci devrait compliquer la tâche aux opérateurs qui devront échanger constamment pour avoir des informations sur la position de leur partenaire et cela devrait donc les inciter à utiliser préférentiellement la référence spatiale fixe lorsqu'elle sera présente. De plus, les solutions pour chaque modèle n'étant pas uniques et les positions des tétramino dans le modèle étant interdépendantes, ceci devrait encourager les débats et les discussions entre les partenaires pour trouver la solution.

Chaque opérateur, aura la possibilité de choisir une pièce pour l'explorer localement (la faire tourner sur les 3 axes).

L'évaluation de la complexité des figures

La complexité de 10 figures différentes a été testée (dont 6 étaient composées de 6 tétramino chacune et deux étaient composées de 8 tétramino chacune). Les participants ont réussi à finir la plupart des figures en un temps raisonnable (entre 5 et 10 minutes pour les figures à 6 tétramino et entre 10 à 20 minutes pour les figures à 8 tétramino). Ainsi nous avons pu vérifier que le réassemblage des modèles était bien réalisable en un temps acceptable dans l'EV (estimé entre 10 et 15 minutes pour les figures à 6 tétramino). Le temps de résolution dans l'EV était bien évidemment majoré afin de compenser la manipulation indirecte des objets à l'aide de joysticks. A la fin, 5 modèles (tous à 6 tétramino) ont été retenus. Ceci a permis de prévoir une durée moyenne de 1h20 par session (20 minutes pour les consignes et la prise en main de l'interface et 1h pour résoudre les 5 modèles).

4.2 Objectifs et Hypothèses

Nous avons vu qu'en dépit de l'importance des systèmes de référence dans les CVE et de leur influence sur la communication spatiale et donc sur la construction d'un référentiel spatial commun, peu de recherches traitent de ce problème. Dans cette étude exploratoire, il est question de se pencher sur le problème du choix d'un système de référence par les opérateurs lors de la description spatiale de leurs actions en fonction des possibilités offertes par l'EV. En étudiant les stratégies de collaboration entre les opérateurs, l'objectif est d'étudier :

- l'impact du repère visuel fixe sur le système de référence privilégié : l'objectif est de déterminer le rôle des repères visuels fixes dans l'espace pour localiser les objets et décrire les actions.
- L'impact du système de référence utilisé sur la construction et la mise à jour d'un référentiel spatial commun entre les partenaires et donc plus généralement la construction du RC.
- Ceci doit avoir des répercussions directes sur :
- La collaboration : l'efficacité du référentiel spatial commun doit accroître la compréhension mutuelle. Il doit donc, également avoir des répercussions sur la répartition des tâches et réduire le leadership entre les partenaires.
- La performance : un bon référentiel spatial commun doit influencer sur la stratégie privilégiée pour effectuer les tâches : la stratégie fins-moyens basée sur la planification des actions est plus facile à utiliser lorsque les utilisateurs se comprennent mutuellement. Ceci permet d'avoir

de meilleurs résultats que l'utilisation d'une stratégie d'essai-erreur. Une meilleure compréhension mutuelle doit donc conduire à une diminution de la durée d'accomplissement de la tâche et du nombre d'erreurs.

- Perception de la difficulté de la tâche : plus les utilisateurs se comprennent mutuellement, moins la tâche est perçue comme étant difficile.
- Conscience de la situation : Une planification préalable des actions permettrait une meilleure compréhension des actions ou intentions d'action du partenaire. Ceci devrait permettre d'augmenter le sentiment de coprésence avec le partenaire.

Selon les objectifs fixés ci dessus, nous avons choisi, à travers notre étude expérimentale de vérifier les hypothèses suivantes :

- **L'hypothèse H1** : En présence d'un repère spatial fixe, les opérateurs devraient utiliser davantage les systèmes de référence exocentré absolu et relatif que le système de référence égocentré,
- **L'hypothèse H2** : L'utilisation d'un système de référence exocentré devrait permettre aux opérateurs d'élaborer un référentiel spatial commun plus vaste incluant d'avantage de représentations spatiales communes de l'EV et des actions possibles,
- **L'hypothèse H3** : En agissant sur l'élaboration du référentiel spatial commun, le choix du système de référence utilisé devrait avoir une influence sur les formes de collaboration qui se développent entre les opérateurs. On s'attend donc à voir des profils de collaboration différents en fonction de la présence ou non du repère spatial fixe. La collaboration sera évaluée en termes de performance et de déroulement optimal : élaboration du RC, compréhension mutuelle, stratégies, le sentiment de coprésence,...etc.,
- **L'hypothèse H4** : l'élaboration d'un RC efficient permet d'accroître le sentiment de coprésence.

4.3 Architecture logicielle

Après avoir imaginé les détails de conception de l'EVC, une partie de notre travail a été consacrée à son développement. Pour ce faire, l'environnement de prototypage rapide d'applications 3D *Virtools* a été utilisé. L'EV était déployé sur deux machines.

Les objets 3D ont été modélisés en utilisant le logiciel 3ds max 9 (*Autodesk*) et importés par la suite vers l'environnement *Virtools* (*Dassault Systèmes*).

En utilisation la plateforme libre *Quanta* (utilisée pour le développement d'applications réseau), nous avons implémenté un module client/serveur qui a permis d'assurer la communication entre les deux applications 3D sur les machines distantes. La figure suivante présente un schéma détaillé de l'architecture logicielle utilisée :

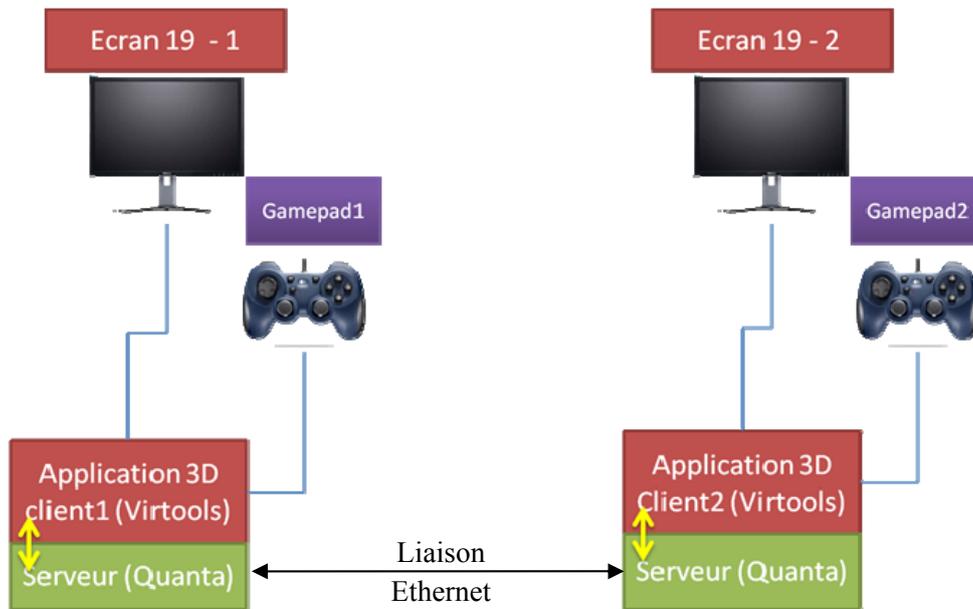


Figure 28 : Architecture logicielle

4.4 Méthode

4.4.1 Participants

44 étudiants de l'université de Nantes et de l'Ecole centrale de Nantes, âgés de 19 à 27 ans ont participé à cette étude. Tous les participants ont préalablement répondu à un questionnaire pour évaluer leur niveau d'expertise quant à l'utilisation des jeux vidéo et des Modeleur 3D (le niveau d'expertise a été mesuré par leur fréquence d'utilisation des jeux vidéo et/ou modeleurs 3D sur une échelle à 5 échelons). Les résultats des questionnaires ont montré que 11 participants pratiquaient les jeux vidéo au moins une fois par semaine, 12 participants pratiquaient au moins une fois par mois et 21 participants pratiquaient moins d'une fois par mois. Les volontaires ont par la suite été répartis en 22 groupes : 12 binômes masculins et 10 binômes féminins d'une façon homogène selon leur niveau d'expertise. Aucun des participants n'avait une connaissance préalable de l'environnement virtuel ni des objectifs de l'étude. Les participants au sein d'un même binôme ne se connaissaient pas entre eux avant l'expérience. Ceci avait pour objectif d'éviter que les partenaires aient un Référentiel Commun préalable à la tâche. Les présentations entre les participants se faisaient en 5 minutes avant le début des sessions expérimentales. Tous les étudiants ont reçu une gratification (d'un montant de 10€ sous forme de bon d'achat Fnac) pour les remercier de leur. Le but de cette gratification était essentiellement de motiver les étudiants à les impliquer davantage dans l'étude.

4.4.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consistait en deux écrans LCD 17 pouces identiques et deux PC (Intel Pentium VI avec 512mo de mémoire vive et une carte 3D) reliés par un réseau Ethernet. L'EV créé était composé d'une figure constituée d'un assemblage de 24 cubes (le modèle 3D à reproduire) et de 6 pièces blanches différentes (*tétraminos*) composées chacune d'un assemblage de 4 cubes. Le modèle ainsi que les tétraminos étaient posés sur une table virtuelle.

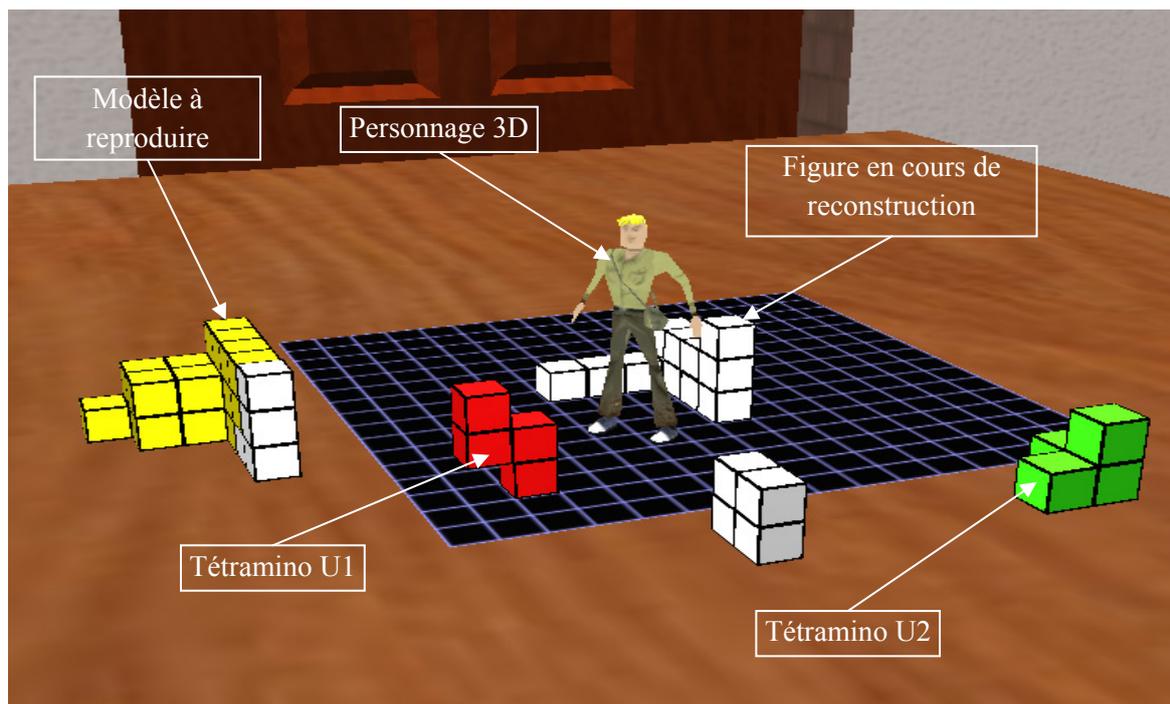


Figure 29 : Environnement 3D

Les sujets pouvaient interagir avec l'environnement 3D en utilisant des manettes de jeux de type *Gamepad* à 6 degrés de liberté (3DdL pour les translations, 2 DdL pour les rotations, et 1 DdL pour manipuler le point de vue). L'utilisation de ces manettes de jeux permettait à chaque utilisateur de sélectionner un tétramino, de le faire tourner selon les 3 axes xyz et de le déplacer en translation selon les 3 axes xyz (le détail des commandes de la manette de jeu est présenté en annexe, page 195). Les deux participants pouvaient déplacer deux tétramino différents au même moment, mais ils n'avaient pas la possibilité de manipuler une pièce en cours d'utilisation par leur partenaire. Une couleur était affectée à chacun des deux participants pour les distinguer (la couleur rouge pour le participant assis sur le poste à gauche et la couleur verte pour le participant assis sur le poste à droite). Toutes les actions d'un utilisateur sur un tétramino étaient matérialisées par un changement de la couleur de celui-ci (elle prenait la couleur de l'opérateur qui la manipulait). Ceci permettait à chaque opérateur de distinguer les actions qu'il effectuait lui-même des actions qu'effectuait son partenaire.

Après la lecture des instructions (les fiches des consignes sont présentées en annexe, pages 196 et 197), chaque participant d'un binôme était installé à la même distance face à l'un des deux écrans. Ils tenaient chacun une manette de jeu dans les mains. Les deux participants étaient séparés par un rideau les empêchant de voir leur partenaire ainsi que son écran. Ils étaient cependant encouragés à communiquer verbalement. Avant de commencer la tâche, les participants avaient quelques essais libres pour se familiariser avec l'interface 3D et l'utilisation des manettes de jeux pour manipuler les tétramino.

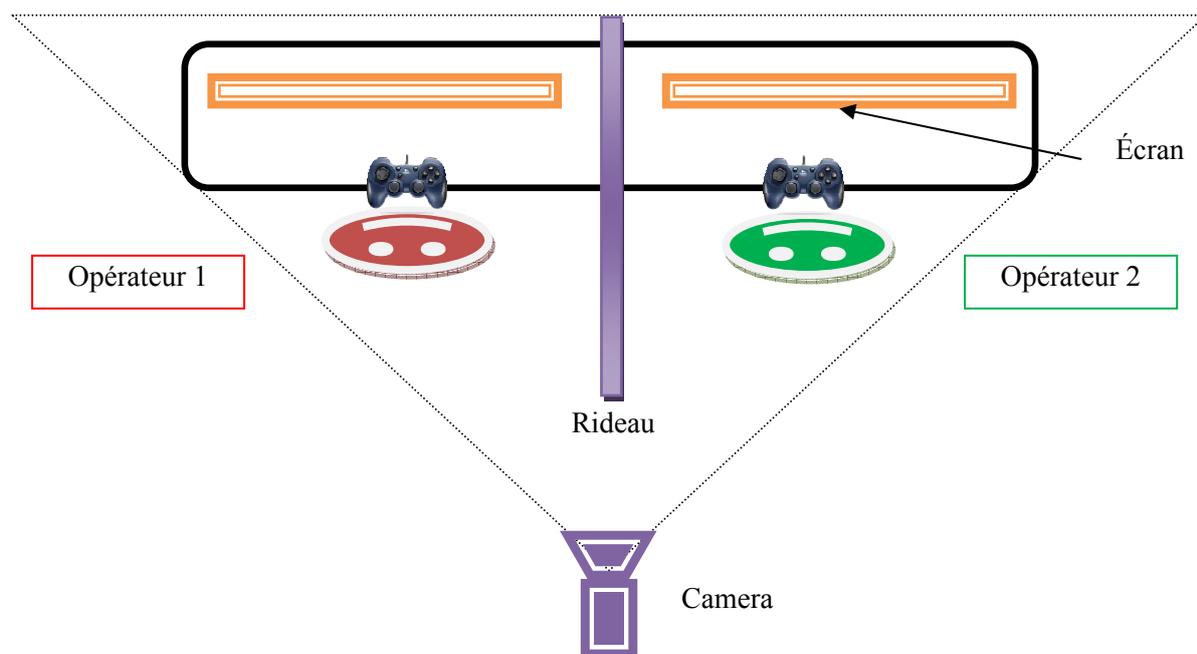


Figure 30 : Dispositif expérimental

4.4.3 Une référence spatiale fixe et latéralisée

Selon la condition expérimentale (voir la section Variables ci-après), un personnage virtuel représentant une Référence Spatiale Fixe (RSF) était placé au centre de la scène (Figure 29). Le choix d'un personnage humanoïde n'était pas anodin. En effet la latéralisation de ce dernier (il a une droite, une gauche, un devant et un derrière) est naturelle et permet un codage relatif ou absolu de la position des objets par rapport à lui (comme on peut le constater sur la Figure 31).

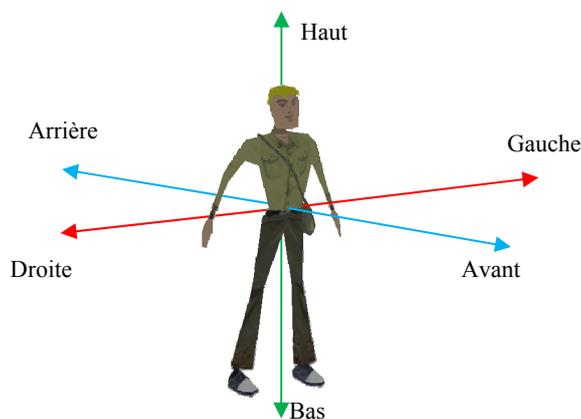


Figure 31 : Une référence spatiale fixe et latéralisée

Ainsi, du fait que ce personnage soit fixe, le codage reste utilisable et compréhensible par les opérateurs même s'ils ne partagent pas le même point de vue. Le personnage pourra alors être utilisé de deux manières différentes dans un système de référence exocentré :

- Il peut servir de référence relative pour être utilisé dans un système exocentré relatif. Dans ce cas le codage reste dépendant du point de vue de l'opérateur.

- Le fait qu'il soit fixe peut encourager les opérateurs à l'utiliser comme objet d'orientation de la scène qui permet d'avoir un codage indépendant du point de vue des opérateurs dans un système exocentré absolu.

4.4.4 **La tâche**

Les participants de chaque binôme devaient reconstruire ensemble 5 figures géométriques (voir les modèles, Figure 33) différentes en utilisant les 6 Tétraminos posés sur la table virtuelle. Pour aider les opérateurs à trouver la solution, le premier tétramino était correctement placé au début de chaque exercice (ce même premier tétramino est représenté en blanc sur chacun des modèles à reproduire).



Figure 32 : des utilisateurs en train de manipuler l'interface 3D

Aucune limitation de temps n'était imposée pour accomplir la tâche. Pour chaque modèle, le point de vue de départ des opérateurs sur la scène était différent (les deux points de vue étaient à l'opposé l'un de l'autre pour éviter que les opérateurs ne gardent un point de vue commun tout au long de chaque exercice, voir la Figure 34). Les opérateurs avaient la possibilité de modifier leurs points de vue comme ils le désiraient en cours de tâche en tournant autour de la figure à l'aide de la manette. Cependant, aucune information n'était donnée aux opérateurs quant aux changements de point de vue opérés par leur partenaire.

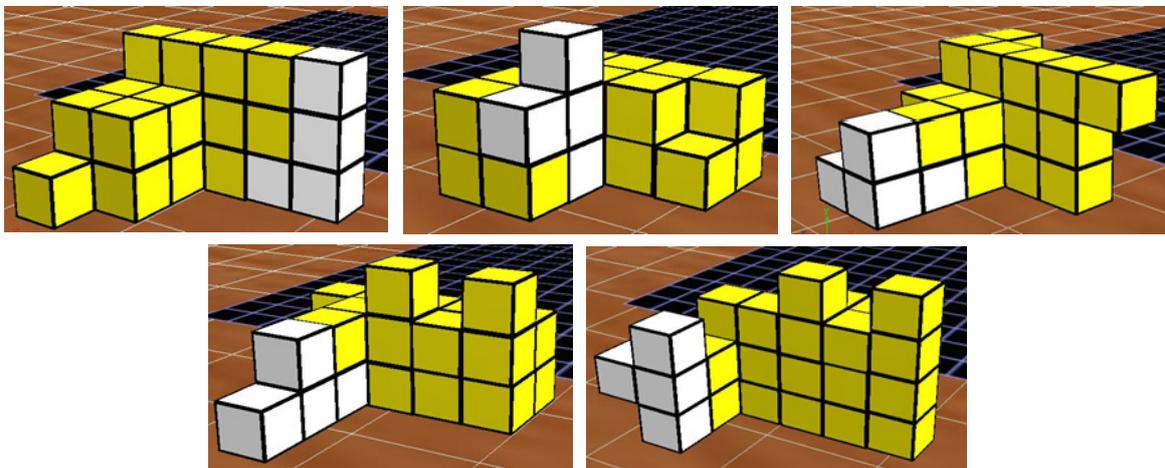


Figure 33 : les 5 modèles à reproduire

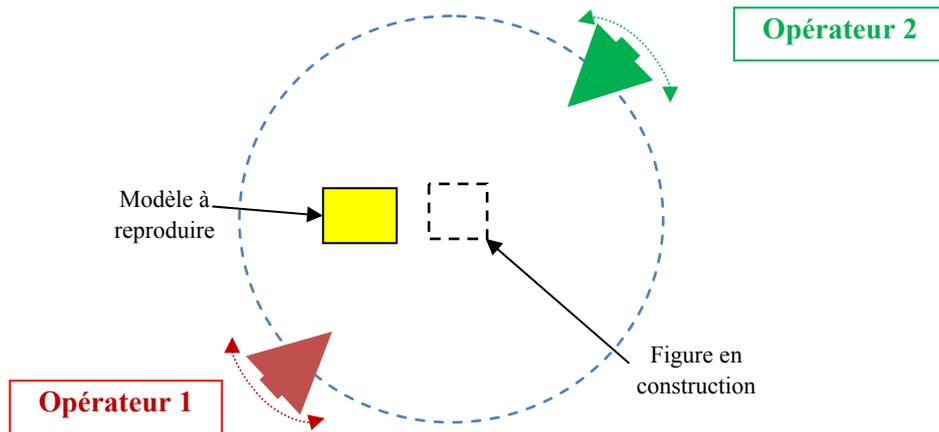


Figure 34 : Points de vue des opérateurs sur la scène virtuelle les deux flèches verte et rouge représentent les points de vue de départ. Au cours de la tâche, les deux opérateurs pouvaient tourner autour de la figure en construction (autour du cercle bleu). Ils n'avaient aucune information sur le point de vue de leur partenaire.

4.4.5 Facteurs

Un facteur indépendant a été manipulé :

- la présence/absence d'une référence spatiale fixe (P-RSF, A-RSF) représentée par le personnage virtuel.

Par ailleurs, le genre des participants (F, G) a été utilisé comme facteur de contrôle pour éliminer les éventuels effets de la timidité dans des groupes mixtes.

Le Tableau 5 récapitule la répartition des participants dans les 4 groupes :

Variables	P-RSF	A-RSF
Garçons	G/ P-RSF: 6 paires	G/ A-RSF: 6 paires
Filles	F/ P-RSF: 5 paires	F/ A-RSF: 5 paires

Tableau 5 : Groupes de participants

4.4.6 Données Recueillies

Les actions des opérateurs ont été enregistrées avec leurs coordonnées temporelles. Des enregistrements audiovisuels des expérimentations ont aussi été réalisés. Tous les dialogues ont été fidèlement retranscrits. Par la suite, les verbalisations ont été filtrées en éliminant les conversations qui ne concernaient pas la résolution de la tâche. Les données analysées sont présentées par la suite.

Performance

Nous avons mesuré :

- Le temps total pour accomplir la tâche
- Le nombre d'erreurs : Nombre de fois où une pièce a été utilisée sans être correctement placée.

Verbalisations

Les communications verbales constituaient les mesures principales pour évaluer : l'utilisation des systèmes de références, l'élaboration du RC, la collaboration, les stratégies de résolution du problème, la difficulté perçue et le sentiment de coprésence.

Les verbalisations ont été traitées en utilisant deux méthodes :

- L'utilisation d'un logiciel dédié à l'analyse automatique des conversations : Tropes (*SoftConcept*). Cette étape a permis de faire une première exploration et de dégager les aspects les plus pertinents dans les verbalisations étudiées.
- L'utilisation d'une grille d'analyse dédiée à une étude plus fine et plus détaillée des verbalisations. Cette grille était composée de 6 catégories (voir Tableau 6).

4.4.7 Traitements Statistiques

Etant donné le faible nombre de participants dans chaque groupe, des tests *t de Student* ont été choisis pour effectuer les comparaisons statistiques entre les différents groupes.

4.5 Résultats

4.5.1 Performances

Temps

Les résultats (Figure 35) ont montré que les garçons ont été plus rapides que les filles ($t(20) p=0.002$) pour reconstruire les 5 modèles mais il n'a pas été observé de différences statistiquement significatives entre les groupes P-RSF et A-RSF ($t(20) p=0.658$).

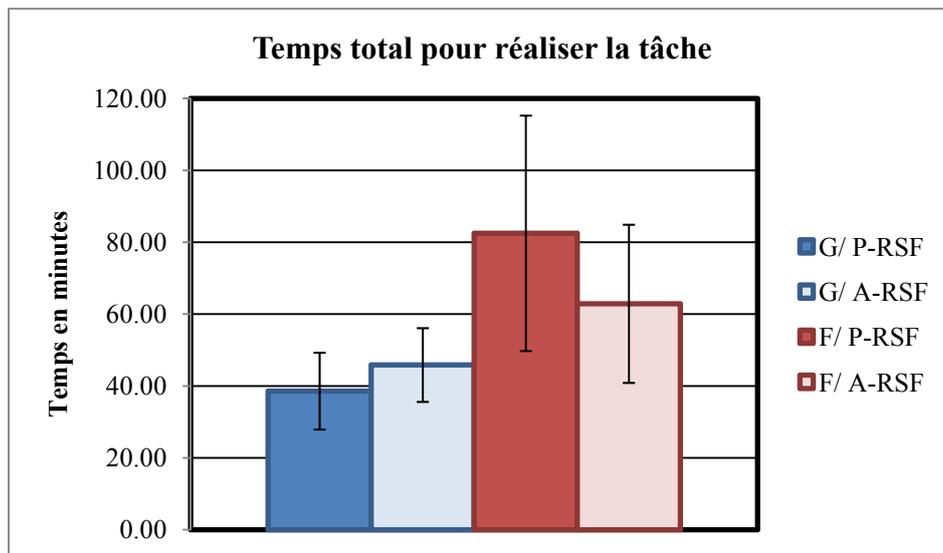


Figure 35 : Temps total pour accomplir la tâche

Erreurs

Les garçons ont fait moins d'erreurs que les filles mais uniquement dans la condition P-RSF ($t(9) p=0.02$ dans la condition P-RSF et $t(9) p=0.75$ dans la condition A-RSF, Figure 36).

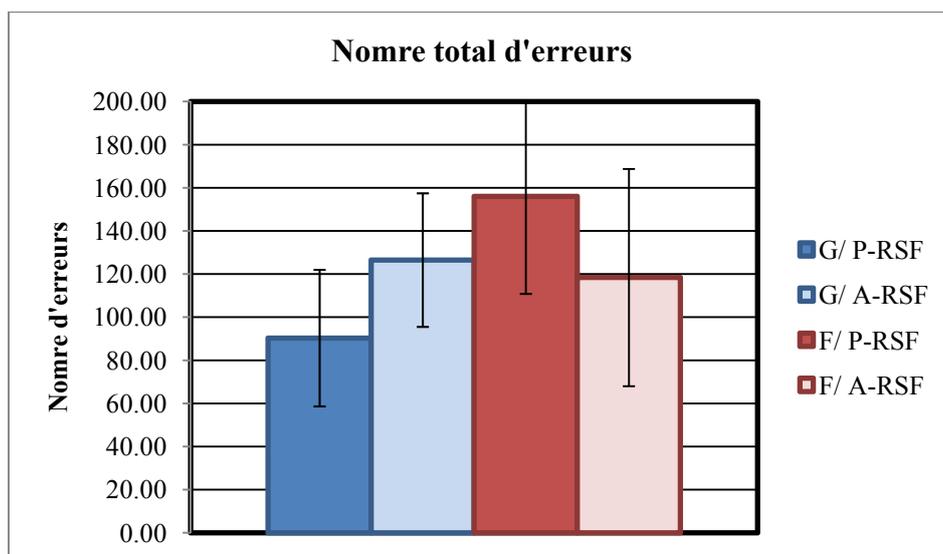


Figure 36 : Nombre total d'erreurs

4.5.2 *Verbalisations*

Analyse préliminaire à l'aide du logiciel Tropes

Nous avons choisis d'utiliser pour une première analyse le logiciel Tropes dédié à l'analyse des discours (pour un exemple voir Piolat & Bannour, 2009).

Ce logiciel a été choisi pour deux raisons : d'abord parce qu'il a permis d'avoir rapidement un résumé des propriétés des conversations entre les partenaires (le style, les fréquences des mots et leurs catégories). Ensuite, il a permis de faire différentes relations sémantiques entre les différentes catégories de mots.

Les résultats obtenus sont résumés dans ce qui suit :

- Le style des verbes utilisés : Pour les filles, aucune différence n'a été observée entre les deux groupes de sujets (P-RSF, A-RSF). Pour les garçons, dans la condition P-RSF, ils ont plus fréquemment utilisé (52.7 %) des verbes factifs (c'est-à-dire des verbes utilisés pour décrire des actions. Par exemple « On va changer sa position ») que dans la condition A-RSF (44 %). D'un autre côté, ils ont plus fréquemment (22 %) utilisé des verbes déclaratifs (C'est-à-dire des verbes utilisés pour faire des déclarations sur un état, un objet une émotion ou une action. Par exemple : « Je pense que... ») que dans la condition P-RSF (18 %). Ainsi, les garçons dans la condition P-RSF semblent être davantage concernés par les actions et leur planification, alors que dans la condition A-RSF, ils effectuent davantage de commentaires sur les actions ce qui suggère que la planification commune n'est pas complètement définie.
- Les approbations : Les résultats montrent que les garçons ont davantage fait d'approbations dans la condition P-RSF (760 fois) que dans la condition A-RSF (380 fois). Pour les filles aucune différence n'a été observée.
- Systèmes de références : Les garçons ont davantage (60 fois) fait référence à la RSF que les filles (45 fois) lorsque celle-ci était présente (c'est-à-dire dans la condition P-RSF).
- La difficulté perçue : Les garçons ont davantage fait références à des difficultés ou à des problèmes dans la condition A-RSF (155 fois) que dans la condition P-RSF (80 fois). Les différences entre les filles dans les deux conditions ont été moins marquées (105 fois dans la condition P-RSF et 115 fois dans la condition A-RSF).
- Le sentiment de coprésence : Les résultats obtenus concernaient l'utilisation des pronoms personnels et impersonnels. Les résultats montrent que les participants dans la condition A-RSF ont augmenté leur utilisation des pronoms personnels « je » et « tu » (41.7% pour les garçons et 46.2% pour les filles) par rapport aux participants dans la condition P-RSF (30% pour les garçons et 40.2% pour les filles). D'un autre côté les participants dans la condition P-RSF ont utilisé davantage les pronoms impersonnels « nous » et « on » (25.3% pour les garçons et 14.3% pour les filles) par rapport aux participants dans la condition A-RSF (16.5% pour les garçons et 8.1% pour les filles).

En résumé, les résultats préliminaires de l'analyse des verbalisations effectuée par le logiciel Tropes montrent que les garçons, dans la condition P-RSF, font davantage références aux actions. De plus, il y a davantage de références au personnage virtuel (RSF) dans cette même condition. Enfin, les garçons dans cette condition ont moins exprimé leurs difficultés à réaliser la tâche et montrent une meilleure perception de la présence de leur partenaire à travers l'augmentation de l'utilisation des pronoms impersonnels. Cette première investigation a permis d'avoir des orientations intéressantes pour une analyse plus profonde. Celle-ci avait pour objectif d'avoir des informations plus précises sur le contenu des verbalisations. Cette seconde analyse a consisté à faire une classification des

verbalisations en plusieurs catégories. Cependant, le logiciel Tropes n'étant pas adapté à ce type d'analyse, nous avons choisis de concevoir une grille d'analyse qui nous a permis de catégoriser toutes les verbalisations. De plus, certains critères ont été utilisés (Utilisation des systèmes de références, des pronoms personnels et la projection dans l'EV) comme mesures indirectes pour respectivement la construction du référentiel spatial commun, les sentiments de coprésence et de présence dans l'EV.

Analyse détaillée

L'analyse détaillée a été effectuée selon plusieurs critères :

Utilisation des systèmes de références.

Concernant les différences entre filles et garçons : Les filles ont utilisé davantage la référence égocentrée que les garçons ($t(20) p=0.019$; Figure 37 et Figure 38). Les garçons ont utilisé plus la référence exocentrée relative que les filles ($t(20) p=0.00007$; Figure 37 et Figure 38).

Concernant les différences entre les groupes P-RSF et A-RSF : Les filles ont privilégié l'utilisation de la référence égocentrée dans la condition A-RSF ($t(8) p=0.015$; Figure 37). Aucune différence significative n'a été observée entre les systèmes de références utilisés dans la condition P-RSF ($t(8) p=0.37$; Figure 37).

Les garçons ont utilisé davantage les références exocentrée et exocentrée relative dans la condition P-RSF ($t(10) p=0.007$; Figure 38). Aucune différence significative n'a été observée entre les systèmes de références utilisés dans la condition A-RSF et $t(10) p=0.28$; Figure 38).

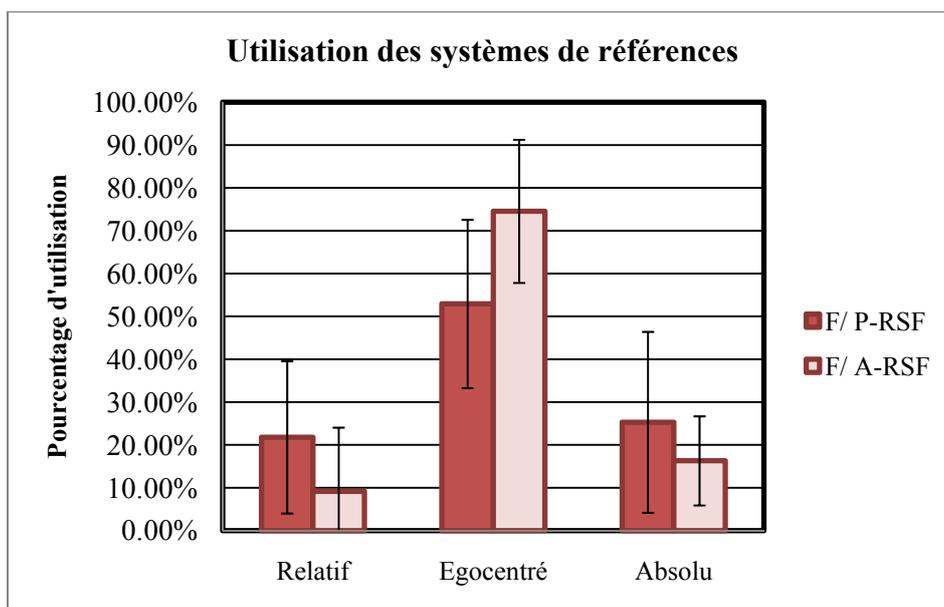


Figure 37 : Utilisation des systèmes de référence (Filles)

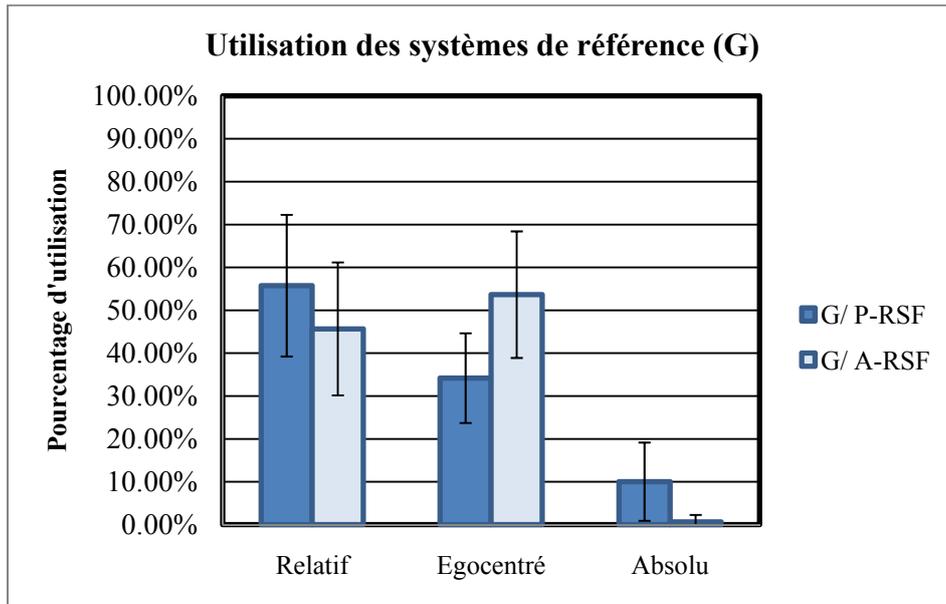


Figure 38 : Utilisation des systèmes de référence (Garçons)

Utilisation des pronoms pour les descriptions des actions (comme mesure du sentiment de coprésence).

L'analyse montre que les garçons et les filles ont été davantage dans un mode personnel (utilisation des pronoms « je » et « tu » ; $t(20) p=0.0001$ and $t(20) p=0.053$ respectivement pour les garçons et les filles). Les garçons ont diminué l'utilisation des pronoms personnels dans la condition P-RSF par rapport à la condition A-RSF ($t(10) p=0.01$; Figure 39), et ont augmenté l'utilisation des pronoms impersonnels (« on » et « nous ») dans la condition P-RSF par rapport à la condition A-RSF ($t(10) p=0.01$; Figure 39)

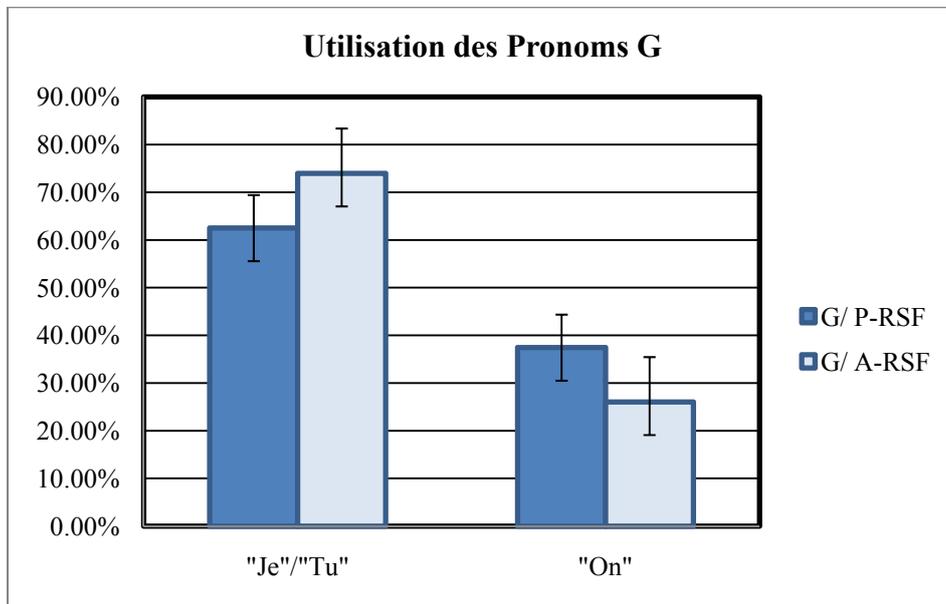


Figure 39 : utilisations des pronoms (pour les garçons)

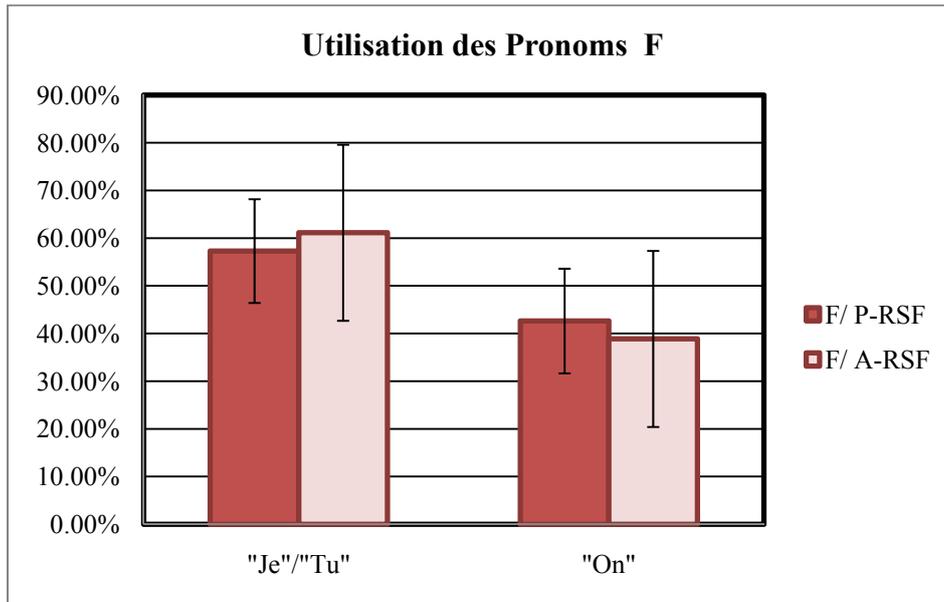


Figure 40 : utilisations des pronoms (pour les filles)

Utilisation des articles et pronoms (comme mesure de la présence dans l'EV).

A défaut d'avoir une représentation des utilisateurs dans l'EV (Avatars), leur sentiment de présence dans l'environnement a été évalué par la manière dont ils se projetaient dans les objets virtuels. La projection des utilisateurs dans les tétraminos qu'ils manipulaient a été ainsi étudiée. Ceci se traduisait par l'utilisation de pronoms personnels en parlant des tétraminos manipulés (par exemple, « j'avance vers la figure »). Inversement, l'utilisation des articles définis (« le », « la »,...etc.) en invoquant la pièce manipulée indiquait un sentiment de « distance » par rapport aux objets de l'EV (par exemple « je déplace la pièce »). Dans ce cas, les objets ne sont pas perçus comme étant la continuité des participants dans l'EV. Enfin, l'utilisation des pronoms possessifs (« Mon », « ma »,...etc.) pour décrire les pièces manipulées peut être considérée comme un état intermédiaire entre les deux situations précédentes (par exemple : « je pose ma pièce derrière »). Dans ce cas, on considère que les utilisateurs perçoivent que les tétraminos manipulés sont la continuité de leur corps dans l'EV mais ils ne sont pas entièrement immergés dans cet environnement.

Les résultats ont montré que les garçons ont utilisé plus souvent les articles définis que les filles ($t(20)$; $p=0.03$). D'un autre côté, les filles ont utilisé plus souvent les pronoms possessifs que les garçons ($t(20)$; $p=0.007$). Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes en ce qui concerne l'utilisation des pronoms personnels pour décrire la pièce manipulée ($t(20)$; $p=0.08$).

En ce qui concerne la comparaison entre les conditions P-RSF et A-RSF, aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes ($t(20)$; $p=0.54$; $p=0.68$ et $p=0.61$ respectivement pour l'utilisation des pronoms possessifs, personnels et des articles définis pour décrire la pièce manipulée).

D'un autre côté, les garçons ont utilisé davantage les articles définis que les pronoms possessifs ($t(10)$; $p=0.000002$) et les pronoms personnels ($t(10)$; $p=0.000002$). Néanmoins, les garçons ont été plus sensibles à l'absence de la RSF puisqu'ils ont utilisé davantage les pronoms possessifs que les pronoms personnels dans la condition A-RSF ($t(10)$; $p=0.02$) alors qu'aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne l'utilisation de ces deux types de pronoms dans la condition P-RSF ($t(10)$; $p=0.8$).

En ce qui concerne les filles, aucune différence significative n'a été observée concernant l'utilisation des articles définis et les pronoms possessifs, que ce soit dans la condition P-RSF ($t(8)$; $p=0.64$) ou dans la condition A-RSF ($t(8)$; $p=0.55$). Par ailleurs, elles ont utilisé moins souvent les pronoms personnels que les pronoms possessifs ($t(8)$; $p=0.035$) et les articles définis " ($t(8)$; $p=0.026$) dans la condition P-RSF alors qu'aucune différence significative n'a été observée dans la condition A-RSF ($t(8)$; $p=0.10$ and $p=0.19$, respectivement pour la comparaison entre l'utilisation des pronoms personnels et les pronoms possessifs et entre les pronoms personnels et les articles définis).

Ainsi, ces résultats ne sont pas assez significatifs pour donner des indications sur le sentiment de présence dans l'EV. D'autres mesures plus subjectives auraient pu être utilisées pour avoir davantage d'informations sur le sentiment de présence des utilisateurs dans l'EV (l'utilisation de questionnaires post expérimentaux, par exemple).

Analyse à l'aide d'une grille dédiée

Pour étudier les profils de collaborations, les verbalisations ont été classées selon une grille dédiée en 16 catégories. Cette grille est détaillée dans le Tableau 6. Les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit :

Concernant les différences entre les filles et les garçons :

Les garçons ont davantage : commenté leur propres actions (C3, cf. table 1 ; $t(20)$ $p=0.005$), fait de commentaires sur la figure en construction (C4 ; $t(20)$ $p=0.00001$), utilisé les déictiques pour montrer leurs actions (C9 ; $t(20)$ $p=0.015$) et se sont partagé davantage les tâches (C16 a ; $t(20)$ $p=0.067$ et C16 b ; $t(20)$ $p=0.044$) que les filles (Figure 41 et Figure 42).

Les filles ont davantage : fait de commentaires sur l'action de leur partenaire (C2 ; $t(20)$ $p=0.027$), eu d'incompréhensions explicites (C10 ; $t(20)$ $p=0.043$) et fait de réflexions en amont sur la solution (C15a ; $t(20)$ $p=0.0002$) que les garçons (Figure 41 et Figure 42).

Concernant les différences entre les groupes P-RSF et A-RSF : Dans la condition A-RSF les participants donnent plus d'indices de réflexion individuelle que dans la condition P-RSF ($t(20)$ $p=0.048$). Par ailleurs, la présence de la RSF a une influence variable selon le genre :

Pour les filles, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les conditions P-RSF et A-RSF (Figure 41). A l'inverse, pour les garçons deux profils distincts sont observés :

Les garçons dans la condition P-RSF ont davantage : décrit leurs intentions d'actions (C1 ; $t(10)$ $p=0.011$), approuvé les actions de leur partenaire (C5 ; $t(10)$ $p=0.032$) et se sont davantage repartis les tâches d'une manière symétrique (C16a ; $t(10)$ $p=0.024$) que les garçons dans la condition A-RSF (Figure 42).

Les garçons dans la condition A-RSF ont davantage : pris le *leadership* pour diriger leur partenaire (C11 ; $t(10)$ $p=0.028$) et se sont davantage repartis les tâches d'une façon asymétrique (C16-b ; $t(10)$ $p=0.031$) que les garçons dans la condition P-RSF (Figure 42).

Catégories de verbalisation	Explication/exemple
CATÉGORIE 1	Descriptions des intentions d'actions (« je vais mettre la barre au dessus du carré ! »)
CATÉGORIE 2	Commentaire/question sur une action du partenaire (« <i>A mon avis c'est pas juste ce que tu as fais</i> »)
CATÉGORIE 3	Commentaire/question sur sa propre action (« <i>je me suis trompé en faisant ça ?</i> »)
CATÉGORIE 4	Commentaire/question sur la figure (« je crois que les deux premières sont bien placées... »)
CATÉGORIE 5	Approbation de l'action du partenaire (« <i>Oui ! je suis d'accord</i> »)
CATÉGORIE 6	Indices de réflexion individuelle (« Attends ! <i>je réfléchie...</i> »)
CATÉGORIE 7	Difficulté (« je sais pas ce qu'il faut faire.. »)
CATÉGORIE 8	Demande d'approbation sur son action (« <i>est ce que tu es d'accord ?</i> »)
CATÉGORIE 9	Déictiques qui servent à monter son action au partenaire et qui accompagnent la réalisation concrète de cette action (« <i>mettre ça ici !</i> »)
CATÉGORIE 10	Incompréhensions explicites : aussi bien sur les intentions d'action que sur la disposition des pièces (« <i>je ne comprends pas ce que tu fais !</i> »)
CATÉGORIE 11	Leadership et verbalisations qui servent à diriger le partenaire (« <i>déplaces ta figure à droite</i> »)
CATÉGORIE 12	Informations sur les points de vue (« <i>moi je suis en face du bonhomme...</i> »)
CATÉGORIE 13	Référenciation des pièces (« <i>je suis sur la grande barre</i> »)
CATÉGORIE 14	Partage des indices de compréhensions (« <i>oui je comprend ce que tu veux dire</i> »)
CATÉGORIE 15	Stratégies : a- réflexions en amont sur la solution (« on doit placer cette pièce en premier après ça sera facile ») ; b- une stratégie d'essais-erreurs (« <i>on essaye et on verra bien si ça marche</i> »)
CATÉGORIE 16	Répartition des tâches : a- répartition asymétrique (laisser faire le partenaire) (« <i>je te laisse faire je vois que tu es bien partie</i> ») ; b- répartition symétrique (actions simultanés) (« <i>toi tu prends le carré, moi la barre</i> »)

Tableau 6 : Les différentes catégories des verbalisations

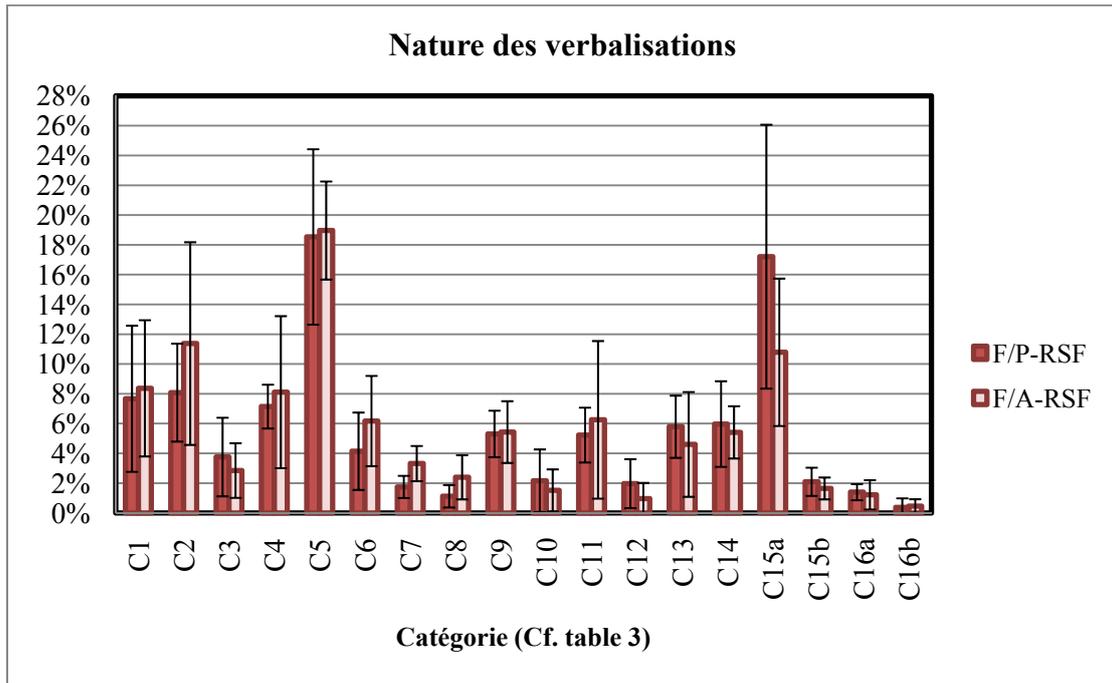


Figure 41 : Nature des verbalisations (pour les filles)

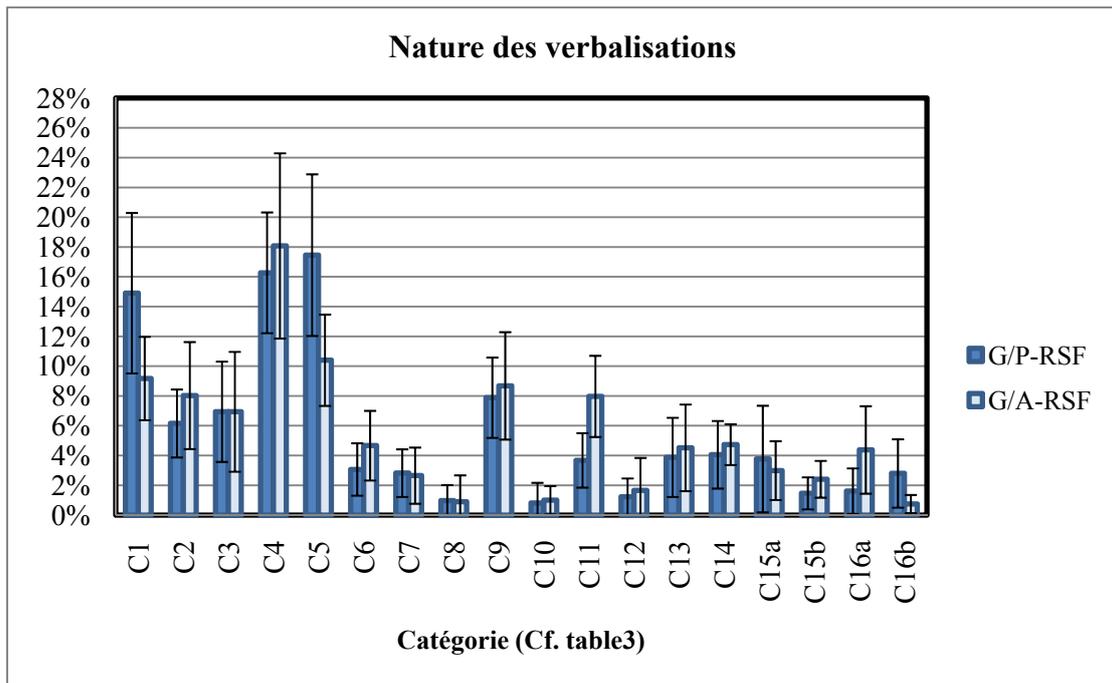


Figure 42 : Nature des verbalisations (pour les garçons)

4.6 Discussion

Les hypothèses suivantes ont été posées:

- **H1** : Un impact de la RSF sur le système de référence choisis par les utilisateurs : Exocentrés (absolu et relatif) versus égocentré.
- **H2** : Un impact du système de référence utilisé sur l'élaboration du référentiel spatial commun.
- **H3** : Un impact sur le type de collaboration qui se construit entre les partenaires d'un même groupe.
- **H4** : Un impact de l'élaboration d'un RC efficient sur le sentiment de coprésence.

Nous allons essayer de vérifier la validité de ces hypothèses à travers nos résultats :

4.6.1 Performances

Les résultats montrent que les garçons ont été plus rapides pour la réalisation de la tâche que les filles. L'augmentation du temps pour les filles est accompagnée d'une augmentation du nombre d'erreurs. Ceci montre que les filles ont eu davantage de difficulté à réaliser la tâche. Cette difficulté peut être liée à leur utilisation du système de référence égocentré. Cet argument est cohérent avec les résultats observés chez les garçons. En effet, ces derniers ont fait davantage d'erreurs dans la condition A-RSF correspondant à la condition où ils ont davantage utilisé le système de référence égocentré. Enfin, nous avons émis l'hypothèse que les participants devraient adopter le plus souvent, une stratégie de réflexions sur la solution en amont en vue d'accomplir la tâche dans la condition P-SVL que dans la condition A-SVL. Cependant les résultats ne montrent que très peu de différences concernant les stratégies choisies. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que les utilisateurs ont tendance à contourner les problèmes d'incompréhensions en employant plusieurs stratégies à la fois.

4.6.2 Influence de la référence spatiale fixe

Les résultats montrent que les garçons ont été influencés par la présence de la RSF. En effet ils sont passés de l'utilisation majoritaire d'un système égocentré en l'absence de la RSF à l'utilisation majoritaire des systèmes exocentré et exocentré relatif en présence de la RSF. Cependant les filles semblent moins sensibles à la présence de la RSF. En effet, elles ont gardé leur préférence d'utilisation majoritaire du système égocentré, même si elles ont augmenté leur utilisation des systèmes exocentré et exocentré relatif en présence du personnage. L'hypothèse **H1** est donc vérifiée uniquement pour les binômes masculins.

Cette différence inter genre peut être expliquée par le fait que le système de référence exocentré nécessite d'effectuer des rotations mentales pour localiser continuellement l'objet par rapport à la RSF. Le fait que les filles n'utilisent pas souvent ce système peut être du au fait qu'elles aient des difficultés à effectuer ces rotations mentales. De plus, elles ont rarement cherché à prendre en compte le point de vue de leur partenaire bien que ce soit la seule façon de se faire comprendre lorsqu'on utilise un système de référence égocentré. En effet, elles ont le plus souvent utilisé des descriptions spatiales selon leur point de vue sans chercher des informations sur le point de vue de leur partenaires (pour rappel la prise en compte du point de vue du partenaire nécessite également d'effectuer des rotations mentales). Mais comment expliquer cette réticence des filles envers les rotations mentales ? Une réponse peut venir des résultats de certains travaux de recherches sur les différences inter genre. Kimura (2001) déclare à ce sujet que « *La plupart des tests d'aptitude spatiale montrent certains avantages en faveur de l'homme, qui excelle en particulier dans la rotation mentale* ». Kolb et

Whishaw (2002) présentent de leur côté une série de testes cognitifs pour évaluer les différences entre les hommes et les femmes. Une de ces études concernait l'évaluation des aptitudes spatiales des hommes et des femmes. La tâche consistait à faire des rotations mentales sur des objets 3D. Les résultats montrent que les hommes ont de meilleurs résultats dans ce genre de tâche. Ces résultats suggèrent que les femmes ont plus de difficultés à effectuer des rotations mentales.

La facilité des hommes pour effectuer des rotations mentales peut donc les aider à utiliser un système de référence exocentré pour faire ces description spatiales. Les femmes de leur côté, semblent avoir des difficultés à effectuer des rotations mentales. Ce qui explique leur réticence à utiliser le système de référence exocentré ou encore à prendre la perspective de leur partenaire.

4.6.3 Construction du RC

Concernant la construction d'un RC (hypothèse **H2**), on s'est intéressé aux conversations sur les actions. Ainsi deux cas peuvent être discutés. Les garçons, en présence de la RSF, ont décrit plus leurs intentions d'actions, ont eu plus de retours positifs de leur partenaire sur ces actions (approbations) et ils ont agi plus souvent en parallèle. Les garçons en l'absence de cette RSF ont eu davantage de retours négatifs (commentaires et interrogations) et ont tenté le plus souvent d'utiliser leur partenaire pour faire les actions. Ces résultats suggèrent un RC plus efficace pour les garçons en présence de la RSF. En effet, une spécification d'actions plus facile et des retours positifs peuvent être interprétés comme étant des signes d'entente entre les partenaires. Ainsi ils pouvaient agir en parallèle puisque ils étaient d'accord à l'avance sur les actions à faire (une solution commune). D'un autre côté, les commentaires et interrogations sur les actions du partenaire peuvent être considérés comme des signes de mésentente entre les partenaires. C'est pourquoi certains participants prenaient l'initiative de diriger leur partenaire selon leurs propres solutions (instauration d'un *leadership*). Ceci explique aussi la répartition asymétrique des tâches.

Pour les filles, il est difficile de dire si elles avaient un RC plus efficace dans une condition plus que dans une autre car on observe peu de différences entre les binômes. Ceci implique la validation de l'hypothèse H2 pour les binômes masculins et la nécessité de faire davantage d'investigations pour les binômes féminins.

4.6.4 Bilan sur les profils de Collaboration

Pour les garçons, on peut extraire deux profils de collaboration dépendants de l'utilisation de la RSF :

Profil négociateur

En présence d'une RSF, les garçons ont un *profil de groupe* avec davantage de : discussions sur leurs intentions d'actions, d'approbation des actions du partenaire que de commentaires et interrogations sur celles-ci, d'actions parallèles et moins de tentatives pour diriger leur partenaire. Cela est associé à une utilisation majoritaire des références exocentrée et exocentrée relative et des pronoms impersonnels.

Profil individualiste

En l'absence de la RSF, les garçons sont dans un mode plus « personnel » avec moins de spécifications d'actions, davantage d'indices de réflexion individuelle, une répartition asymétrique des tâches, autant de commentaires et d'interrogations sur les actions du partenaire que d'approbations de celles-ci et plus de tentatives de diriger le partenaire (instauration d'un *leadership*). Ceci est associé à une plus grande utilisation du système de référence égocentré et des pronoms personnels.

Les filles quant à elles sont moins sensibles à la présence de la RSF. Néanmoins le fait qu'elles aient moins partagé leurs réflexions en amont dans la condition A-RSF alors qu'elles ont davantage commenté les actions de leur partenaire et ont donné plus d'indices de réflexion individuelle laisse penser que l'absence de la RSF diminue les efforts de réflexion commune sur la figure à construire. Cependant, la grande variabilité des résultats empêche l'extraction d'un profil précis.

4.6.5 Présence dans l'EV et coprésence

Les femmes semblent avoir plus le sentiment de présence dans le VE que les hommes quelle que soit la condition. Le fait que la RSF n'ait pas eu d'influence sur la présence n'est pas surprenant car la RSF n'était pas censé augmenter le sentiment d'être à l'intérieur de l'EV. En fait, en l'absence d'avatars représentant chaque utilisateur, le seul moyen pour les participants de se sentir à l'intérieur de l'EV était de se projeter dans les objets manipulés, c'est-à-dire le tétramino. Le fait qu'ils aient à changer de tétramino continuellement ne les a pas aidés à se projeter à l'intérieur de l'EV. Par ailleurs, ceci ne semble avoir aucune influence sur les performances des utilisateurs.

S'agissant du sentiment de coprésence nous avons émis l'hypothèse (**H4**) que la RSF, en augmentant la compréhension entre les participants, permettrait d'accroître le sentiment de la présence du partenaire avec soit. Cette hypothèse est confirmée pour les hommes à travers l'augmentation de l'utilisation des pronoms impersonnels lorsque la RSF était présente.

4.6.6 Résultats additionnels

- Concernant la construction du référentiel spatial commun, nous avons observé que tous les participants ont essayé de contourner le problème de description des actions en profitant des indices visuels caractérisant l'interface. En effet, l'utilisation des déictiques montre qu'ils se sont servis des indices sur les activités (changement des couleurs des tétramino) pour montrer leurs actions et attirer l'attention de leur partenaire. Ainsi les garçons (dans les conditions P-RSF et A-RSF) en utilisant plus de déictiques pour se montrer leurs actions ont eu moins d'incompréhensions explicites que les filles.
- Ces résultats peuvent être liés aux résultats de Kraut, Fussell & Siegel (2003) qui ont montré que le partage d'un espace visuel augmente l'utilisation de pointage et des expressions déictiques (ceci, ici,...etc.) et ainsi, améliore la collaboration. En fait, les opérateurs ont tiré profit de leur espace visuel partagé. Ainsi, dans certains cas, ils ont utilisé des expressions déictiques pendant leurs actions au lieu de décrire à l'avance ces actions. Cela réduit les incompréhensions entre eux et optimise la communication. L'utilisation des expressions déictiques est également un moyen d'accroître la collaboration car les opérateurs sont constamment informés de l'activité de leur partenaire.
- Nous avons également observé que certains utilisateurs ont tenté d'utiliser d'autres indices de l'EV comme référence spatiale. Cependant, ceci a induit certains problèmes de compréhension car ces objets n'étaient pas latéralisés. Voici un extrait d'une conversation qui illustre ces problèmes :
- **Op1** : « Mets-toi face au modèle jaune... » ;
- **Op2** : « Euh, oui mais je ne sais pas...on est tout le temps face au modèle ! ».
- Ceci montre l'importance du choix d'une référence spatiale latéralisée.
- Enfin, l'utilisation d'un personnage anthropomorphique comme référence spatiale peut avoir des effets sur la présence des utilisateurs dans l'EV. En effet, en l'absence d'une représentation des utilisateurs dans l'EV, nous avons observé que certains d'entre eux se projetaient spontanément dans ce personnage, le considérant comme leur avatar. Ainsi ils

l'utilisaient comme leur représentation commune. Cette représentation leur permettait de spécifier leurs actions dans un système de référence « égocentré projeté sur l'avatar » unique et partagé. Voici un extrait d'une conversation qui illustre ces observations :

- **Op1** : « *Poses le sur ma droite là...* » ; (L'opérateur se trouvait alors derrière le personnage).
- D'autres investigations dans ce sens devront être effectuées pour expliquer ce résultat.
- Les résultats montrent également qu'il n'y a pas de différences concernant les verbalisations de référencement des pièces dans toutes les conditions. Ceci peut être expliqué par le fait que les participants aient eu recours à des stratégies de dénomination des objets selon leur forme géométrique (« la grande barre », « le L », « le coin »,...etc.). Cette stratégie a été certainement plus facile à utiliser qu'une stratégie de localisation spatiale des objets. Fischer (2007) a eu des résultats similaires dans son étude sur la communication spatiale entre des opérateurs humains et des robots. Ceci montre que les participants cherchent toujours à trouver la meilleure stratégie de communication.

4.7 Bilan

En résumé, ces résultats ont deux implications : tout d'abord, **la différence observée entre les filles et les garçons quant aux référentiels d'action privilégiés (égocentré pour les filles/exocentré et relatif pour les garçons) et leur sensibilité à la présence de la référence spatiale fixe**. La deuxième implication concerne l'influence des référentiels d'action sur la nature de la collaboration qui s'instaure entre les participants masculins (formulé dans l'hypothèse H3). Ainsi lorsque **la référence égocentrée est utilisée, les participants adoptent davantage un style de collaboration personnel caractérisé par une utilisation accrue de l'autre (*leadership*)**. **Lorsque les références exocentrée et relative sont privilégiées les participants tendent vers un profil de groupe avec davantage de spécifications des actions et de réflexion commune en amont** ce qui confirme l'hypothèse H3 pour les binômes masculins. Néanmoins, les profils extraits n'ont pas influencé le succès de la tâche. Cela est dû notamment à l'utilisation de stratégies de compensation visuelle (montrer les actions) et verbales (diriger le partenaire) pour palier aux problèmes de compréhension.

5 Conclusion

Cette étude s'inscrit dans un travail visant à fournir des recommandations pour la conception d'EV supportant les activités collaboratives. Les résultats ont montré une différence entre filles et garçons dans leur façon de collaborer pour une tâche de reconstruction de figures 3D.

Les résultats ont également montré que la présence d'indices contextuels (la RSF) dans l'EV a influencé leur manière de collaborer. Ainsi l'ajout d'un personnage virtuel comme indice contextuel dans l'EV a un effet positif sur la collaboration dans le cas d'utilisateurs masculins. En effet il améliore la construction du RC entre les utilisateurs et en particulier la planification et la coordination des actions.

Pour être efficace dans la construction d'un RC dans une scène virtuelle, l'indice contextuel doit selon nous respecter certaines caractéristiques :

- il doit être latéralisé de façon à permettre un codage exocentré de la position des objets par rapport à lui,
- il doit être immobile afin d'éviter un changement dans le codage exocentré en cours de tâche,
- il doit être facile à nommer et facilement identifiable par rapport aux autres objets virtuels afin d'éviter les ambiguïtés,
- il doit être visible par tous les utilisateurs qui collaborent à un instant donné pour que la référence exocentrée soit accessible à tous simultanément.

Dans le prochain chapitre nous allons nous intéresser à la communication dans les EVC dans des tâches de collaboration autour des gestes techniques. Il sera question de mettre en évidence l'importance de la communication haptique pour ce type de tâches.

Chapitre 4 : Communication haptique dans un environnement virtuel collaboratif

Nous allons étudier à présent la collaboration à travers un EV, dans le cadre de tâches basées sur des gestes techniques précis. Effectuer ce genre de tâches en collaboration nécessite une communication assez riche autour des gestes effectués. Cependant, dans une communication médiatisée, cela peut devenir difficile. En effet, lorsqu'un opérateur n'a pas un accès visuel direct aux actions de son partenaire, ce dernier doit pouvoir lui transmettre des informations concernant ses gestes par un autre canal. Une première solution consiste à se baser sur la communication verbale pour transmettre ces informations. Cependant, la communication verbale risque d'être insuffisante dans ce cas, en particulier pour des opérateurs qui effectuent des gestes techniques assez précis. En effet, des descriptions précises de ces gestes sont difficiles à verbaliser : des trajectoires précises, les forces à exercer,...etc. L'enjeu de cette partie de notre travail est de proposer des solutions pour améliorer la communication à distance pour ce type de tâches tout en tirant profit des possibilités offertes par les EVC. Avant de proposer une solution, il est important :

- de mieux comprendre en quoi consistent ces gestes techniques, les contraintes liées à la communication des gestes techniques,
- d'identifier les possibilités que les EVC peuvent offrir pour améliorer la communication et donc la collaboration pour ce type de tâches.

Ce chapitre sera organisé comme suit : Dans un premier temps, les gestes techniques sont définis en présentant leur dépendance au sens haptique. Ensuite, la communication autour de ces gestes est abordée. Ceci permettra d'identifier les contraintes qui peuvent surgir dans le cadre d'une communication à distance à travers des EVC. Par la suite, un nouveau paradigme de communication haptique est présenté. Il sera la base de la solution proposée pour améliorer la collaboration. Enfin, une étude expérimentale est présentée. Celle-ci a pour objectif de montrer la pertinence de la solution proposée et de suggérer des possibilités pour l'améliorer.

1 Les gestes techniques

1.1 Définition :

Dans la vie de tous les jours, un humain effectue plusieurs gestes. Certains sont des gestes réflexes, non planifiés à l'avance (se protéger le visage lorsqu'on est face à un danger par exemple). D'autres sont des gestes dirigés vers des buts bien précis. Ces derniers sont appelés gestes techniques ou encore habiletés motrices. Bril et Roux (2002) définissent un geste technique comme étant (traduction personnelle) « *une habileté acquise par apprentissage permettant la réalisation d'une tâche orientée vers un but spécifique* ». Ce geste correspond à l'exécution d'un mouvement précis d'une façon optimale : c'est-à-dire avec un maximum de réussite et en un minimum de temps, d'énergie ou les deux à la fois. Les gestes techniques sont étudiés essentiellement dans le domaine de l'éducation physique. Une catégorie précise de gestes techniques sera l'objet d'étude dans ce travail de thèse.

1.2 Classification des gestes techniques

Les gestes techniques peuvent être classés selon plusieurs critères. Cependant, la classification proposée par Cratty (1962), basée sur le nombre de muscles impliqués pour accomplir le mouvement, est utilisée dans ce chapitre. Cratty (1962) distingue deux catégories de gestes techniques :

- **Les gestes techniques globaux** : cette catégorie de gestes nécessite l'implication d'un grand nombre de muscles pour accomplir le mouvement. Ceci implique le mouvement de tout le corps ou bien le mouvement de plusieurs membres à la fois (marcher, monter des escaliers, etc.).
- **Les gestes techniques fins** : cette catégorie correspond aux petits mouvements du corps qui nécessitent l'implication d'un petit groupe de muscles. Ces muscles sont utilisés pour des mouvements précis de la main qui servent à la manipulation d'un objet ou d'un outil (écrire, attacher, etc.).

Dans la suite du chapitre, la catégorie des gestes techniques fins sera étudiée. Il est à signaler qu'une taxonomie plus détaillée des gestes simulables dans un EV à travers des interfaces haptiques est décrite par Bloomfield, Deng, Wampler, & Rondot (2003).

1.3 Les Gestes techniques fins

Les gestes techniques fins peuvent être définis comme étant les petits mouvements des muscles dans les doigts en coordination avec les yeux pour atteindre un but précis. Ces gestes incluent la manipulation de petits objets (ou l'outil), le transfert d'objets d'une main à une autre, et impliquent des mouvements très précis des membres. Ils nécessitent le développement des petits muscles. Voici quelques exemples d'activités qui permettent de développer des gestes techniques fins :

- découpage,
- collage de formes,
- coloriage et traçage,
- les gestes du quotidien : laçage, boutonnement, utilisation d'un tournevis, ouverture et fermeture des portes, réglage d'une montre, filetage,...etc.,
- écriture,
- gestes chirurgicaux (manipulation de scalpels, insertion d'aiguille,...etc.).

Pour accomplir ce type de gestes d'une manière optimale, l'opérateur doit appréhender le monde qui l'entoure à travers ses différents sens, ce qui lui permet de construire une représentation complète de la situation à laquelle il est confronté. Celle-ci inclut, entre autres, la conscience de l'objectif à atteindre ainsi que la perception de l'environnement dans lequel il doit agir (objets à manipuler, outils disponibles,...etc.). Cette perception de l'environnement est acquise via l'exploration passive de l'environnement (essentiellement visuelle et auditive) mais aussi grâce aux rétroactions de l'environnement durant l'accomplissement du geste (retours visuels, haptiques,...etc.). Bien que le sens de la vue soit communément admis comme le sens le plus utilisé, le sens haptique a une importance majeure pour l'exécution de toutes les tâches physiques. En effet, il permet à l'opérateur d'affiner et de compléter les représentations mentales des propriétés physiques de son environnement. Ces représentations renseignent de façon plus pertinente (par rapport au sens visuel) sur les forces à exercer sur un objet pour obtenir un effet particulier. Les gestes techniques fins font partie de cette catégorie de tâches physiques qui nécessitent des informations haptiques. On se focalise dans ce qui suit sur le sens haptique pour étudier son mode de fonctionnement, et son importance pour les gestes techniques fins.

2 Le sens haptique

2.1 Définition

Le mot haptique provient du grec *Haptein* (ou encore *Haptesthai*) qui signifie « toucher et manipuler » (Salisbury, 1999). L'haptique est donc relatif au sens du toucher. Appelle (1991) définit le sens haptique comme étant l'utilisation du comportement moteur en combinaison avec le sens du toucher pour identifier les objets. Le sens haptique englobe donc deux sous systèmes :

- le sens tactile : le contact avec les objets et la réception des informations transmises par les récepteurs de la peau autour de la zone de contact,
- les phénomènes proprioceptifs (kinesthésiques) : la perception du mouvement et de la position des membres dans l'environnement avec les forces associées. Cette perception est acquise à travers la connexion des récepteurs de la peau, des muscles et des tendons.

Le sens haptique résulte donc de la stimulation de la peau par l'exploration active des objets de l'environnement par la main. Il se base sur l'action pour stimuler nos perceptions. La déformation mécanique de la peau (qui résulte du contact avec les objets) est ainsi combinée avec celle des muscles, des tendons et des articulations (qui résulte du mouvement actif des membres). Les informations haptiques peuvent être utiles pour compléter des informations transmises à travers les autres sens.

2.2 Les interfaces haptiques

Les interfaces haptiques sont des dispositifs utilisés comme des interfaces homme-machine et permettant à l'opérateur d'interagir avec son environnement (physique ou virtuel) avec un retour d'effort. Historiquement ces dispositifs ont été utilisés en téléopération pour permettre à un opérateur d'avoir un retour d'effort de l'environnement distant avec lequel il interagit. Dans ce cas, l'opérateur utilise une interface à retour d'effort qu'on appelle bras maître, pour manipuler à distance un robot esclave, et ressentir les efforts subis par ce dernier lorsqu'il entre en contact avec des objets de l'environnement. Depuis quelques années, ces dispositifs sont utilisés par la communauté de la RV comme dispositifs d'entrée/sortie qui permettent d'interagir avec un EV. Ces dispositifs sont maintenant courants en RV, car l'haptique y est reconnu comme un canal important de communication entre l'homme et l'EV. Plus récemment, la conception de ces dispositifs est devenue une problématique de recherche en soit, offrant ainsi une grande palette de dispositifs utilisables dans plusieurs domaines d'application. Ainsi, on peut trouver à présent des interfaces mieux adaptées aux utilisations dans les applications de la RV. Ces interfaces sont conçues, par exemple, en privilégiant le confort de l'utilisateur (au détriment d'un espace de travail important) et la sensibilité (au détriment d'une forte capacité en efforts ; Fuchs & Stergiopoulos, 2006). Par ailleurs, il est à noter que les interfaces haptiques ne sont pas le seul moyen pour appréhender une scène virtuelle par le sens haptique. En effet, une autre possibilité consiste à utiliser une réplique identique de la scène virtuelle sous forme matérielle. Il existe alors une correspondance entre les objets virtuels manipulés et leurs répliques physiques dans le monde réel. Cette méthode est appelée retour haptique passif (Hinckley, Pausch, Goble, & Kassell, 1994). Enfin, on peut utiliser également un retour pseudo-haptique. Dans ce cas, des informations haptiques sont transmises à travers une capture sensorielle en passant par le canal visuel (Bibin, Lécuyer, Burkhardt, Delbos, & Bonnet, 2008).

2.3 Classification des interfaces haptiques

Cette classification se limite aux périphériques haptiques à retour d'effort. Ainsi les périphériques à retour tactiles ne seront pas abordés dans cette partie.

Les interfaces haptiques commercialisées à l'heure actuelle peuvent être classées en deux grandes familles :

- **Les dispositifs à base fixe (*ground-based devices*)** : cette catégorie regroupe les dispositifs qui peuvent être manipulés par l'utilisateur tout en étant posés sur une table ou sur le sol. Elle inclut les manches à retour de force et les bras articulés à retour d'effort (les bras maîtres), les souris à retour d'effort ou encore les systèmes à câbles,
- **Les dispositifs « portés sur le corps » (*body-based devices*)** : cette catégorie regroupe les dispositifs portés par l'utilisateur. Elle inclut les gants de données, les combinaisons de données ou encore les exosquelettes.

Les dispositifs les plus utilisés actuellement sont les bras articulés à retour d'effort. Ces derniers se composent généralement d'un bras robotisé fixé à un stylet. Le bras est entraîné par le stylet manipulé par l'utilisateur et peut exercer une force sur celui-ci. Ces dispositifs sont très utilisés en téléopération et dans les applications de RV. On trouve par exemple, le PHANTOM Omni de *Sensable* ou encore le Virtuoso 6D commercialisé par la société *Haption*⁴ (dont la version desktop est utilisée dans l'étude expérimentale présentée dans ce chapitre).

Comme alternative à l'utilisation des bras robotisés, il existe des systèmes à câbles tel que le SPIDAR (Walairacht, Koike, & Sato, 1999). Ces systèmes ont l'avantage d'avoir une mécanique simplifiée et des prix réduits en comparaison avec les bras articulés. Cependant, la présence des câbles peut devenir problématique dans certaines configurations (entremêlement des câbles, encombrement de l'espace).

Un panorama assez complet des interfaces haptiques à retours d'effort et leurs caractéristiques est présenté dans Fuchs & Stergiopoulos (2006).

2.4 Caractéristiques des interfaces haptiques

Contrairement à d'autres dispositifs, qui sont des périphériques d'entrée uniquement (souris, clavier) ou de sortie uniquement (écran), les périphériques haptiques sont des périphériques d'entrée et sortie à la fois. En effet, ils permettent un transfert bilatéral des données pour restituer avec une bonne fidélité les informations haptiques de l'environnement virtuel vers l'opérateur, et pour transmettre les intentions d'action de l'opérateur vers l'environnement virtuel. Les intentions d'actions de l'utilisateur sont transmises à travers la capture des mouvements de la main. D'un autre côté, le dispositif renvoie de façon active une force dans les doigts de l'utilisateur qui tient l'extrémité de ce dispositif. Restituer une force ou, de manière équivalente, contraindre le mouvement de l'opérateur, nécessite une interface active, c'est à dire motorisée. Les interactions avec l'EV sont alors nombreuses : on peut créer des contraintes de mouvement, des sensations de contact, des déformations d'objets ou encore des sensations de frottement.

⁴ <http://www.haption.com>

2.5 Quelques exemples d'applications

Les interfaces haptiques sont utilisées dans plusieurs applications qui nécessitent le renvoi d'informations haptiques à l'utilisateur, aussi bien dans le domaine de la RV que dans la téléopération (Srinivasan & Basdogan, 1997). Voici quelques exemples d'applications utilisant les retours haptiques :

- simulateurs de vol, simulateurs de conduite : à travers les volants et manches à retours d'efforts,
- les simulateurs chirurgicaux, la chirurgie minimale invasive, la télémédecine, l'endoscopie : Simulation pour la chirurgie minimale invasive (Basdogan, De, Kim, Muniyandi, Kim, & Srinivasan, 2004), simulation pour la chirurgie de l'os temporal (Morris, Sewell, Blevins, Barbagli, & Salisbury, 2004),
- la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) : pour permettre par exemple, à des concepteurs de manipuler librement des pièces lors d'un assemblage mécanique, comme dans l'étude sur le montage et démontage de pièces chez Renault (Arnaldi, 2004),
- aides aux personnes aux besoins spécifiques : par exemple, les interfaces de navigation pour les aveugles (Lécuyer, Mobuchon, Mégard, Perret, Andriot, & Colinot, 2003),
- l'éducation : A travers l'apprentissage de l'écriture manuscrite en utilisant une interface haptique (Palluel-Germain, Bara, Hillairet de Boisferon, Hennion, Gouagout, & Gentaz, 2007) ou encore l'apprentissage de concepts abstraits tels que la structure d'un atome (Harvey & Gingold, 2000),
- sciences : par exemple dans les applications de manipulation de molécules en biologie (Subasi & Basdogan, 2008),
- divertissement : On retrouve les interfaces haptiques dans les jeux vidéo qui utilisent les manches et volants à retour de force, ou dans les visites à distance des musées en ligne (McLaughlin, Sukhatme, Hespanha, Shahabi, Ortega, & Medioni, 2000).

2.6 Utilité des informations haptiques dans les EV

Les interfaces haptiques jouent un rôle essentiel dans l'immersion d'un utilisateur dans l'EV lorsqu'il effectue des tâches physiques (telles que la manipulation d'objets et d'outils ou encore les interactions avec d'autres utilisateurs de l'EV). Mais l'utilisation des interfaces haptiques seules semble être inefficace (Smith, 1997). Elles sont alors souvent couplées avec un dispositif d'affichage et peuvent devenir, dans ce cas, plus efficaces qu'un dispositif d'affichage stéréoscopique seul. La valeur ajoutée du retour haptique réside essentiellement dans la capacité des utilisateurs à sentir l'objet qu'ils manipulent, ce qui rend l'interaction plus rapide et plus précise (Sallnäs & Zhai, 2003). L'étude de Gupta, Sheridan et Whitney (1997) a montré que le retour haptique permet de réduire le temps d'accomplissement d'une tâche de positionnement d'une cheville dans un trou simulant ainsi une tâche d'assemblage de pièces. Dans une autre étude, Sheridan (1992) a montré que sentir et toucher les objets pendant leur manipulation permet d'améliorer les performances de l'utilisateur et permet d'accroître son sentiment de présence dans l'EV. Une autre étude (Hasser, Goldenberg, Martin, & Rosenberg, 1998) a montré que l'ajout du retour de force à une souris d'ordinateur permet de réduire les erreurs de pointage. On peut donc imaginer que pour effectuer un geste technique fin, dans un EV, d'une manière optimale, il est nécessaire de doter l'utilisateur de ce type de dispositif. Ceci aura pour but d'améliorer les performances de l'utilisateur, d'augmenter son sentiment de présence dans l'EV et son implication pour accomplir sa tâche.

2.7 Le sens haptique et les gestes techniques fins

L'interaction haptique d'un opérateur avec les objets qui forment son environnement, lui permet d'établir des représentations mentales de la structure physique de cet environnement. L'exploration haptique donne alors à l'opérateur des informations sur son environnement : les forces à déployer pour bouger un objet (outil), les attributs des objets (contraintes, frottement, textures,...etc.), les événements (glissement, contrainte, contact,...etc.). Les modèles construits à partir de ces informations, combinés avec les images mentales construites à partir des retours visuels, lui permettent alors de construire un modèle mental plus précis et plus complet de son environnement. Ainsi, pour accomplir des tâches de manipulation fines, telles qu'un geste technique, ce modèle jouera un rôle primordial pour le contrôle et l'exécution de cette tâche d'une manière optimale (avec une économie d'énergie et de temps).

L'importance de ces informations sur les forces et la proprioception n'est pas négligée par les technologies de la RV. Le développement et l'utilisation des interfaces haptiques décrites précédemment en est la preuve. Ces interfaces privilégient essentiellement le contact avec la main ou les doigts de l'opérateur. Ceci lui permet de ressentir à travers ces périphériques la différence entre un état de contact et un état de non-contact avec un objet virtuel. La structure de ces interfaces semble adaptée à des gestes techniques de manipulation d'instruments. Cependant, la simulation de gestes techniques ne se basant sur aucun instrument semble plus difficile. En effet, dans ce cas, il est nécessaire de se doter de capteurs de positions assez précis pour décrypter avec une grande précision les mouvements des doigts nécessaires à ce type de gestes. L'étude présentée est restreinte aux gestes techniques fins basés sur l'utilisation d'un instrument dans un EV.

Voici quelques exemples d'applications développées dans ce sens : les Gestes Médico-chirurgicaux Assistés par Ordinateur (un simulateur de réalité virtuelle pour le prélèvement de moelle osseuse dans le cadre de greffe en pédiatrique (Machado, Mello, Lopes, Odone Filho, & Zuffo, 2001), un simulateur pour l'apprentissage de la laparoscopie chez *Immersion*⁵), la nano manipulation, ou encore la CAO (montage et démontage de pièces chez Renault).

2.8 Synthèse

Les gestes techniques fins basés sur la manipulation d'un outil pour accomplir une tâche, nécessitent une grande précision de mouvements. Pour accomplir ces gestes d'une manière optimale, un opérateur doit se baser sur les retours sensoriels de son environnement. Dans ce cadre, le sens haptique semble être une source d'information importante. De même, dans un EV, lorsqu'un utilisateur doit accomplir des gestes techniques, il est nécessaire de lui fournir cette source d'information. Dans ce cas, des interfaces haptiques sont associées à des dispositifs d'affichage pour transmettre des informations de retour d'effort et de retour visuel vers l'utilisateur lorsqu'il interagit avec son environnement. Ces informations lui permettent de construire une image plus précise de la situation et d'accomplir les gestes de façon optimale. Mais que se passe-t-il lorsque l'opérateur doit partager ces informations avec une autre personne ? Ces situations peuvent se manifester dans le cadre d'un apprentissage, d'une transmission de savoir ou encore dans une situation de collaboration où l'opérateur doit partager la manipulation d'un outil avec une autre personne. La section suivante permettra d'aborder les problèmes de communication d'informations autour des gestes techniques dans les situations collaboratives.

⁵ www.immersion.com

3 Communication autour des gestes techniques

Lorsqu'un opérateur effectue un geste, il peut utiliser différents canaux de communication pour rendre compte de son geste : verbal, visuel ou encore haptique. Les informations véhiculées par ces canaux de communication sont différentes mais complémentaires. On parle dans ce cas d'une communication non verbale soutenue et complétée par la communication verbale. Il est question dans ce qui suit, de comprendre quels types d'informations peuvent être véhiculés à travers ces différents canaux et comment l'opérateur peut les transmettre à un partenaire.

3.1 La communication verbale

Dans une situation de collaboration, la communication verbale est toujours le moyen le plus direct et le plus rapide pour transmettre des informations. Cependant, lorsqu'il s'agit de décrire ses propres actions, la tâche devient moins aisée. Cette difficulté à verbaliser ses actions tient du fait que celles-ci sont pour une bonne partie basées sur des connaissances autonomes ou des connaissances procédurales (Vermersch, 1996). Ces dernières renvoient le plus souvent à des capacités perceptivo-cognitives et perceptivo-motrices qui ne sont pas ou très difficilement communicables. C'est-à-dire qu'on est parfois capable de faire certains gestes d'une manière automatique sans que l'on s'en rende compte. L'exemple le plus fréquent est la conduite d'une automobile, où les gestes de conduite de base (passer une vitesse par exemple) sont automatisés. Ceci permet au conducteur de « libérer ses sens » pour avoir davantage d'attention à accorder à ce qui se passe sur la route. Cependant, cette automatisation devient un inconvénient lorsqu'un expert veut transférer ces compétences à des apprenants. Dans ce cas il a plus de mal à décrire des gestes qu'il a parfaitement intégrés et qui sont devenus des automatismes pour lui. S'appuyer donc uniquement sur la communication verbale pour transmettre des informations sur des gestes techniques peut être inefficace. Ceci peut, en effet, contraindre l'élaboration d'un RC entre deux partenaires en restreignant les informations échangées entre eux. Il est alors nécessaire de compléter ces informations verbales à travers d'autres canaux de communication : visuels et/ou haptiques.

3.2 La communication visuelle

Le geste est aussi bien un moyen d'action dans l'environnement qu'un moyen de communication à travers lequel un opérateur peut transmettre des informations. Dans cette partie, le geste est étudié comme étant un moyen de communication non verbale. Les gestes sont fréquemment employés comme complément de la communication humaine, permettant d'améliorer la compréhension. En effet, selon Cadoz (1994), l'une des fonctions identifiées des gestes manuels est la fonction sémiotique : émission d'information à destination de l'environnement. Erkman et Friesen (1972) décrivent aussi une typologie détaillée de gestes de communication. On retiendra dans cette typologie les gestes dit *Kinétographes* : les mouvements qui décrivent une action physique. Ces mouvements permettent d'illustrer par le geste des informations sur une action décrite verbalement. Cadoz (1994) introduit alors le concept de geste instrumental qu'il décrit comme étant une interaction physique avec un objet de l'environnement. Ces interactions produisent des phénomènes physiques dans l'environnement qui deviennent alors un support pour des messages communicationnels. On peut donc considérer que les gestes destinés à une interaction avec un outil permettent à un opérateur de s'exprimer à travers l'action pour démontrer certaines informations sur ses gestes. On retrouve ces gestes de démonstration par exemple dans des situations d'apprentissage, lorsqu'un expert enseigne des habiletés motrices à des novices ou encore lorsqu'un enfant essaye d'imiter un adulte qui agit devant lui. C'est d'ailleurs l'une des stratégies les plus répandues pour l'apprentissage de nouveaux mouvements (Schmidt, 1987). Dans ce cas, pour l'apprenant, il s'agit d'observer l'expert pendant

l'action et d'imiter ses gestes (Ericsson & Charness, 1994). Cet ensemble de gestes démonstratifs combinés avec l'observation constitue un canal de communication entre deux opérateurs pouvant avoir des rôles asymétriques (expert/novice) ou symétriques dans la tâche (deux collaborateurs qui travaillent ensemble). Ce canal leur permet alors de s'échanger des informations autour des gestes techniques qu'ils exécutent. Ainsi ils élaborent ensemble un RC autour des caractéristiques visuelles du geste (cinématique du geste, position de l'outil,...etc.). On retrouve cette façon de faire dans de nombreux domaines : dans la vie quotidienne, dans le sport ou sur les lieux de travail (Blavier, 2006). Dans des situations de collaborations à distances, des stratégies sont employées pour permettre de percevoir les gestes des interlocuteurs distants (à travers la vidéo par exemple). Dans les EVC, les avatars sont utilisés pour reproduire les gestes des opérateurs. Cependant, reproduire des gestes techniques fins d'une manière très précise à travers des avatars virtuels nécessite des dispositifs technologiques assez lourds et parfois encombrants pour les utilisateurs (Le mer, 2001). Dans ce cas, la communication haptique peut permettre de compléter les informations visuelles ou verbales, parfois insuffisantes (typiquement des informations sur les efforts exercés sont difficiles à décrire verbalement ou à extraire à travers l'observation visuelle).

3.3 Communication haptique

Le rôle des informations haptiques (essentiellement proprioceptives) dans la transmission de connaissances sur les gestes techniques est toujours sujet à débat (Blavier, 2006). Alors que certains auteurs montrent l'importance de ce type d'informations soulignant son caractère indispensable (Bluteau, Coquillart, Payan, & Gentaz, 2008; Solis, Avizzano, & Bergamasco, 2003), d'autres remettent en question la nécessité de ces informations (Willingham, 1998). Avant de se positionner par rapport à ce débat, la notion de communication haptique est introduite dans ce qui suit, pour montrer le rôle qu'elle pourrait avoir dans des situations de collaboration à travers des EV.

3.3.1 Généralités

Contrairement aux autres formes de communication non verbale telles que les expressions faciales, le contact visuel ou encore les gestes, très peu d'attention a été portée sur la communication haptique. Brave et Dahley (1997) déclarent à ce sujet (traduction personnelle):

« Le toucher est un aspect fondamental des communications interpersonnelles. Que ce soit une poignée de main, un encouragement par une tape dans le dos, ou un câlin réconfortant, le contact physique est un moyen fondamental par lequel les gens parviennent à un sentiment de connexion, indiquent leurs intentions et expriment leurs émotions ».

Comparées à la vision ou l'ouïe, les informations haptiques sont des interactions homme-homme plus directes et plus intimes. Cette forme de communication peut être utilisée pour sympathiser avec quelqu'un ou encore pour manifester des sentiments de proximité ou d'intimité avec une autre personne. Mais au-delà de cette dimension d'intimité, la communication haptique peut être considérée comme le moyen le plus direct pour échanger des informations. C'est l'interaction qui intervient lors d'une collaboration physique pour accomplir une tâche manuelle commune entre deux opérateurs. Ces derniers échangent des informations sur les forces qu'ils appliquent et les mouvements qu'ils effectuent. Elle est alors observable dans une grande variété de tâches : simples, telles que soulever une table ensemble ou se passer un verre d'eau, ou plus complexes, telles que danser ensemble, passer le témoin lors d'une course de relais ou guider la main d'un autre opérateur pour enseigner un geste manuel (Reed, Peshkin, Hartmann, Colgate, & Patton, 2005). Cette communication peut se faire directement (entre les mains des opérateurs) ou à travers un objet qu'ils tiennent ensemble. Dans ce

cas le contact permet aux opérateurs de synchroniser leurs actions (« je tiens le verre, tu peux le lâcher ! »).

3.3.2 Applications autour de la communication haptique

Bien que les études sur la communication haptique soient rares, on retrouve dans la littérature certaines applications basées sur cette forme d'interaction interpersonnelle. Les applications sont essentiellement orientées vers l'utilisation des interfaces haptiques comme moyen de transférer les émotions et les sentiments. L'un des premiers systèmes de communication haptique était le *Telephonic Arm Wrestling* (White & Back, 1986). Le système était une œuvre d'art qui consistait en une paire de bras robots qui permettaient à deux utilisateurs distants de faire un « bras de fer » avec l'autre. *InTouch* (Brave & Dahley, 1997), est un dispositif constitué de trois cylindres. Le déplacement d'un des cylindres par un utilisateur entraîne un mouvement identique dans un périphérique similaire distant. Ceci permet à l'autre utilisateur d'avoir des rétroactions sur ce que fait le premier. Cependant, aucune évaluation du système n'a été présentée par les auteurs. De leur côté, Rovers et Van Essen (2004) ont utilisé la communication haptique dans le cadre d'une application de messagerie instantanée. Ils ont développé ce qu'ils ont appelé des Hapticônes : des modèles de force prédéfinie qui peuvent être déployés à distance à travers différentes interfaces haptiques. Les Hapticônes sont les équivalents haptiques des émoticônes. Combinés avec des messages textuels traditionnels, ils permettent ainsi de transmettre des notions basiques telles que les émotions ou les sentiments à travers des interactions haptiques.

Hormis les interactions sociales, la communication haptique a été utilisée dans d'autres situations. On retrouve alors des applications qui utilisent les informations haptiques pour transmettre des directions de navigation (Van Erp & Van Veen, 2001) ou encore des alertes pour l'évitement d'obstacles (Dingus, McGehee, Manakkal, Jahns, Carney, & Hankey, 1997). Cependant, dans ce cas, on parle d'une communication homme-machine. Ces études ont montré que la communication haptique avec l'opérateur permet de réduire le temps nécessaire pour accomplir la tâche tout en réduisant la surcharge du sens visuel.

3.3.3 La communication haptique et les gestes techniques

La communication haptique est également utilisée dans des situations d'apprentissage des gestes techniques. Une grande majorité des systèmes développés est basée sur le paradigme de guidage haptique (Feygin, Keehner, & Tendick, 2002). Dans la vie de tous les jours, ce paradigme est visible dans les situations de compagnonnage : lorsqu'un expert prend la main d'un novice pour lui montrer le mouvement désiré. L'utilisation de ce paradigme dans des systèmes d'apprentissage informatisés nécessite alors l'enregistrement et la modélisation des gestes de référence de l'expert. Ces gestes de référence sont par la suite transmis à l'apprenant à travers une interface haptique. Le guidage haptique a été utilisé par exemple pour l'apprentissage de la calligraphie :

Henmi et Yoshikawa (1998) ont défini un système d'apprentissage de la calligraphie japonaise basé sur la métaphore de *Record and Playback* (enregistrer et rejouer). Les auteurs ont d'abord enregistré les positions et les forces appliquées par un opérateur expert. Ces informations ont été rejouées par la suite à un opérateur novice pour les lui enseigner. Les positions étaient transmises par un retour direct via l'interface haptique alors que les informations sur les forces étaient transmises via un retour visuel (indirect). Ce retour indirect consistait à afficher des indices visuels pour informer l'apprenant simultanément sur la force qu'il était en train d'appliquer et la force référence de l'expert. La méthode compare les essais effectués par un apprenant avant l'apprentissage avec des essais effectués par le même apprenant après l'apprentissage. Les résultats montrent une amélioration des compétences

perçues des apprenants, cependant aucune mesure objective n'a été utilisée pour évaluer l'apprentissage. De plus, le système utilisé présentait certains inconvénients. En effet, la taille du robot utilisé semble être trop grande, ce qui remet en cause son utilisabilité en tant qu'outil pour écrire.

De leur côté Williams, Srivastava, Conaster et Howell (2004) ont utilisé le guidage haptique dans un système d'apprentissage pour un diagnostic médical en ostéopathie à travers le toucher (palpations). L'apprentissage se fait alors en deux étapes. La première consiste à suivre passivement le geste d'un expert à travers une interface haptique. La seconde étape consiste à retracer la trajectoire de l'expert activement avec l'aide de certains indices visuels. Une étude expérimentale comparant un apprentissage avec ces deux étapes avec un apprentissage basé uniquement sur la deuxième étape a été présentée. Les résultats de l'étude ont montré que l'apprentissage dans la première condition (guidage haptique suivi du guidage visuel) permet de réduire les erreurs de position par rapport à l'apprentissage dans la deuxième condition (guidage visuel seul).

Gillespie, O'Modhrain, Tang, Zaretsky et Pham (1998) ont également présenté une étude sur l'apprentissage de geste par la communication haptique. Ils ont développé le *Virtual Teacher* (l'enseignant virtuel), un système basé sur des agents intelligents permettant à des novices d'apprendre à déplacer correctement une grue virtuelle à travers la communication haptique. Cependant, les résultats de l'étude ont montré que le système n'a pas amélioré de manière significative la courbe d'apprentissage des participants novices. Les auteurs ont lié ces résultats au fait que la tâche choisie soit très peu dépendante des informations haptiques.

Morris, Tan, Barbagli, Chang et Salisbury (2007) ont de leur côté exploré l'utilisation du retour haptique pour enseigner une habileté motrice abstraite qui consiste à mémoriser une séquence de forces. La tâche consistait à guider la main des participants à l'aide d'une interface haptique. Le guidage s'effectuait le long d'une trajectoire plane en demandant au participant de mémoriser une séquence de forces unidimensionnelles à travers trois conditions d'apprentissage : un apprentissage haptique, un apprentissage visuel et un apprentissage visuo-haptique. L'apprentissage a été mesuré par la précision de la mémorisation des séquences de forces. Les résultats de l'étude ont montré que l'apprentissage visuo-haptique permet une mémorisation plus précise de la séquence de force en comparaison avec les deux autres conditions. Les résultats ont montré également que l'apprentissage visuel était plus efficace que l'apprentissage haptique seul. Cependant la tâche choisie semble trop abstraite. Ceci peut de notre point de vue, avoir une influence négative sur l'implication des participants dans l'apprentissage.

La synthèse de ces études montre que le guidage haptique combiné avec un guidage visuel permet à un opérateur d'apprendre efficacement certaines caractéristiques (forces appliquées, cinématique du geste, ...etc.) des gestes techniques fins dans différentes tâches. Cependant, l'utilisation d'un système robotisé pour communiquer ces informations haptiques présente certains inconvénients. D'abord, le guidage haptique est basé sur une stratégie d'enregistrement d'un geste de référence. Or, pour plusieurs gestes techniques, il est difficile de définir un geste de référence unique. En effet, deux experts peuvent avoir deux gestes différents bien que ces derniers soient tous les deux optimaux. Ensuite, le guidage haptique par un robot ne permet de transmettre que des informations sur la position ou sur la force (mais pas les deux à la fois). Enfin, la collaboration avec le robot est moins riche qu'une collaboration avec un opérateur humain. En effet, l'interaction directe avec un expert humain (même si elle est à distance) est plus riche car elle permet de combiner plusieurs canaux de communication : verbal, visuel et haptique. Ceci permet par exemple au novice de questionner l'expert, et à l'expert de donner davantage d'explications sur le geste enseigné. Elle permet aussi au novice d'avoir un accès direct aux gestes de l'expert. Cette situation interactive entre les deux

opérateurs leur permet d'élaborer, autour du geste technique, un RC plus efficient car les informations échangées dans ce cas sont plus riches.

3.3.4 La communication haptique dans les EVC

Très peu de recherches ont abordé la communication haptique dans les EVC. En effet, comparer à d'autres modalités, la communication haptique nécessite un contact physique pour transmettre de l'information. Or, le contact physique est difficile à reproduire à distance. Cependant, avec l'avènement de nouvelles interfaces haptiques, cette communication devient de plus en plus envisageable, même à distance. Quelques études expérimentales concernant cette forme de communication sont examinées brièvement ici. L'une des principales problématiques abordées par ces études concerne les effets de la communication haptique sur la performance des utilisateurs pour accomplir différentes tâches, et le sentiment de présence et de coprésence avec le partenaire distant dans les EVC utilisés. C'est le cas par exemple de l'étude de Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater (2000) : les sujets y étaient invités à jouer un jeu en collaboration avec un « expert » (représenté par un des expérimentateurs) dans un EVC. La tâche consistait à passer un anneau virtuel sur un fil de fer tout en évitant ou minimisant les contacts entre ces deux objets. Chacun des deux opérateurs devait « pousser » l'anneau d'un côté pour pouvoir le déplacer en collaboration avec le partenaire. Deux conditions expérimentales ont été comparées : une condition avec un retour visuel seul et une condition combinant un retour visuel avec un retour haptique. Les résultats de cette étude ont montré que le retour haptique permet d'améliorer le sens de coprésence perçu par les partenaires et d'améliorer les performances d'exécution de la tâche lorsque les partenaires travaillent ensemble (la performance a été mesurée par un score combinant le nombre de contacts entre l'anneau et le fil de fer et le temps d'exécution de la tâche). Durlach et Slater (1998) ont noté dans un article lié à la même étude que les facteurs qui contribuent à un sentiment de coprésence sont liés au fait de pouvoir observer directement les effets des actions du partenaire sur l'environnement et d'être capable de travailler en collaboration avec ses partenaires pour interagir sur l'environnement. Dans une autre étude présentée par Sallnäs, Rasmus-Gröhn et Sjöström (2000), les auteurs ont montré que les participants effectuaient des tâches de comanipulation d'objets virtuels plus rapidement et avec davantage de précision dans un EVC avec retour haptique comparé à un EVC avec retour visuel seul. Dans cette étude, les participants devaient soulever ensemble des cubes virtuels pour recomposer un objet plus grand en exerçant une pression de chaque côté de ces cubes. Les communications verbales entre les participants étaient interdites dans cette étude. Les résultats ont montré également que le retour haptique permettait d'accroître le sentiment perçu de présence dans l'EV mesuré (par un questionnaire). Par ailleurs, aucun effet de la présence/absence du retour haptique sur le sentiment de coprésence n'a été observé. Les auteurs ont alors justifié ce résultat par le fait que les communications verbales (audio) sont importantes pour le sentiment de coprésence. Une autre problématique a été abordée par les recherches sur la communication haptique dans les EVC : les délais de transmissions induits par les réseaux de communication. En effet, pour assurer la cohérence des interactions dans l'EV et la stabilité du système, ces délais doivent être réduits. Ces problèmes ne seront pas abordés dans cette thèse.

En résumé, les rares recherches sur les interactions interpersonnelles à travers le sens haptique dans les EVC se sont essentiellement focalisées sur l'apport de cette modalité pour les performances des utilisateurs et pour les sensations de présence dans l'EV et de coprésence avec les partenaires. L'observation des différents résultats obtenus suggère que la communication haptique permet d'améliorer les performances des utilisateurs dans certaines tâches collaboratives. Ces résultats suggèrent également que cette forme d'interaction a des effets positifs sur le sentiment de présence dans l'EV et sur le sentiment de coprésence avec les partenaires distants. Les utilisateurs apprécient

l'expérience de communication par le sens haptique dans une variété de situations et se sentent confiants en interagissant les uns avec les autres grâce à cette modalité.

3.4 Bilan

La synthèse de cette revue de littérature permet de comprendre comment s'effectue la communication autour des gestes techniques fins entre deux opérateurs (ou plusieurs opérateurs). La méthode la plus utilisée est donc la communication visuelle à travers laquelle un opérateur peut montrer visuellement à son partenaire en quoi consiste le geste en question. Ce canal est souvent combiné avec le canal verbal qui permet d'élargir le RC construit entre les deux opérateurs. Ce type de communication est souvent utilisé pour enseigner des gestes techniques fins (tels que les gestes chirurgicaux). Cependant certaines études ont montré que la communication haptique pouvait également améliorer la communication autour des gestes en complétant les informations transmises par les deux autres canaux. En effet, des informations sur les forces à exercer ou sur les sensations haptiques sont difficiles à décrire aussi bien verbalement que visuellement. De plus, dans une situation de collaboration à distance dans un EV, la communication visuelle devient problématique. En effet, les gestes techniques dans ce cas doivent être reproduits à travers des avatars. Or, reproduire des gestes techniques fins sur des avatars virtuels nécessite une instrumentation des utilisateurs, généralement intrusive. Ceci risque d'empêcher les opérateurs d'accomplir leur tâche de façon optimale. Une alternative peut alors être l'utilisation de la communication haptique. Cependant, à l'heure actuelle, les études sur ce canal de communication restent insuffisantes. Certaines des études ont montré l'apport de ce type de communication dans un cadre social, permettant ainsi à des opérateurs d'échanger des émotions à distance. D'autres études ont essayé de démontrer l'efficacité de la communication haptique pour le transfert des habilités motrices à travers le guidage manuel. Les résultats ont montré que la communication haptique améliore les transferts de ces habilités. Cependant, ces systèmes se basent sur une communication haptique entre un opérateur humain et un robot (bras haptique). Ceci implique que ces systèmes sont mono utilisateurs. Il est donc nécessaire d'étendre ces solutions à des applications collaboratives permettant des interactions homme-homme plus riches.

Dans le domaine des EVC, la communication haptique a été essentiellement étudiée pour son apport au sentiment de coprésence. Les résultats ont montré que ce type de communication pouvait effectivement augmenter ce sentiment. Cette revue de littérature fait alors émerger un certain nombre de questions :

- est-ce que la communication haptique peut avoir une influence sur la construction d'un RC dans une situation d'interaction homme-homme ?
- quelle forme prendrait alors cette communication dans le cadre d'un EVC permettant des interactions homme-homme autour des gestes techniques ?

Nous allons essayer de répondre à ces deux questions à travers l'étude présentée dans la suite de ce chapitre.

3.5 Solution proposée

3.5.1 Les Paradigmes du guidage manuel :

Dans cette partie, une nouvelle possibilité pour la communication autour des gestes techniques dans les EVC est présentée. Cette solution est basée sur le paradigme d'apprentissage par guidage de la main. Ce paradigme est observable, par exemple, chez les enfants qui apprennent à écrire en ayant leur main guidée par leur enseignant. Cette méthode semble être efficace pour apprendre l'écriture

manuelle. Cependant, elle présente deux inconvénients majeurs : d'abord un expert ne peut travailler qu'avec un seul novice à la fois. De plus, ayant un seul outil partagé entre les deux, l'un d'entre eux n'aura pas un contact direct avec celui-ci. Ceci peut détériorer la perception du geste. Pour mieux comprendre ce dernier problème, la classification des différentes approches de guidage manuel entre un novice et un expert présentée par Gillespie et al. (1998) est utilisée. Ainsi, en situation de (co) manipulation d'un outil pour accomplir un geste un novice et un expert peuvent avoir :

- un contact indirect : dans ce cas le novice et l'expert tiennent l'outil par deux points distincts. Il n'existe dans ce cas, aucun contact direct entre les deux opérateurs. L'expert dirige alors l'outil, et l'apprenant peut suivre passivement le déplacement de ce dernier. L'inconvénient de cette méthode est que le novice ne peut pas faire la distinction entre les signaux générés par l'environnement (les retours d'efforts de l'environnement vers l'outil) et ceux générés par l'expert (les forces exercées par l'expert sur l'outil).
- un double contact : dans ce cas, le novice tient l'outil alors que l'expert tient la main du novice (Figure 43). L'avantage dans ce cas, est que le novice est « aux premières loges » pour sentir l'action de l'expert et la réaction de l'outil. Il distingue alors plus facilement la source des informations qui lui parviennent (qu'il s'agisse de l'outil ou de l'expert). Cependant, dans cette approche, l'expert peut être gêné dans l'exécution de ses gestes puisqu'il ne manipule plus directement l'outil. Ceci peut avoir comme conséquence d'altérer sa construction d'une image mentale de la situation et de gêner l'exécution de ses gestes.
- un contact unique : dans ce cas, les rôles sont inversés, puisque c'est le novice qui tient la main de l'expert qui tient à son tour l'outil. Cette approche facilite l'exécution des gestes pour l'expert. Cependant, il est évident qu'elle rend la construction d'une image mentale difficile pour le novice. Ce qui peut gêner son apprentissage.

Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients. Notre objectif a donc été d'essayer de trouver une forme de compromis entre elles.



Figure 43 : la communication haptique pour enseigner l'écriture manuelle, dans ce cas on parle d'un double contact

3.5.2 Le paradigme de WYFIWIF

Pour surmonter les problèmes décrits précédemment, un nouveau paradigme de guidage est proposé : « Ce que je ressens est ce que tu ressens » (**What You Feel Is What I Feel**). Pour illustrer ce paradigme, un système basé sur le couplage de deux bras haptiques est mis en place. Ce couplage permet d'avoir une configuration de type maître-esclave (Figure 44). Dans cette configuration, un des deux bras couplés (l'esclave) reproduit exactement les mêmes comportements que le premier bras (le

maître). Ce couplage permet alors, à un opérateur de communiquer directement à travers les bras haptiques avec son partenaire. Ainsi tous les gestes que l'opérateur « maître » produit et tous les retours d'efforts qu'il perçoit sont reproduits sur le bras haptique de l'opérateur « esclave ». Le partenaire peut alors suivre passivement les gestes du maître, et mieux comprendre ses actions.

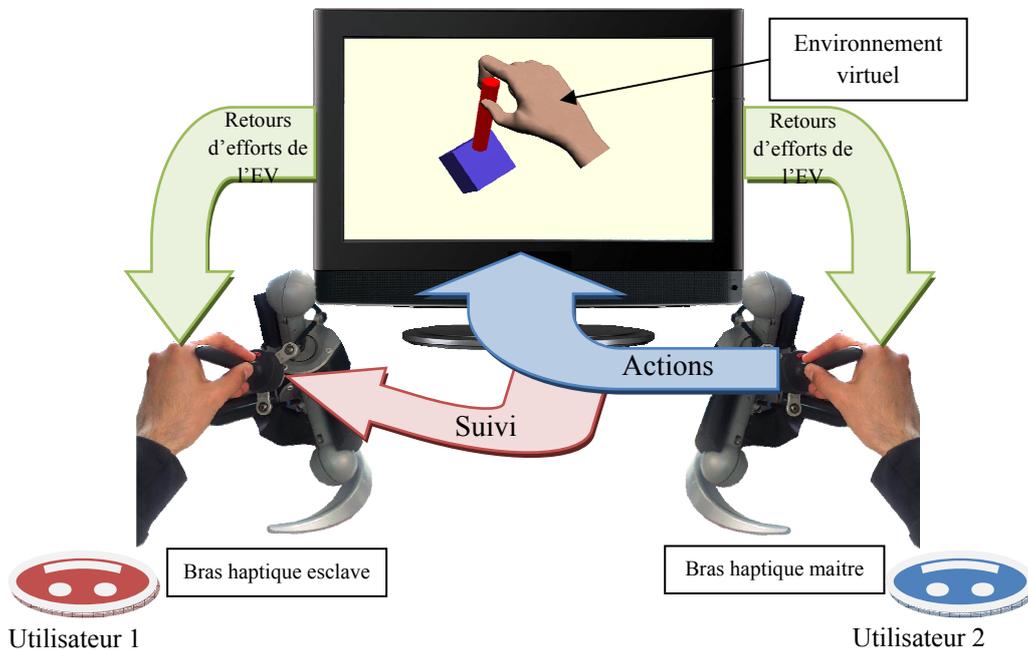


Figure 44 : Couplage des deux bras haptiques et principe du paradigme WYFIWIF

Ainsi, pour une tâche autour de laquelle un opérateur veut donner à un (ou plusieurs) partenaire(s) des informations sur un geste, les avantages d'un tel système peuvent être multiples :

- un couplage de plusieurs bras haptiques peut permettre à un seul opérateur expert d'interagir avec plusieurs opérateurs novices à la fois à travers un EVC partagé,
- l'interaction directe avec un opérateur humain permet de combiner plusieurs canaux de communication à la fois (même si les interlocuteurs sont distants) : une communication verbale (à travers une liaison audio), visuelle (à travers l'EV) et haptique à travers les bras haptiques. Ceci permet à un opérateur de démontrer ses connaissances directement à travers l'action et non plus uniquement à travers une interaction verbale,
- l'expert n'est pas gêné dans l'accomplissement de sa tâche puisqu'il manipule directement l'outil,
- l'expert peut exprimer ses connaissances sous une forme qu'il maîtrise mieux (l'exercice des gestes), et qu'il peut, bien évidemment, soutenir par des explications verbales,
- le novice a un accès direct (visuel et haptique) aux gestes de l'expert et peut percevoir directement les stimuli provenant de l'EV. En cas de doute, la communication verbale peut lui permettre de lever les ambiguïtés. Ceci peut l'aider à construire correctement son image mentale de la situation et à acquérir les habiletés de l'expert,

Ce couplage peut également fonctionner d'une manière bilatérale. Dans ce cas, les rôles du maître et de l'esclave sont interchangeables à tout instant. Il est alors possible, dans une situation de collaboration, de permettre à deux opérateurs d'échanger des informations sur leurs activités courantes et sur les gestes qu'ils exécutent dans l'EV. Ils peuvent également collaborer pour effectuer le geste ensemble.

Ainsi, un certain nombre de questions surgissent :

- quelles sont les informations qui peuvent être transmises à travers le canal haptique ?
- quelle influence peut avoir la communication haptique sur l'élaboration du RC et ainsi sur la collaboration dans un EVC ?
- quelle influence peut avoir la communication haptique sur le sentiment de coprésence avec un partenaire distant dans un EVC ?
- comment peut-on évaluer les effets de la communication haptique sur la performance des opérateurs dans un EVC ?
- est-ce que la multiplication des sources d'information (verbale, visuelle et haptique) peut avoir des effets négatifs sur l'attention des opérateurs et sur leur charge cognitive ?

L'utilisation de ce paradigme dans un EVC peut alors avoir deux impacts :

- enrichir le RC construit entre les opérateurs avec des informations plus précises sur les forces exercées, les trajectoires et les vitesses nécessaires pour accomplir le geste. Ceci peut avoir un impact positif sur les performances dans certain type de tâches telles que l'apprentissage d'un geste.
- donner à un opérateur davantage d'informations sur les activités de son partenaire à travers un accès direct à ses gestes. Ceci peut permettre d'accroître la sensation de coprésence dans l'EVC et encourager ainsi les utilisateurs à travailler ensemble.

Une étude expérimentale est mise en place pour essayer de répondre aux questions posées et vérifier l'apport que peut avoir le paradigme du WYFIWIF dans la communication autour des gestes techniques. Le paradigme a été testé aussi bien dans une situation de coopération dans laquelle les rôles des deux partenaires étaient prédéfinis (expert-novice), que dans une situation de collaboration dans laquelle les rôles des deux partenaires pouvaient être interchangeables, voire identiques. Cette étude est présentée dans la section suivante.

4 Etude expérimentale

4.1 Analyse d'une tâche complexe : un geste d'insertion d'aiguille dans le corps

4.1.1 *Choix de la tâche*

L'étude s'est portée sur des gestes techniques fins nécessitant la manipulation d'un outil. L'un des domaines dans lequel la communication haptique semble pouvoir être bénéfique est la chirurgie et plus précisément la chirurgie minimale invasive à travers les gestes d'insertion d'aiguille en radiologie interventionnelle. En effet, dans ce domaine, les radiologues sont amenés à exécuter des gestes très précis en manipulant des outils spécifiques. L'intérêt d'étudier les formes de collaboration autour de ce type de geste à travers un EVC est alors double :

- actuellement dans la situation réelle, les radiologues n'ont aucun programme de formation gestuelle spécifique. La rapidité du mouvement, la précision du geste, la finesse du toucher ou encore la sûreté sont encore appris sur « le tas » à travers l'observation des experts dans les situations d'opération. Etudier l'apprentissage de ce type de geste à travers des EV peut aider à comprendre comment ces informations sont transmises entre deux opérateurs humains et permettre d'étudier l'apport de la communication haptique dans ce type de situation,
- un système collaboratif à distance pourrait également être un outil de diagnostic et de discussion entre spécialistes pour le traitement de certains cas « difficiles ». Ce type de tâches peut engendrer certaines interactions collaboratives nouvelles telles que la comanipulation des outils, ou la coplanification des opérations. Etudier ce type d'interactions peut aider à comprendre comment les opérateurs élaborent ensemble un RC efficace. Ceci facilite la conception d'EV supportant des interactions collaboratives.

La première étape de notre étude a été l'analyse de l'activité des radiologues experts sur le terrain pour comprendre en quoi consistent leurs gestes, quelles sont ses contraintes et quelles sont les décisions que nous devons prendre pour concevoir un EVC qui permettrait la collaboration autour de ce type de tâches.

4.1.2 *Contexte*

L'analyse de l'activité de l'insertion d'aiguille en radiologie interventionnelle a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche commun entre l'équipe robotique de l'IRCCyN et le service de radiologie du CHU de Nantes : le projet *RobMed*⁶. L'analyse présentée dans cette section est le résumé d'un travail d'observation de l'activité des radiologues sur le terrain pendant une durée totale de six mois.

4.1.3 *Présentation de la radiologie interventionnelle*

Le radiologue est un médecin spécialiste qui réalise des radios (avec un appareil à rayons X), des examens par ultrasons (appareil à ultrasons), un scanner, une imagerie par résonance magnétique (IRM), une imagerie vasculaire (artériographie, angiographie) ou encore un examen de médecine nucléaire (scintigraphie, tomographie) pour dépister un signe de malformation, d'anomalie ou de maladie, ou encore pour vérifier si un traitement est efficace. Ce type de praticiens peut aussi être

⁶ <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/RobMed/>

amené à pratiquer la radiologie interventionnelle (en particulier sous scanner et sous échographie). Le radiologue peut alors effectuer des biopsies, des drainages, des infiltrations et des radiofréquences. Cette profession possède donc un aspect de diagnostic et un aspect thérapeutique. La pratique de la radiologie interventionnelle peut s'effectuer avec le diplôme de radiologue, l'étudiant (alors en apprentissage) peut commencer à pratiquer (sous la tutelle d'un praticien expérimenté) dès le premier semestre d'internat. La radiologie interventionnelle sous scanner consiste à réaliser un geste très peu invasif qu'on appelle un geste de ponction. Les observations ont permis de comprendre qu'il existe plusieurs types de gestes de ponction en radiologie interventionnelle (principalement biopsie et traitement hyper-fréquence de tumeur). Ces gestes sont généralement basés sur des techniques similaires mais utilisent parfois des outils différents. Pour cette étude, le choix est porté sur des gestes de biopsie (Figure 45). Cette technique consiste à introduire une aiguille dans le corps du patient, pour atteindre une zone « cible » (un organe ou une tumeur) et effectuer un prélèvement de tissus avec l'aide d'un imageur médical (scanner X). Les tissus prélevés sont ensuite examinés au microscope pour déterminer leur nature (étude anatomopathologique). Les bénéfices de cette approche sont de limiter l'ampleur et les risques par rapport aux interventions chirurgicales classiques tout en gagnant en précision.



Figure 45 : A gauche, geste d'insertion de l'aiguille pour effectuer une biopsie pulmonaire. A droite, l'aiguille à biopsie et son coaxial (*Temno*)

4.1.4 Description de l'activité de biopsie

L'environnement de travail des radiologues est constitué de deux salles :

- la salle de scanner, dans laquelle se trouve le patient allongé sur la table du scanner. Cette salle est isolée par des cloisons, des portes et une vitre empêchant les rayons de nuire au personnel médical,
- la salle de commande dans laquelle se trouvent les appareils (ordinateur, retour vidéo des perfusions et télécommande du scanner) pilotés par les manipulateurs⁷ en électroradiologie médicale.

L'opération débute par une séquence de repérage à travers les images de scanner grâce à laquelle on obtient des coupes axiales dans la zone suspecte. Le radiologue, à l'aide des manipulateurs, repère alors des images références pour définir un point d'incidence (point d'entrée) et développe une stratégie pour atteindre la cible à ponctionner de la façon la plus prudente (Figure 46). Après stérilisation de la zone à inciser, pause des champs opératoires et anesthésie du patient, le praticien insère l'aiguille à biopsie ou coaxial (Figure 45) en veillant à lui donner l'angle voulu pour atteindre la

⁷ Personnels assistants les radiologues pendant les interventions

cible. Il est à noter que l'aiguille de biopsie est graduée pour permettre au praticien de mieux se rendre compte de l'avancement de celle-ci dans le corps et des amplitudes de ses gestes. La surveillance de la progression de l'aiguille se fait par les coupes répétitives du scanner, ce qui oblige le radiologue à faire plusieurs allers-retours entre la salle des commandes et la salle de scanner où se trouve le patient. Une fois que les images révèlent que la cible est atteinte, le radiologue déploie et enclenche le mécanisme de l'aiguille à biopsie pour prélever le tissu. Ce tissu sera conservé dans du formol afin de pouvoir être analysé dans un autre service.

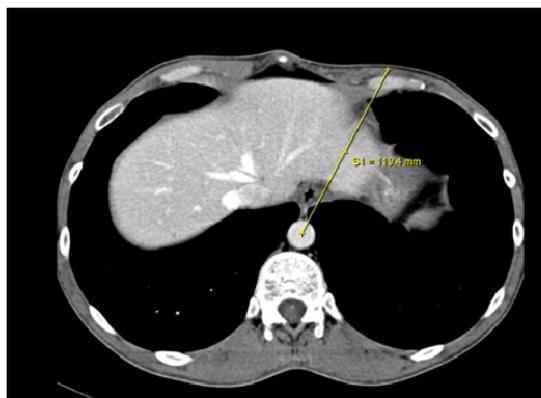


Figure 46 : Repérage de la cible et définition du pont d'incidence

4.1.5 **Analyse de l'activité des radiologues au CHU de Nantes**

Le but de cette analyse est de s'immerger dans le service de radiologie afin de comprendre avec le plus de détails possible la radiologie interventionnelle et en particulier les actes de biopsie. Cette analyse de l'existant permet une meilleure compréhension de ce type d'activité et aide à concevoir un EVC adapté.

Techniques : observations, vidéos, questionnaire, montage vidéo

La découverte de la profession de radiologue est passée par une phase d'observation ouverte sur le terrain. Le but était alors de découvrir la radiologie interventionnelle et de voir progressivement émerger les faits et les événements sans a priori. Cette étape a consisté à observer pendant plusieurs semaines des interventions de tout type. Ces observations ouvertes ont permis de comprendre le rôle des différents opérateurs et les interactions entre eux (verbales, gestuelles), la durée moyenne d'une intervention, la répartition des tâches, les contraintes physiques, les difficultés rencontrées et les contraintes organisationnelle. Cette étape a permis de mettre en place une grille d'observation pour un meilleur recueil des données. A l'aide de cette grille, une deuxième étape d'observation, qui a permis de construire un découpage chronologique de l'activité, a été effectuée. Les interventions ont alors été enregistrées à travers un montage vidéo synchronisé (Deux caméras ont été utilisées : la première dans la salle de scanner et l'autre dans la salle des commandes). Cette observation a été complétée par des interviews des praticiens à posteriori. Cette étape avait pour objectif de préciser les actions, de corriger les mauvaises interprétations de l'observateur et d'expliquer les raisonnements mis en œuvre. Pour ce faire, cinq praticiens ont été soumis à un questionnaire et le praticien le plus expérimenté à un entretien d'auto confrontation (à travers les vidéos de ses interventions). Les outils utilisés (Grille d'observation, questionnaires) sont présentés en détail en annexes (pages 198 et 201 respectivement).



Figure 47 : Observation de l'intervention à travers un montage vidéo synchronisé (à gauche, la salle de commandes ; à droite la salle de scanner).

4.1.6 Résultats de la phase d'analyse de l'activité

Liste chronologique des sous activités

Les différentes observations ainsi que les entretiens avec les praticiens ont permis de construire une liste chronologique des sous activités qui se déroulent pendant une opération de biopsie en radiologie. Cette liste chronologique permet de décrire les invariants de l'activité globale interventionnelle (voir l'annexe, page 203, pour une description détaillée de la chronologie des activités). L'activité globale peut être décomposée en deux grandes étapes :

- **la phase de planification de l'intervention** dans laquelle le praticien effectue un scanner pour localiser la cible et détermine (selon certaines contraintes) le chemin qu'il va suivre. Cette phase lui permet de choisir également la coupe de référence. Cette coupe constitue un plan vertical sur lequel il va essayer d'insérer l'aiguille (il simplifie le geste en un geste en 2 dimensions),
- **la phase d'intervention** dans laquelle le praticien va insérer l'aiguille à l'intérieur du corps pour atteindre la cible. Pendant cette phase, le praticien utilise un écran de contrôle (répétiteur) qui lui permet d'avoir la dernière image de scanner étudiée. Cette image, combinée avec les informations haptiques qui proviennent de l'insertion de l'aiguille lui permet de construire une image mentale de l'intérieur du corps du patient. Le praticien effectue alors des allers/retours entre la salle de scanner et la salle de manipulation pour vérifier qu'il a bien respecté la trajectoire planifiée et pour mettre à jour l'image du répétiteur. Une fois la cible atteinte, le praticien effectue le prélèvement de tissus à l'aide de l'aiguille.

Pour la conception de l'EVC, toutes les sous activités qui ne sont pas directement liées à la tâche d'insertion de l'aiguille ont été volontairement laissées de côté (ceci inclus entre autre, les interactions avec les manipulateurs, l'injection de produits d'anesthésie...etc.)

Description du geste

Pour réaliser une biopsie, le radiologue a besoin de ses deux mains, une pour stabiliser l'aiguille et une pour la faire pénétrer (généralement la main directrice). Pour progresser dans le corps du patient et atteindre la lésion ciblée, il a besoin d'exercer une pression sur son aiguille en effectuant une translation sur un axe vertical imaginaire (l'axe Z, Figure 49). Précisons que la force exercée n'est pas la même en fonction des couches intramusculaires (début), des organes traversés et du contact avec la

tumeur (fin). Il faut toutefois qu'il fasse attention à la notion de parallaxe, c'est-à-dire que plus l'aiguille est plantée profondément dans le corps du patient, plus le geste qu'il fait observe une inclinaison importante (Figure 48). Il a besoin aussi d'exercer des rotations sur un des deux axes (X et Y) ce qui lui permet de faire pivoter son aiguille.

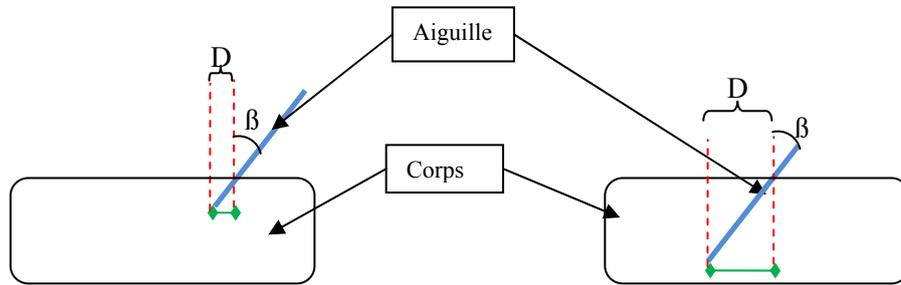


Figure 48 : effet de parallaxe, avec un même angle β plus l'aiguille est plantée profondément plus la distance D entre le point d'insertion et la verticale qui passe par la pointe de l'aiguille augmente.

Les contraintes du geste

Le praticien doit respecter un certain nombre de contraintes pour le choix de sa trajectoire et pendant l'exécution de son geste de biopsie :

- Eviter de faire plusieurs trajets dans le corps du patient,
- Tenir compte du phénomène de parallaxe,
- Choisir une coupe de scanner référence ce qui permet de simplifier la complexité du geste à un problème en 2D (il doit alors choisir entre des rotations sur l'axe X ou sur l'axe Y, voir la Figure 49),
- Choisir la voie la plus sécurisée (évite les organes dangereux pour le patient),
- Pour le choix de la trajectoire, tenir compte de la nature des tissus à traverser : certains peuvent être traversés sans danger pour le patient (graisse, muscles...etc.), certains sont interdits (organes vitaux), certains peuvent être traversés en respectant des contraintes (minimiser le volume traversé, minimiser le temps pendant lequel l'aiguille se trouve dans ces organes), Certains (l'os par exemple) ne peuvent pas être traversés,
- Le praticien peut s'appuyer sur les os ou sur certains organes pour sécuriser et/ou corriger sa trajectoire,
- L'opération doit se faire le plus rapidement possible.

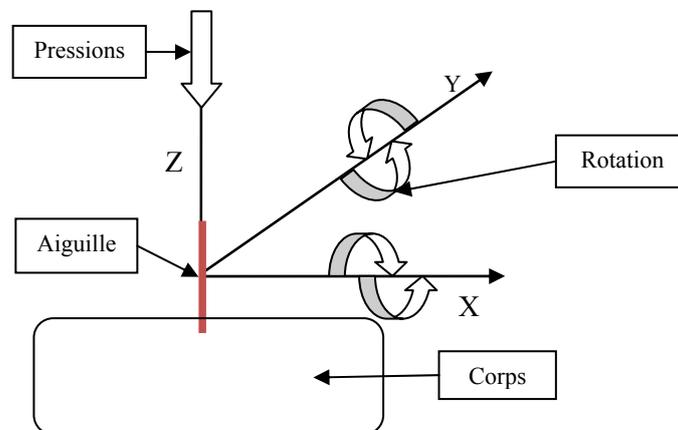


Figure 49: Vecteurs tridimensionnels sur lesquels s'appuient la pression et les rotations du praticien pendant une biopsie.

Apprentissages du geste de biopsie

Selon les praticiens interviewés, l'apprentissage de la radiologie interventionnelle se fait par expérience et débute dès la deuxième année d'internat. Les étudiants passent directement de la théorie à la pratique sur l'homme en commençant par des cas « faciles ». Il peut arriver que le praticien expert prenne la main de l'apprenant pour l'accompagner pendant l'intervention. Selon le praticien le plus expérimenté, les étudiants doivent être en mesure de pratiquer une biopsie de manière autonome entre la quatrième et cinquième année d'internat en radiodiagnostic et imagerie médicale. Il existe également des ateliers et groupes de travail dans lesquels les étudiants peuvent apprendre. A l'heure actuelle, il n'existe aucun simulateur pour l'apprentissage de ce type de geste.

Collaboration entre praticiens

Les entretiens avec les différents praticiens ont permis aussi de savoir qu'il existe une activité collaborative entre les différents praticiens. En effet, pour certains cas dit « difficiles », les praticiens peuvent se réunir pour discuter et prendre une décision commune pour la planification d'une opération. Des conférences et des ateliers de travail sont également organisés pour permettre aux praticiens de plusieurs régions de se retrouver pour discuter des différentes techniques qu'ils utilisent.

4.1.7 Choix pour la conception de l'EVC

Dans certains domaines, tels que la chirurgie, lorsque l'on conçoit un EV pour la formation, il est naturel de supposer qu'une simulation plus réaliste permettra d'aboutir à un meilleur résultat. Dans la pratique, il y a deux arguments qui s'opposent à un tel choix (Hutchins, Adcock, Stevenson, Gunn, & Krumpholz, 2005) :

- le coût : Concevoir un environnement chirurgical simulant la réalité est très coûteux. En effet, simuler le comportement du corps humain exige l'utilisation de beaucoup de ressources aussi bien matérielles que logicielles,
- le bénéfice : l'un des intérêts de l'utilisation d'un environnement simulé est précisément le fait qu'il ne soit pas réel. Il est donc important de tirer profit de cette différence entre l'EV et le monde réel pour permettre aux utilisateurs d'avoir de nouvelles expériences interactives. Ceci leur permet d'atteindre les objectifs de l'utilisation de l'EV dans de meilleures dispositions.

La conception de notre EVC a donc été guidée par ces considérations, ainsi que par les résultats de notre phase d'analyse de l'activité décrite précédemment.

Conception du contexte global

La salle de scanner a été intégralement modélisée en 3D pour reproduire le contexte général de l'opération de ponction. Cette modélisation avait pour objectif d'augmenter le sentiment de présence des utilisateurs dans l'EV et augmenter ainsi leur implication dans l'accomplissement de la tâche.



Figure 50 : Modélisation de la salle de scanner en 3D

Contenu essentiel

Cette partie concerne les éléments qui constituent le cœur de la tâche pour laquelle l'EV a été conçu. Elle inclut des éléments tels que le corps du patient (la peau, les organes, les os, la tumeur...etc.), l'aiguille et l'utilisateur ainsi que le comportement de tous ces éléments.

- Corps du patient : étant donné que l'EV n'était pas conçu pour apprendre l'anatomie du corps humain mais plutôt un geste de biopsie, une simulation réaliste du corps a semblé inutile. Ainsi, le corps du patient a été modélisé par une simple boîte 3D (Figure 52). La peau avait une élasticité semblable à celle d'une peau réelle. Ceci a permis de simuler le comportement d'une vraie peau lors de l'insertion de l'aiguille dans le corps. Selon les contraintes identifiées dans la phase d'analyse de l'activité, trois types d'organes étaient représentés à l'intérieur du corps virtuel : des organes permis (correspondants aux muscles ou encore à la graisse), des organes interdits (correspondants aux organes vitaux dont le perçage risque de tuer le patient) et des organes sensibles pouvant être percés en respectant certaines règles (les poumons par exemple). La tumeur à atteindre a également été considérée comme un organe car elle a les mêmes comportements que ceux-ci. Tous les organes ont été modélisés sous la forme d'ellipsoïdes déformables avec une couleur différente pour chaque type d'organe (Figure 51). Tous ces organes pouvaient être traversés ou être déformés en les poussant sur le côté. Les os ont été modélisés par des tubes 3D de couleur blanche. Ces tubes ne pouvaient pas être traversés par l'aiguille.

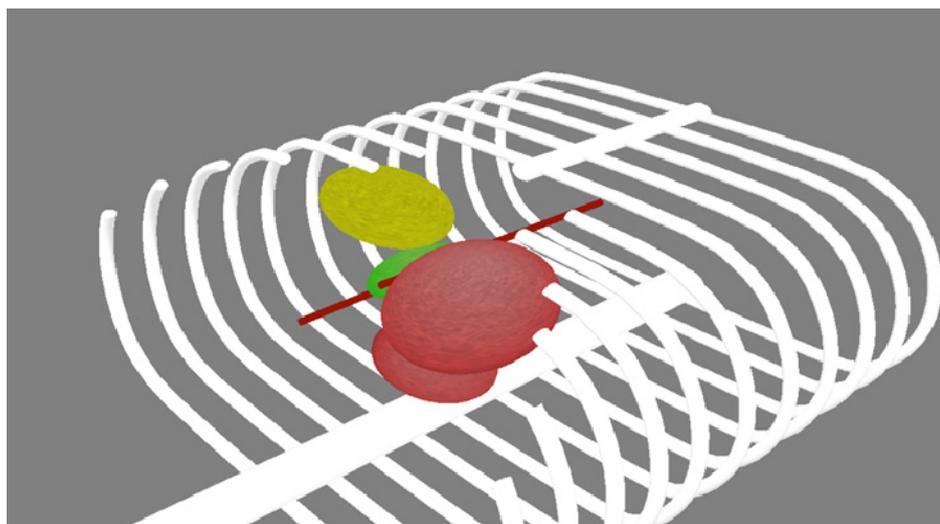


Figure 51 : modélisation de l'intérieur du corps

- Aiguille virtuelle : Pour faciliter la manipulation de l'aiguille virtuelle, les degrés de liberté du bras haptique (6Ddl) ont été réduits à 1 Ddl après le positionnement de l'aiguille au dessus du point d'incidence (pour guider l'utilisateur jusqu'à ce point), et 4 Ddl après l'insertion (3 rotations et une translation dans l'axe vertical qui permettait d'enfoncer l'aiguille). Les retours de forces étaient basés sur un modèle théorique de l'insertion de l'aiguille dans un foie de porc (Barbé, Bayle, & de Matheli, 2006). Les paramètres de ce modèle ont été modifiés (pour chaque type d'organe, la tumeur et la peau) pour simuler la sensation de traverser des couches différentes.
- L'utilisateur : Le praticien était représenté dans l'EV par sa main virtuelle qui pouvait agir sur l'aiguille (Figure 52). Les actions de l'utilisateur sur le bras haptique étaient alors reproduites pour déplacer la main virtuelle.

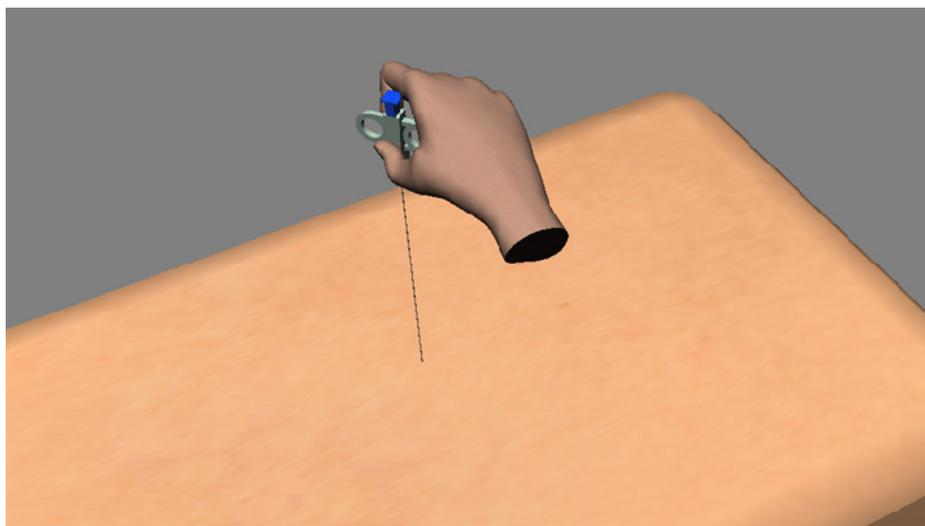


Figure 52 : modélisation du contenu essentiel

Interactions avec l'environnement

Pour simuler les deux phases de l'activité du praticien (planification et intervention), deux vues distinctes ont été conçues :

- une vue pour la planification : qui permet de voir et de manipuler les images de scanner du corps virtuel. Cette vue permet également de planifier la trajectoire (à travers différents points de repères) et de choisir le point d'incidence et la coupe de référence. Dans cette vue, l'utilisateur ne pouvait pas agir sur l'aiguille virtuelle,
- une vue pour l'insertion de l'aiguille : c'est la vue de l'extérieur du corps dans laquelle l'utilisateur doit manipuler l'aiguille pour l'insérer dans le corps du patient. Cette vue permet également d'avoir un écran de contrôle (correspondant au répéteur) dans lequel la dernière image de scanner est affichée.

Conscience de la situation

Pour permettre à l'utilisateur d'être conscient du déroulement de ses actions, certains indices ont été inclus dans l'EV :

- La position 3D (vecteur 3D) de la pointe de l'aiguille était affichée en temps réel sur l'écran. Ceci avait pour objectif d'une part de compenser l'absence d'une vision stéréoscopique de l'EV, et d'autre part de simuler les graduations de l'aiguille de biopsie.
- En plus des retours de forces, des messages étaient affichés à l'écran pour prévenir l'utilisateur lorsqu'il entrait en contact avec certains organes.
- Des retours visuels étaient affichés sur l'écran lorsqu'un utilisateur produisait une action (changement de plan, activation du bras haptique pour la manipulation de l'aiguille...etc.). Ces indices avaient pour objectif, d'une part de le rendre conscient des actions qu'il produisait, et d'autre part, de faire la différence entre ses actions et les actions de son partenaire lorsqu'il était dans une situation de collaboration.

Indices spatiaux

En tenant compte des résultats de la première étude, des indices spatiaux fixes ont été ajoutés aussi bien dans la vue extérieure que dans la vue intérieure pour faciliter le repérage des différents objets (aiguille, organes...etc.) dans l'EV. Ceci a pour objectif de faciliter l'élaboration d'un RSF entre les opérateurs. De plus, les mêmes systèmes de référence utilisés en anatomie⁸ ont été conservés.

4.1.8 Evaluation de la complexité des exercices

Au total 12 scénarios ont été choisis pour les différentes étapes de l'évaluation de l'EVC. La complexité des différents scénarios ainsi que l'utilisabilité du système et des différents dispositifs utilisés ont été évaluées avant le début des expérimentations. 8 collègues (doctorants à l'Ecole des Mines de Nantes) ainsi que 5 spécialistes (un radiologue, un anesthésiste, un vétérinaire, un dentiste et un médecin généraliste) ont participé à cette phase d'évaluation pré expérimentale. Cette phase a permis de classer les scénarios selon leur complexité et de corriger certains aspects liés à l'utilisabilité de l'interface. Cette phase a permis également d'estimer les durées pour la réalisation des différents exercices.

4.2 Objectifs et hypothèses

4.2.1 Objectifs

L'étude expérimentale permet d'évaluer le WYFIWIF. Les objectifs de cette étude sont donc de montrer :

⁸ Cours de neuromorphologie du D^r D. Hasboun à consulter sur <http://www.chups.jussieu.fr/>

- Les avantages de transmettre des informations sur des gestes à travers un système de guidage haptique et non plus uniquement à travers une démonstration visuelle et/ou verbale,
- L'influence du type d'apprentissage (verbal, visuel et haptique) sur l'élaboration du RC dans une situation de collaboration. Ceci pourrait avoir des répercussions sur :
- Les informations échangées : le canal de communication utilisé peut avoir une influence sur la nature des informations échangées entre les opérateurs,
- La performance des opérateurs pour acquérir des informations sur des gestes techniques en étant guidés par un expert,
- La performance des opérateurs pour accomplir des gestes collaboratifs à distance,
- La compréhension mutuelle entre les opérateurs en ayant ou pas des moyens supplémentaires pour renseigner leur interlocuteur sur leurs activités courantes,
- La charge de travail à laquelle les opérateurs doivent faire face en ayant plusieurs sources d'informations simultanées,
- Le sentiment de coprésence dans un EV partagé avec des partenaires distants,

Pour atteindre ces objectifs, deux situations collaboratives ont été mises en place :

- **Une situation expert-novice**, qui implique une entité « expert » qui a un certain niveau d'expertise du geste en question et qui veut transmettre son savoir, et des entités « novices » qui sont là pour apprendre le geste de ponction,
- **Une situation novice-novice**, impliquant deux opérateurs novices qui doivent collaborer pour planifier et accomplir ensemble le geste de ponction.

4.2.2 Hypothèses

Les objectifs précédents permettent de faire émerger un certain nombre d'hypothèses que nous tenterons de valider à travers l'étude expérimentale :

- Situation expert-novice :
 - **Hypothèse H1** : Le type d'apprentissage (verbal, visuel ou haptique) a une influence sur le contenu du RC essentiellement en ce qui concerne la nature des informations échangées entre un expert et un novice :
 - un apprentissage par guidage haptique permet un meilleur transfert d'informations procédurales liées aux actions concrètes (les caractéristiques du geste) : amplitude du geste, trajectoire optimale, forces exercées,
 - un apprentissage théorique permet un meilleur transfert d'informations de type déclaratif : (le respect des contraintes pour la planification du geste, le respect des règles, de la sécurité).
 - **Hypothèse H2** : la communication directe entre le novice et l'expert et l'apprentissage à travers un guidage haptique permet au novice d'avoir de meilleures performances pour accomplir le geste individuellement : geste plus rapide, plus précis, nécessitant moins de contacts avec les différents organes...etc.,
 - **Hypothèse H3** : L'apprentissage théorique permet au novice d'avoir de meilleures performances pour planifier le geste individuellement : respect des différentes contraintes en minimisant le temps de planification, le nombre de points de repères, le nombre d'images de scanner...etc.,
- Situation novice-novice :
 - **Hypothèse H4** : La nature des informations mises en évidence lors de l'élaboration du RC dépend du type d'apprentissage suivi : des opérateurs ayant suivi un apprentissage

théorique mettent en évidence des informations théoriques (règles de planifications...etc.), et des opérateurs ayant suivi un apprentissage visuo-haptique mettent en évidence des informations haptiques (perception des organes, manipulation de l'aiguille, perception des forces exercées...etc.).

- **Hypothèse H5 :** Le type d'apprentissage a une influence sur les performances collaboratives des opérateurs. Lorsque les partenaires apprennent à échanger des informations haptiques, ils ont plus de facilités à effectuer un guidage haptique pour échanger des informations sur l'exécution d'un geste.
- **Hypothèse H6 :** En développant un RC autour de la communication haptique, les partenaires augmentent le sentiment de coprésence avec un partenaire distant dans un EVC. En effet, la communication haptique optimise la construction d'un RC plus vaste entre les partenaires. Ce RC favorise la compréhension mutuelle et le travail d'équipe. Ceci a pour effet d'augmenter le sentiment de coprésence avec le partenaire à travers l'EV partagé.
- **Hypothèse H7 :** le développement d'un RC à travers la communication haptique permet d'avoir de meilleures performances dans une tâche de comanipulation d'un outil. En effet, la communication haptique doit permettre aux partenaires de synchroniser leurs gestes pour manipuler ensemble un outil partagé vers un but commun.

4.3 Architecture logicielle

Après avoir imaginé les détails de conception de notre EVC, une partie de notre travail a été consacrée à son développement.

Les composants de l'EVC ont été modélisés en utilisant le logiciel *3ds max 2008 (autodesk)*. Pour rendre l'EV interactif, les modèles 3D ont été importés dans l'environnement de prototypage *Virtools (Dassault Systèmes)*. Les comportements dynamiques des différents composants (élasticité de la peau, déformation des organes, perçage des organes) ainsi que les différents modèles de retours de force ont été programmés en utilisant le *Virtools Scripting Language (VSL)* et le *Virtools Software Development Kit (SDK)* en C++.

L'architecture logicielle consistait en une partie client représentée par l'application 3D *Virtools* et une partie serveur représentée par le module IPSI (*Interactive Physics Simulation Interface*) développée par *Haption*. Les communications entre l'application 3D et l'IPSI server étaient assurées par le module IPP (*Interactive Physic Pack*) développé par *Haption*. IPP permet de connecter différentes interfaces haptiques et d'ajouter ainsi des interactions haptiques à l'environnement. La figure suivante présente un schéma détaillé de l'architecture logicielle utilisée :

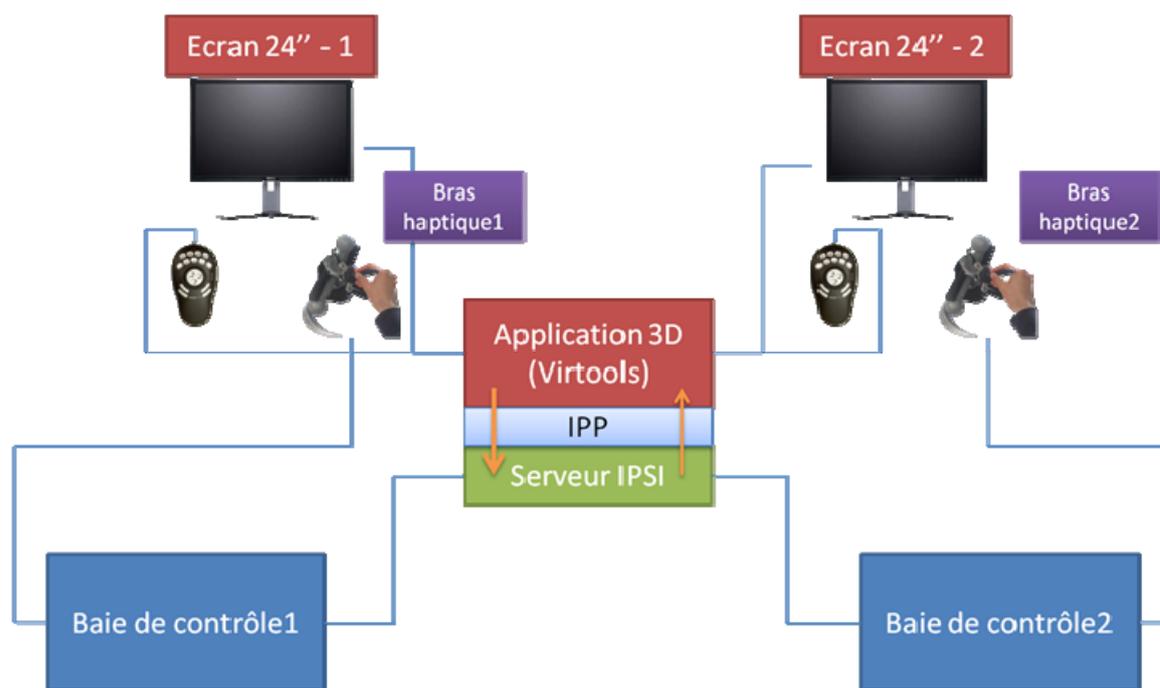


Figure 53 : Architecture logicielle

4.4 Méthode

4.4.1 *Participants*

64 étudiants de la faculté de médecine de Nantes et de l'Ecole vétérinaire de Nantes, âgés de 19 à 29 ans ont participé à cette étude (34 garçons et 30 filles). Quatre participants ont été éliminés de l'analyse des données : Deux d'entre eux ont été éliminés parce qu'ils n'ont pas correctement respecté certaines des instructions de la tâche, les deux autres ont été éliminés à cause d'un problème lié au dispositif expérimental. Par conséquent, les analyses présentées étaient fondées sur les données de 60 participants. Tous les participants ont préalablement répondu à un questionnaire pour évaluer leur niveau d'expertise quant à l'utilisation des jeux vidéo, des modeleurs 3D (le niveau d'expertise a été mesuré par leur fréquence d'utilisation des jeux vidéo et/ou modeleurs 3D sur une échelle à 5 échelons), mais aussi de la pratique des ponctions. 6 participants étaient gauchers. Les volontaires ont par la suite été répartis en 30 groupes : 15 binômes masculins et 15 binômes féminins. Aucun des participants n'avait pratiqué une biopsie sous scanner préalablement à cette étude. Aucun des participants n'avait une connaissance préalable de l'EV utilisé ni des objectifs de l'étude. La majorité des étudiants qui provenaient des deux écoles se connaissaient entre eux. Cependant, des binômes composés d'étudiants qui se connaissaient le moins possible ont été formés. Ceci avait pour objectif de minimiser les effets d'un RC préalable à l'étude. Pour les sessions collaboratives, les présentations entre les participants se faisaient 5 minutes avant le début de celles-ci. Tous les étudiants ont reçu une gratification (d'un montant de 30€) pour les remercier de leur participation à cette étude. Le but de cette gratification était essentiellement de motiver les étudiants à être davantage impliqués dans l'étude.

4.4.2 *Les sessions expérimentales*

Pour vérifier les différentes hypothèses, quatre sessions expérimentales ont été planifiées :

- **session d'apprentissage** : Dans cette session, un expert (un expérimentateur entraîné) devait enseigner à tous les participants le geste de ponction pour effectuer des biopsies. Il devait alors selon la condition expérimentale expliquer, guider et/ou démontrer la façon optimale pour résoudre quatre exercices « types ». Ces exercices ont été choisis pour permettre à un novice d'apprendre toutes les contraintes possibles qu'il devra respecter (voir l'annexe, page 208).
L'apprentissage a été effectué selon les trois conditions expérimentales suivantes :
 - **La condition d'apprentissage théorique (AT)** : basée uniquement sur une explication verbale des intentions d'actions. L'expert se contente de décrire (verbalement) à l'apprenant le geste référence et ce qu'il veut qu'il fasse.
 - **La condition d'apprentissage visuel (AV)** : dans laquelle on introduit la notion de guidage visuel c'est-à-dire que les actions de l'expert sont visualisées par l'apprenant en même temps qu'elles sont commentées. Par la suite, l'expert peut corriger les erreurs de l'apprenant en lui montrant ce qu'il veut qu'il fasse.
 - **La condition d'apprentissage visuo-haptique (AVH)** : dans ce cas tous les types de guidages sont permis : haptique (c'est-à-dire le suivi de la cinématique du geste à travers une interface haptique, ainsi l'apprenant peut suivre le geste de l'expert) visuel et verbal. ceci devrait améliorer la compréhension des intentions d'actions par rapport aux autres situations décrites précédemment.
- **session d'application individuelle** : Dans cette session, chaque participant devait résoudre **individuellement** trois nouveaux exercices d'application. Les exercices ont été choisis pour permettre à chaque participant de démontrer qu'il a bien appris le geste de ponction et qu'il a bien assimilé les contraintes. L'objectif de cette session était de déterminer si le type d'apprentissage avait une influence sur la performance des utilisateurs novices,
- **session de coplanification** : Dans cette session, les participants devaient **travailler en binômes** pour résoudre quatre nouveaux exercices. Les participants étaient regroupés selon leur type d'apprentissage initial (les participants constituant un binôme devaient avoir suivi le même type d'apprentissage). L'objectif de cette session était de voir l'impact du type de guidage sur la façon dont les apprenants vont réagir dans une situation de collaboration. L'intérêt était de voir si le type d'apprentissage utilisé pour apprendre le geste technique influence la façon dont les apprenants vont collaborer pour trouver ensemble la solution à des problèmes similaires (élaboration d'un RC, utilisation de la communication haptique pendant la manipulation, instauration d'un leadership...etc.),
- **session de comanipulation** : Dans cette session, les participants devaient **résoudre ensemble** un seul exercice en **comanipulation**. Les mêmes groupes ayant participé à la session précédente ont été conservés. Les participants devaient alors manipuler l'aiguille à deux en utilisant chacun son propre bras haptique. L'intérêt de cette session était de savoir si le type d'apprentissage ainsi que le RC élaboré dans la session précédente pouvaient avoir des effets sur l'accomplissement d'un geste collaboratif.

4.4.3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en deux écrans LCD 22 pouces identiques et d'un PC (Intel Pentium double cœur à 2 ghz, avec 4 GO de mémoire vive et une carte 3D). Pour interagir avec l'EV, chacun des participants dispose d'un bras à retour d'effort de type *Virtuose 6D desktop* de la société *Haption*. Le *Virtuose* permet de faire des déplacements et d'avoir un retour d'effort selon 6 degrés de liberté. Ce dispositif est adapté aux postes de travail individuels. Chaque bras haptique est relié à une baie de commande, qui est à son tour reliée au PC principal par un réseau Ethernet assurant ainsi la communication avec l'EV. Cette liaison réseau assure également la communication entre les deux bras

haptiques. Chaque participant dispose également d'une souris et d'une télécommande multimédia de type *Shuttle pro* pour interagir avec l'interface graphique. La souris permet à l'utilisateur de positionner les points repères pour planifier les opérations, et d'interagir avec l'interface à travers les différents composants graphiques (*widgets*). Le *shuttle pro* permet à l'utilisateur de changer les coupes du scanner, de positionner l'aiguille manuellement sur le point d'incidence choisi et d'activer/désactiver les interactions avec le bras haptique.

L'EV utilisé consiste en une grande « boîte » en 3D représentant le corps du patient virtuel (Figure 54). Le corps se trouve dans une salle de scanner et est posé sur la table. Le point d'action de l'utilisateur dans l'EV est représenté par une main virtuelle qui tient une aiguille de biopsie. Les déplacements du stylet du bras haptique correspondent aux déplacements (dans un repère relatif) de l'aiguille dans l'EV. Un marquage sur la peau permet à l'utilisateur de localiser le point d'incidence qu'il a choisi.

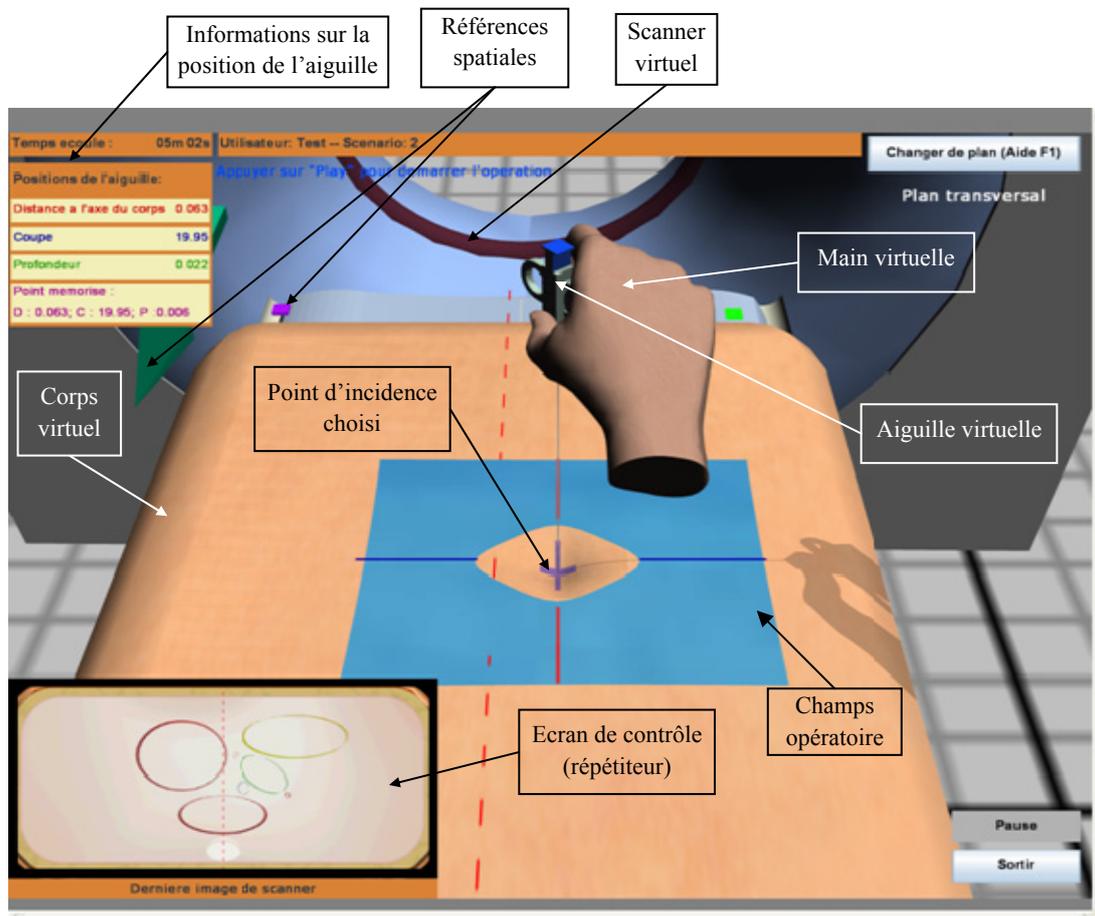


Figure 54 : Vue principale de l'Environnement 3D

La vue scanner permet à l'utilisateur de voir l'intérieur du corps avec les différents organes et la tumeur cible (Figure 55). Il pouvait ainsi planifier son opération en choisissant autant de points de repère qu'il le souhaitait. Ces points étaient sauvegardés dans une liste que l'utilisateur pouvait consulter à tout moment. L'utilisateur pouvait basculer entre les deux vues autant qu'il le voulait. Cependant, il pouvait manipuler l'aiguille uniquement dans la vue principale.

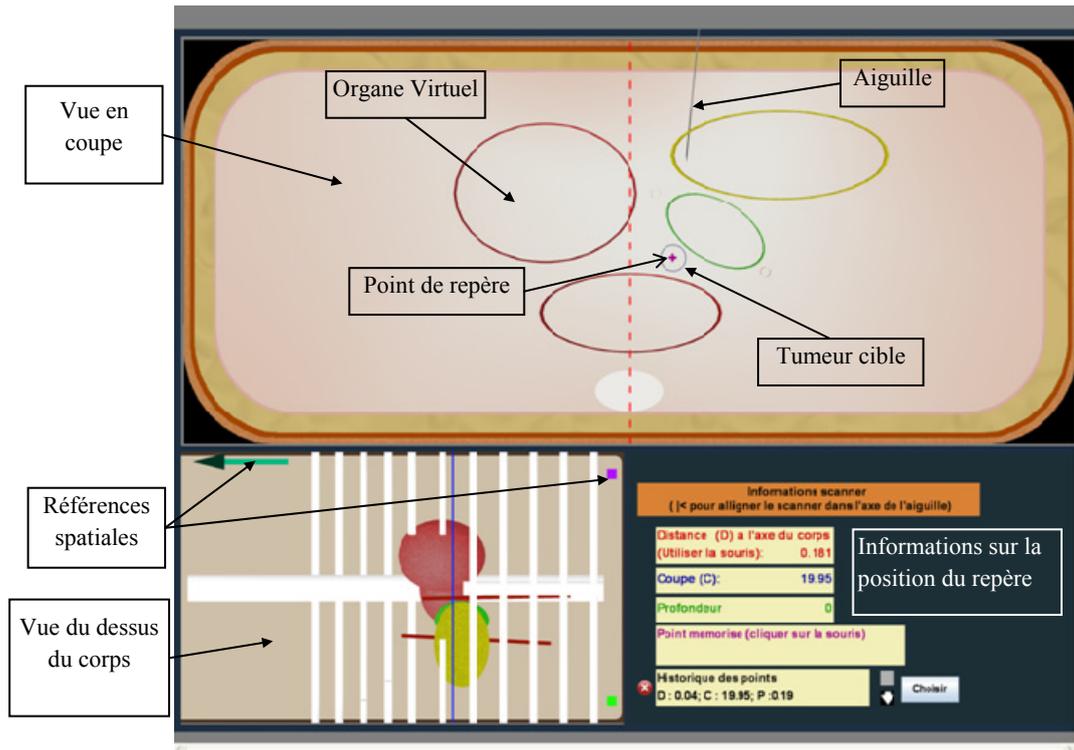


Figure 55 : Vue scanner (intérieur du corps virtuel)

Selon les sessions et selon les conditions expérimentales certaines interactions étaient permises ou inhibées :

- un asservissement (en position et en force) des deux bras haptiques permettait à l'un des bras de reproduire exactement le même comportement que l'autre bras (en effort et en position), ce qui permettait de mettre en place le paradigme du WYFIWIF,
- les manipulations de l'aiguille virtuelle à travers les bras haptique pouvaient être activées par un des deux *shuttle pro* à la fois ou par les deux en même temps.

Après la lecture des instructions, les participants étaient installés différemment selon la condition expérimentale (présentées dans la section suivante) et selon la session :

- **Pour la session participant/expert** : les participants étaient installés légèrement derrière l'expert de façon à voir ses gestes dans le même angle visuel que l'écran dans la condition d'apprentissage visuel (Figure 56). Pour la condition d'apprentissage visuo-haptique, les participants avaient en plus un bras haptique à travers lequel ils pouvaient suivre directement les gestes de l'expert (Figure 57). Pour la condition d'apprentissage théorique, les participants avaient des images papier représentant la manière de résoudre les différents exercices démonstratifs (Figure 58). Dans les trois conditions, l'expert donnait les mêmes explications verbales pour résoudre ces exercices.

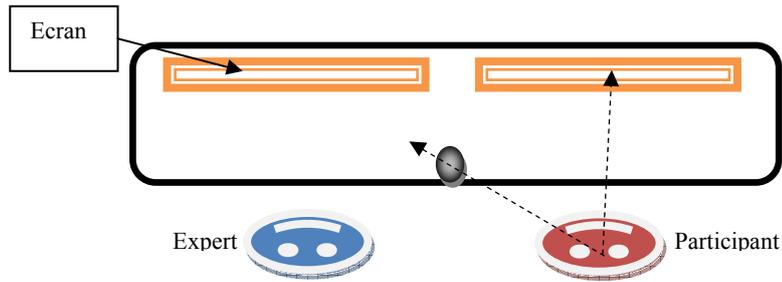


Figure 56 : participant/expert pour la condition de guidage visuel AV

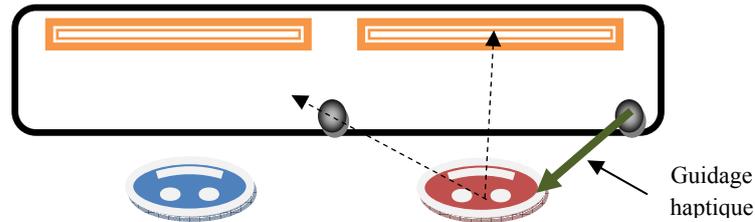


Figure 57 : participant/expert pour la condition de guidage visuo-haptique GHV

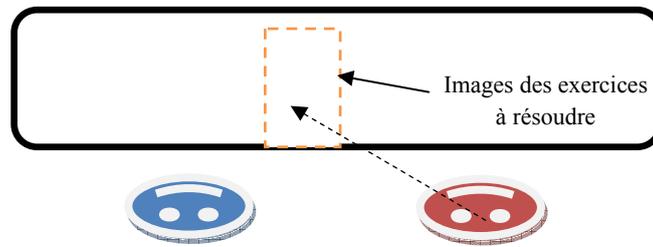


Figure 58 : Session participant/expert pour la condition avec instructions verbales uniquement AT

- **Pour la session d'application** : les participants étaient installés seul face à l'écran et pouvaient utiliser le bras haptique pour interagir avec l'EV (Figure 59).

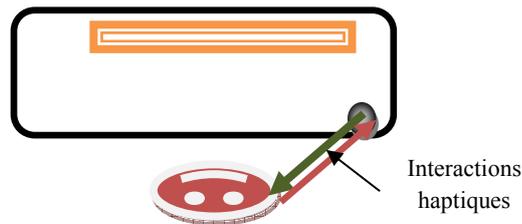


Figure 59 : la session d'application

- **Pour les sessions de coplanification et de comanipulation participants/participants** : pour les exercices communs, que ce soit pour la session de coplanification ou de comanipulation, les deux participants étaient placés côte à côte chacun face à un écran. Ils étaient séparés par un rideau les empêchant de se voir et les obligeant donc à communiquer verbalement (Figure 60).

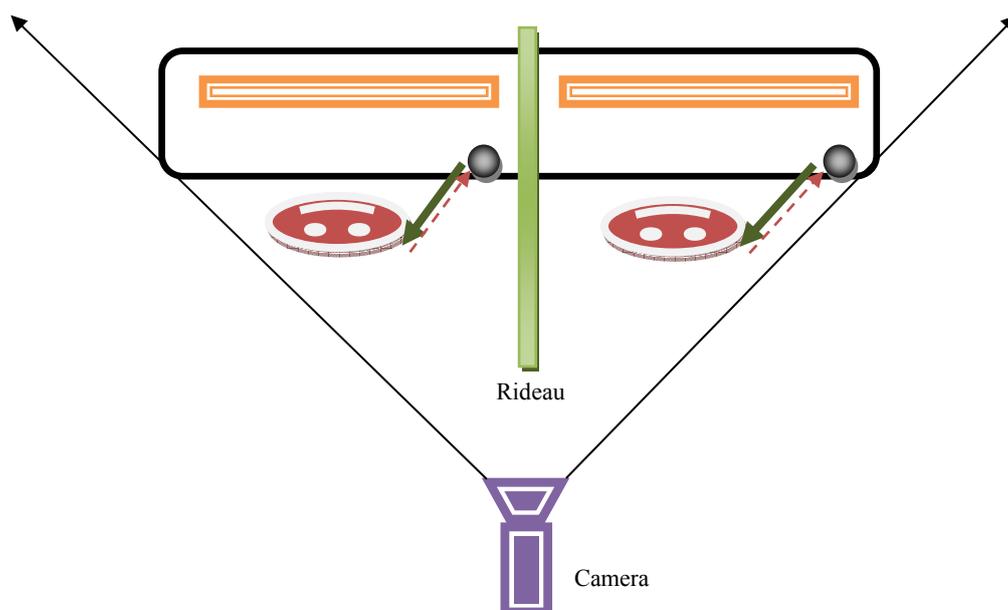


Figure 60 : Session participant/participant en coplanification et comanipulation

4.4.4 Les tâches

Avant le début des sessions expérimentales, l'utilisation de tous les dispositifs ainsi que l'interface graphique ont été expliqués à tous les participants. Ces derniers ont effectué par la suite des essais libres pour se familiariser avec l'utilisation de l'environnement 3D, des *shuttle pro* et du bras haptique. Les participants étaient invités à s'entraîner autant qu'ils le voulaient jusqu'à ce qu'ils se sentent à l'aise quant à l'utilisation des différents dispositifs. Ceci a permis de mettre tous les participants au même niveau par rapport à l'utilisation du bras haptique et de l'EV avant le début effectif des sessions expérimentales. Cette pré-session durait entre 10 et 20 minutes selon les participants. Par la suite, Chaque participant devait lire la fiche d'instructions (voir l'annexe, page 206) contenant toutes les règles à respecter pendant les interventions. La lecture des instructions (qui durait 10 minutes) était accompagnée d'une explication des contraintes à respecter pour ce type d'interventions. Toutes les règles étaient expliquées de la même façon à tous les participants. Ces derniers devaient participer par la suite aux 4 sessions suivantes :

- la session d'apprentissage : les participants devaient suivre une session d'apprentissage avec l'expert. Pour les trois conditions expérimentales, l'expert devait présenter à chacun des participants la façon optimale pour résoudre quatre exercices types. Le canal de communication entre l'expert et le participant dépendait alors de la condition expérimentale (apprentissage visuo-haptique, apprentissage visuel, apprentissage verbale). Les participants pouvaient demander à l'expert autant d'explications supplémentaires qu'ils le désiraient,
- la session d'application individuelle : après la session d'apprentissage chaque participant devait résoudre une série de trois exercices individuels. Aucune limitation du temps n'était imposée pour accomplir la tâche. Les participants ne pouvaient plus demander l'aide de l'expert pour résoudre les exercices. A la fin de cette session, les participants devaient répondre à un premier questionnaire post-expérimental, pour évaluer sa perception de l'EV (le questionnaire est présenté en annexe, page 239).
- la session de coplanification : après que chacun des deux participants d'un même groupe ait accompli sa session individuelle avec succès, les partenaires devaient revenir (quelques heures plus tard dans la journée) pour participer aux deux sessions collaboratives (Figure 61). Dans la

session de coplanification, les deux participants devaient planifier ensemble quatre opérations. Pour cette phase de planification, les deux participants avaient les mêmes droits quant à la manipulation de l'interface. Un carré avec la couleur d'un des participants (bleu ou rouge) était affiché à l'écran après chaque action pour informer les participants que celle-ci avait été produite par leur partenaire ou par eux même. Ils devaient alors synchroniser leurs actions et discuter ensemble pour trouver la meilleure solution possible pour chaque exercice. Lors de la phase d'opération, les deux partenaires avaient des rôles différents. En effet, seul un des deux participants (l'acteur) pouvait manipuler l'aiguille. Pendant ce temps, le deuxième participant (l'observateur) pouvait suivre passivement les gestes du premier à travers son bras haptique, mais n'était pas autorisé à agir sur le bras. L'observateur avait la possibilité néanmoins d'intervenir pour « bloquer » son partenaire en cas d'urgence. Dans ce cas il devait activer le bouton de concertation sur son *shuttle pro* (voir l'annexe, page 205). L'observateur avait pour consigne de n'utiliser ce bouton qu'en cas de « besoin » immédiat. Dans le cas contraire, il était bien sûr préférable de privilégier la discussion. Les rôles des deux participants dans cette session étaient alternés pour les quatre exercices.



Figure 61 : deux utilisateurs en train d'interagir ensemble dans l'EV

- La session de comanipulation : pour cette session, la phase de planification est exactement la même que celle pour la session précédente. Pour la phase de manipulation, les participants avaient dans ce cas le même rôle. Ils avaient pour instruction d'essayer d'accomplir le geste « ensemble ». Ils devaient ainsi, appuyer tout les deux sur le bouton d'activation du bras pour pouvoir manipuler l'aiguille virtuelle. Dans le cas contraire aucune action sur l'aiguille n'était possible. Lorsqu'un des deux participants appuyait sur le bouton, un carré correspondant à sa couleur s'affichait sur l'écran. L'activation du bras était donc symbolisée par l'affichage simultané des deux carrés à l'écran. Pour cette session les deux partenaires devaient résoudre ensemble un seul exercice. A la fin des deux sessions collaboratives, les participants devaient répondre à un deuxième questionnaire post-expérimental (le questionnaire est présenté en annexe, page 239).

Pour résoudre chaque exercice, les participants devaient passer par deux phases :

- une phase de planification de la tâche avec visualisation du futur trajet sur les images de scanner. Dans cette phase les opérateurs pouvaient positionner leurs points de repères à travers la trajectoire qu'ils devaient suivre tout en respectant les différentes contraintes,

- une phase d'opération dans laquelle les participants devaient réaliser le geste d'insertion de l'aiguille sur la base du « souvenir » du trajet planifié et du retour haptique.

Le tableau suivant résume les différentes sessions avec leurs durées moyennes :

Session	Durée moyenne
Présentation de l'interface+ Pré-tests+explications des règles	25 minutes
Session d'apprentissage	30 minutes
Session d'application	40 minutes
Questionnaire 1	5 minutes
Session de coplanification	50 minutes
Session de comanipulation	10 minutes
Questionnaire 2	10 minutes

Tableau 7 : Durées moyennes des différentes sessions expérimentales

4.4.5 Facteurs manipulés

Le tableau suivant résume les trois conditions d'apprentissages testées :

Condition	Type de guidage
Apprentissage théorique (AT)	<ul style="list-style-type: none"> • Explications verbales • Pas de guidage haptique • Pas de guidage visuel • L'apprenant apprendra sur des instructions papier
Apprentissage visuel (AV)	<ul style="list-style-type: none"> • Explications verbales • Pas de guidage haptique • Un guidage visuel : l'apprenant regarde ce que fait l'expert (sa main et le résultat de l'action sur l'écran)
Apprentissage visuo-haptique (AVH)	<ul style="list-style-type: none"> • Explications verbales • Guidage haptique : L'apprenant suit le geste de l'expert à travers le guidage de sa main par le bras haptique • Guidage visuel : l'apprenant regarde ce que fait l'expert (sa main et le résultat de l'action sur l'écran)

Tableau 8 : Conditions expérimentales

4.4.6 Données recueillies

Mesures subjectives

Les participants ont répondu à deux questionnaires post-expérimentaux (voir l'annexe, page 239) :

- un questionnaire d'évaluation de sa propre performance et qui concernait essentiellement : le sentiment de présence dans l'EV, la satisfaction, la confiance en soi, la performance estimée,

- un questionnaire d'évaluation de la performance collective : la compréhension du partenaire, la coprésence dans l'EV, la satisfaction, la confiance dans le groupe et la performance estimée (voir l'annexe, page 239).

Mesures objectives

Pour la session d'application : toutes les actions des participants ont été enregistrées dans des fichiers dédiés. Voici la liste des mesures qui ont servi à produire les résultats de cette étude :

- La durée totale pour la réalisation des différents exercices,
- Le temps mis pour commencer l'insertion de l'aiguille,
- Le nombre d'erreurs, mesuré par le nombre de perçages des organes interdits,
- La durée totale pour la planification du geste, mesurée par le temps total passé dans la vue scanner pendant l'intervention,
- La distance entre le centre de la cible et la position de la pointe de l'aiguille à la fin de l'intervention. Cette mesure permet d'évaluer le respect de la règle consistant à se rapprocher le plus possible du centre de la cible,
- Le nombre total de points de repères,
- Le nombre de points de repères avant la première insertion de l'aiguille,
- Le nombre de nouveaux points de repères,
- Le nombre de scanners effectués. Cette mesure permet d'évaluer le respect de la règle consistant à minimiser les scanners effectués et minimiser ainsi le taux d'exposition des patients aux rayons,
- L'amplitude du perçage par catégorie d'organes (toléré pour les organes permis sur toute la surface, moyennement toléré sur les organes sensibles sur la plus petite surface possible, non toléré sur les organes interdits). Cette mesure permet d'évaluer le respect de la règle consistant à minimiser l'amplitude de perçage,
- La durée totale du geste d'insertion, mesurée par le temps de manipulation de l'aiguille,
- Le nombre de collisions/contacts avec les organes (Le plus important étant les contacts avec les organes sensibles et les organes interdits). Les participants devaient alors minimiser le nombre de contacts avec ces organes lorsqu'ils les perçaient (uniquement pour les organes sensibles) ou lorsqu'ils les poussaient. Cette mesure permet d'évaluer l'habileté à contrôler les retours haptiques lorsque l'aiguille entre en collision avec ces organes.
- Le nombre total de gestes d'insertion,
- La profondeur du geste (amplitude moyenne, amplitude maximale),

Pour la session de coplanification et de comanipulation : En plus des mesures précédentes, d'autres données ont été recueillies pour évaluer la collaboration entre les participants dans chaque groupe :

- Etude des verbalisations pendant la planification et pendant l'opération : pour ces deux sessions, des enregistrements audiovisuels des expérimentations ont été réalisés. Tous les dialogues ont été fidèlement retranscrits. Ces verbalisations ont servi à étudier l'élaboration et le contenu du RC, les stratégies de résolution de problème, les incompréhensions...etc.

Pour la session de coplanification, le nombre de demandes de concertation (activation du bouton de concertation) a été mesuré.

4.5 Résultats

4.5.1 Session d'application

Performances

Effet du type d'apprentissage sur les performances globales

Les résultats sont résumés dans le Tableau 9 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 212) :

- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus rapides pour accomplir la tâche dans la condition AVH que dans la condition AV et la condition AT. Aucun effet significatif du type d'apprentissage n'a été observé sur la moyenne d'erreurs et sur le temps passé avant la première insertion de l'aiguille dans le corps.

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps total pour accomplir la tâche (en seconde)*	2243.2 (639.5)	2628.5 (579.4)	↘1876.1 (343.7)*
temps passé avant la première insertion (en seconde)	653.6 (288.9)	613.5 (167.0)	604.6 (150.4)
Moyenne des erreurs par exercice	0.4 (0.48)	0.55 (0.58)	0.3 (0.45)

Tableau 9 : comparaisons des performances globales des participants selon le type d'apprentissage

Performances liées à la phase de planification du geste

Les résultats sont résumés dans le Tableau 10 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 213) :

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps total pour planifier le geste (en seconde)	904.8 (323.1)	1037.3 (789.5)	789.5 (252.3)
Distance moyenne au centre de la cible (cm)	0.68 (0.18)	0.71 (0.18)	0.63 (0.13)
Amplitude de perçage des organes sensibles (cm)	12.9 (2.3)	12.8 (3.6)	12.1 (3.4)
Nombre total de repères	17.4 (5.8)	20.6 (11.7)	16.1 (5.7)
Nombre de repères avant la première insertion	11.1 (3.7)	11.5 (1.6)	11.5 (2.4)
Nombre de repères supplémentaires*	12.1 (6.3)	15.3 (10.4)	↘ 8.5 (4.3) *
Nombre de scanners	50.4 (21.4)	49.0 (19.0)	43.5 (13.6)

Tableau 10 : comparaisons des performances des participants pendant la phase de planification selon le type d'apprentissage

- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont utilisé moins de repères supplémentaires que les participants dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.

- Aucun effet significatif du type d'apprentissage n'a été observé pour les autres variables dépendantes.

Performances liées à l'exécution du geste

Les résultats sont résumés dans le Tableau 11 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 217) :

- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont **accompli les gestes plus rapidement** que les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont **minimisé les contacts avec les organes sensibles** en comparaison avec les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et dans la condition AV.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AV ont effectué **davantage de gestes d'insertion** que les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AVH. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et la condition AVH.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont **effectué des gestes d'insertion de plus grande amplitude moyenne** que les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont effectué des gestes d'insertion de plus grande amplitude maximale que les participants dans la condition AVH. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans les deux autres conditions.

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
<u>Temps pour accomplir le geste (en seconde)*</u>	673.5 (201.5)	743.9 (271.8)	↘ 491.3 (156.8) *
<u>Contacts avec les organes sensibles*</u>	32.9 (29.0)	31.9 (28.8)	↘ 15.7 (15.2) *
<u>Nombre de gestes d'insertion*</u>	69.4 (28.2)	↗ 96.1 (30.0) *	62.2 (18.4)
<u>Amplitude moyenne des gestes (cm) *</u>	↗ 2.5 (0.7) *	2.1 (0.6)	2.1 (0.5)
<u>Amplitude maximale des gestes (cm)*</u>	↗ 7.6 (1.0) *	6.9 (1.0)	↘ 6.6 (0.8) *

Tableau 11 : comparaisons des performances des participants pendant la phase d'exécution du geste selon le type d'apprentissage

4.5.2 Session de coplanification

Performance

Performances globales

Les résultats sont résumés dans le Tableau 12 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 220) :

- Les comparaisons deux à deux montrent que les binômes ont été **plus lents pour accomplir la tâche** dans la condition AV que dans les deux autres conditions. Aucun effet significatif du type d'apprentissage n'a été observé sur la moyenne d'erreurs et sur le temps passé avant la première insertion de l'aiguille dans le corps.

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps total pour accomplir la tâche (en seconde)*	3705.6 (982.6)	↗ 4841 (1001.2) *	3717.9 (726.5)
temps passé avant la première insertion (en seconde)	1055.2 (208.6)	1014.1 (235.5)	1169 (287.9)
Moyenne des erreurs par exercice	0.8 (0.8)	0.9 (0.7)	0.7 (0.6)

Tableau 12 : comparaisons des performances globales des binômes selon le type d'apprentissage

Performances liées à la phase de planification du geste

Les résultats sont résumés dans le Tableau 13 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 221) :

- Les comparaisons deux à deux montrent que les binômes ont été **plus rapides pour planifier le geste** dans la condition AT que dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été **plus précis pour viser le centre de la cible** dans la condition AT que dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'est observée entre les participants dans la condition AV et dans la condition AVH.
- Les comparaisons deux à deux montrent que **l'amplitude de perçage des organes sensibles a été plus importante** pour les binômes dans la condition AV que les binômes dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AVH.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont utilisé **davantage de points repères** que les participants dans la condition AT. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV, et entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH.
- Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le **nombre de repères utilisés** avant la première insertion de l'aiguille.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé **moins de repères supplémentaires** que les participants dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH.

- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont effectué **moins de scanners** que les participants dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH.

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
<u>Temps total pour planifier le geste (en seconde)*</u>	↘ 1422.0 (306.8) *	2121.0 (399.7)	2054.1 (384.5)
<u>Distance moyenne au centre de la cible (cm)*</u>	↘ 0.6 (0.1) *	0.8 (0.1)	0.8 (0.1)
<u>Amplitude de perçage des organes sensibles (cm)*</u>	4.8 (0.8)	↗ 6.1 (0.4)*	4.9 (1.1)
<u>Nombre total de repères*</u>	↘ 24.0 (6.7) *	32.8 (8.0)	↗ 34.7 (9.6) *
<u>Nombre de repères avant la première insertion</u>	17.4 (4.5)	17 (3.6)	21.4 (6.9)
<u>Nombre de repères supplémentaires*</u>	↘ 6.6 (5.4) *	15.8 (8.1)	13.3 (4.8)
<u>Nombre de scanners*</u>	↘ 56.1 (10.7) *	89.5 (27.12)	83.0 (13.16)

Tableau 13 : comparaisons des performances des binômes pendant la planification selon le type d'apprentissage

Performances liées à l'exécution du geste

Les résultats sont résumés dans le Tableau 14 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 224) :

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
<u>Temps pour accomplir le geste (en seconde)*</u>	1163.07 (429.3)	1090.07 (294.9)	↘ 692.8 (80)*
<u>Contacts avec les organes sensibles*</u>	11.2 (3.1)	22.4 (20.1)	↘ 5.7 (2.9)*
<u>Nombre de gestes d'insertion*</u>	113.4 (40.2)	130.8 (55.8)	↘ 82.1 (17.20)*
<u>Amplitude moyenne des gestes (cm)</u>	2.72 (0.4)	2.31 (0.4)	2.38 (0.5)
<u>Amplitude maximale des gestes (cm)</u>	7.24 (0.6)	7.5 (0.5)	7.66 (0.6)

Tableau 14 : comparaisons des performances des binômes pendant l'exécution du geste selon le type d'apprentissage

- Les binômes dans la condition AVH ont accompli les gestes plus rapidement que les binômes dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les binômes dans la condition AVH ont minimisé davantage le nombre de contacts avec les organes sensibles que les binômes dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont minimisé davantage le nombre de gestes d'insertion que les participants dans les deux autres

conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.

- Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur les autres variables dépendantes testées : l'amplitude moyenne et l'amplitude maximale des gestes.
- Aucun des participants n'a utilisé le bouton d'arrêt pour demander explicitement une concertation sur l'exécution du geste. Aucun traitement statistique n'a donc été réalisé pour cette mesure.

1.1.1 Session de comanipulation

Performance

Performances globales

Les résultats (Tableau 15) ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur la performance globale des binômes (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 227).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps total pour accomplir la tâche (en seconde)	164.7 (99.3)	188.7 (155)	133.0 (77)
temps passé avant la première insertion (en seconde)	194.6 (151.8)	139.25 (51.3)	141.5 (22.8)
Moyenne des erreurs par exercice	0.4 (0.6)	0.1 (0.3)	0.1 (0.3)

Tableau 15 : comparaisons des performances globales selon le type d'apprentissage (session de comanipulation)

Performances liées à la phase de planification du geste

Les résultats sont résumés dans le Tableau 16 (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 228) :

- Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps de planification du geste, la distance au centre de la cible, l'amplitude de perçage des organes sensibles, le nombre de repères avant la première insertion et le nombre de scanners effectués.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé moins de points repères que les binômes dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.
- Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé moins de points repères supplémentaires que les binômes dans les deux autres conditions. Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV.

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps total pour planifier le geste (en seconde)	220.3 (99.2)	285.5 (155.8)	278.5 (114)
Distance moyenne au centre de la cible (cm)	0.5 (0.2)	0.7 (0.3)	0.7 (0.2)
Amplitude de perçage des organes sensibles (cm)	5.4 (0.6)	5.7 (0.7)	5.6 (0.3)
<u>Nombre total de repères*</u>	↘ 3.6 (0.8)*	6.8 (2.2)	5.9 (1.5)
Nombre de repères avant la première insertion	3.4 (0.6)	3.7 (1.0)	4.4 (1.2)
<u>Nombre de repères supplémentaires*</u>	↘ 0.2 (0.6)*	2.3 (2.1)	1.5 (1.5)
Nombre de scanners	14.7 (7.9)	19.7 (12.6)	17.2 (8.0)

Tableau 16 : comparaisons des performances de planification selon le type d'apprentissage (session de comanipulation)

Performances liées à l'exécution du geste

- Les résultats (Tableau 17) ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur les performances d'exécution du geste (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 232).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Temps pour accomplir le geste (en seconde)	164.7 (99.3)	188.7 (155.3)	133.0 (77.9)
Contacts avec les organes sensibles	10.2 (12.7)	30.3 (38.8)	6.8 (8.9)
Nombre de gestes d'insertion	18.3 (8.1)	24.4 (18.5)	19.5 (10.6)
Amplitude moyenne des gestes (cm)	2.78 (0.6)	2.58 (0.7)	2.82 (0.9)
Amplitude maximale des gestes (cm)	7.30 (1.6)	7.38 (1.1)	7.45 (1.6)

Tableau 17 : comparaisons des performances des binômes pendant la phase d'exécution du geste selon le type d'apprentissage (session de comanipulation)

4.5.3 Analyse des verbalisations

Une analyse préliminaire en utilisant le logiciel *Tropes* a été effectuée. Cette analyse concerne uniquement la session coplanification. Les résultats de cette analyse sont résumés dans ce qui suit. Seules les catégories de verbalisations pour lesquelles des différences statistiquement significatives ont été observées sont présentées dans ce qui suit (les analyses statistiques détaillées sont présentées en annexe, page 234).

Utilisation des pronoms

Les participants ont utilisé majoritairement le pronom personnel "je" dans la condition AT et dans la condition AV (voir le Tableau 18). D'un autre côté, dans la condition AVH, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre l'utilisation des pronoms "je" et "on" (voir Tableau 18).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Je	↗40.5 (7.6)*	34.5 (7.8)	↗38.6 (6.9)*
Tu	23.6 (5.8)	24.0 (8.0)	28.0 (5.0)
On	27.9 (6.0)	33.2 (8.1)	27.8 (5.8)

Tableau 18 : utilisation des pronoms

Autres verbalisations

- Les connecteurs :
 - *Les connecteurs d'addition* : Les participants ont utilisé davantage les connecteurs d'addition (ensuite, et, ...) dans la condition AV que dans la condition AVH (Tableau 19).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Connecteurs d'addition	22.7 (5.2)	↗ 23.9 (5.6)*	↘18.9 (3.1) *

Tableau 19 : Utilisation des connecteurs d'addition

- Les adjectifs :
 - *Les adjectifs d'objectifs* : Les participants ont utilisé davantage les adjectifs objectifs (transversale, perpendiculaire, jouable, sagittal, droit, direct, dernier, intermédiaire) dans la condition AVH que dans la condition AT (Tableau 20).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Adjectifs d'objectifs	↘17.2 (5.1) *	22.9 (9.7)	↗ 25.4 (8.1) *

Tableau 20 : utilisation des adjectifs d'objectifs

- Modalisation :
 - *Le lieu* : Les participants ont fait moins de références au lieu (vers là, en haut, jusqu'à ...) dans la condition AVH que dans les deux autres conditions (Tableau 21).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références au lieu	26.6 (3.7)	28.5 (4.3)	↘24.0 (1.9) *

Tableau 21 : référence au lieu

- *L'intensité* : Les participants ont davantage fait référence à l'intensité dans la condition AVH (« pas encore », « trop », « plus », « à peu près », « pas assez », « un peu trop »...) que dans la condition AV. On observe aussi une tendance à avoir plus de références dans la condition AVH que dans la condition AT. Cependant, cette tendance n'est pas statistiquement significative (Tableau 22).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références à l'intensité	28.2 (3.4)	↘ 25.5 (3.7)*	↗ 29.2 (3.7)*

Tableau 22 : références à l'intensité

- Les univers principaux
 - *La perception* : Les participants ont davantage fait référence à la perception (« toucher la veine », « vue », « le rouge ») dans la condition AVH que dans les deux autres conditions (Tableau 23).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références à la perception	0.8 (2.1)	2.4 (2.8)	↗ 5.8 (4.7)*

Tableau 23 : références à la perception

- *Les jugements* : Seuls les participants dans la condition AT ont fait référence au jugement (dans ce cas le jugement fait référence à un manque de confiance dans l'autre ; Tableau 24).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références au jugement	↗ 2.0 (3.1)*	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)

Tableau 24 : références au jugement

- Références au corps
 - *Les organes* : Les participants ont davantage fait référence aux organes dans la condition AVH que les participants dans la condition AT (Tableau 25).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références aux organes	↘ 9.3 (8.5) *	14.6 (8.1)	↗ 19.0 (11.0) *

Tableau 25 : références aux organes

- Localisation/espace
 - *Dimension* : Seuls les participants dans la condition AT ont fait référence aux notions de dimensions (profondeur, longueur, hauteur ; Tableau 26).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
références aux notions de dimensions	↗ 13.9 (13.5) *	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)

Tableau 26 : références aux notions de dimensions

- *Droite/gauche* : Les participants dans la condition AV ont fait davantage de références à la droite/gauche que les participants dans la condition AT. On observe aussi une tendance à avoir plus de références gauche/droite dans la condition AVH que dans la condition AT. Cependant, cette tendance n'est pas statistiquement significative (Tableau 27).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
références aux directions	6.1 (4.8)	↗14.4 (9.6) *	11.5 (8.4)

Tableau 27 : références aux directions droite/gauche

- Repères

- *Aiguille* : Les participants ont fait davantage de références à l'aiguille dans la condition AT que dans les deux autres conditions (Tableau 28).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références à l'aiguille	↘ 1.9 (2.7) *	7.0 (7.4)	↗ 8.3 (5.1) *

Tableau 28 : références à l'aiguille

- *Toucher*: Les références au toucher ont uniquement été observées dans la condition AVH. Une différence statistiquement significative est donc observée avec les deux autres conditions (Tableau 29).

* : P < 0.05 - ↗ : augmentation - ↘ diminution	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Références au toucher	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	↗ 1.9 (2.6) *

Tableau 29 : références au toucher

4.5.4 Résultats des questionnaires

Les analyses statistiques détaillées des questionnaires sont présentées en annexe (page 238).

- Présence et perception de l'environnement
 - **Présence dans l'EV.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 30).
 - **Perception du monde réel.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 30).
 - **La qualité perçue de l'EV.** Les participants rapportent une plus grande qualité perçue à la suite d'un apprentissage théorique qu'à la suite d'un apprentissage visuo-haptique (Tableau 30).
 - **Plaisir d'utilisation de l'EV.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 30).

Conditions	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
Présence dans l'EV	3.37 (0.77)	3.28 (0.86)	3.12 (0.89)
Perception du monde réel	2.20 (0.70)	2.24 (0.83)	2.23 (0.81)
<u>La qualité perçue de l'EV*</u>	↗ 3.29 (0.68) *	3.25 (0.70)	↘ 3.08 (0.76) *
Plaisir d'utilisation de l'EV	3.91 (0.62)	3.79 (0.69)	3.85 (0.54)

Tableau 30 : réponses au questionnaire sur la présence

- Coprésence et conscience mutuelle de la situation
 - **Compréhension mutuelle.** Les participants rapportent une plus grande compréhension mutuelle à la suite d'un apprentissage visuo-haptique qu'à la suite d'un apprentissage visuel (Tableau 31).
 - **Sentiment de réalisation commune de la tâche.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 31).
 - **Sentiment d'entre-aide.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 31).
 - **Le sentiment de plaisir de travailler en Collaboration.** Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les différents groupes (Tableau 31).
 - **Coprésence.** Les participants ayant eu un apprentissage haptique rapportent un plus grand sentiment de coprésence que ceux qui ont eu un apprentissage théorique et visuel (Tableau 31).

Conditions	AT : moyenne (écart type)	AV : moyenne (écart type)	AVH : moyenne (écart type)
<u>Compréhension mutuelle*</u>	3.99 (0.48)	↘ 4.05 (0.54) *	↗ 4.21 (0.65) *
Sentiment de réalisation commune de la tâche	3.60 (0.67)	3.84 (0.63)	3.68 (0.71)
Sentiment d'entraide	3.98 (0.67)	4.07 (0.53)	4.00 (0.59)
Le sentiment de plaisir de travailler en Collaboration	4.19 (0.89)	4.14 (0.75)	4.30 (0.79)
<u>Coprésence*</u>	↘ 3.59 (1.01)*	3.70 (1.17)	↗ 3.97 (0.85)*

Tableau 31 : réponses au questionnaire sur la coprésence

4.6 Discussions

Une discussion séparée est présentée pour chacune des sessions expérimentales :

4.6.1 *Session d'application*

Performances

Les participants ont été plus performants après un apprentissage par guidage visuo-haptique et après un apprentissage théorique qu'après un apprentissage visuel. Pour comprendre ce résultat, Il est nécessaire d'étudier les performances d'une manière plus détaillée selon les phases d'accomplissement de la tâche.

Les performances dans la phase de planification montrent que les participants ont été plus rapides pour planifier leur opération après un apprentissage par guidage visuo-haptique qu'après un apprentissage par guidage visuel. De plus ils ont eu besoin de moins de points de repère supplémentaires. Ceci suggère que les utilisateurs ont plus de facilité à planifier correctement leurs opérations après un apprentissage par guidage visuo-haptique. Dans la phase d'exécution du geste l'avantage des participants ayant appris par guidage visuo-haptique a été plus marqué. En effet, ils ont été plus rapides pour accomplir le geste que les participants dans les deux autres conditions. De plus, ils ont réussi à minimiser le nombre de contacts avec les organes sensibles et à minimiser le nombre de gestes d'insertion. Ceci suggère que **les utilisateurs ont plus de facilité pour accomplir le geste après un apprentissage par guidage visuo-haptique.**

- **Après un apprentissage théorique, les participants ont éprouvé plus de difficultés dans la phase d'exécution du geste.** Ceci s'est traduit par un temps d'exécution plus important, une augmentation du nombre de contacts avec les organes sensibles et interdits ainsi qu'une augmentation du nombre de gestes d'insertions. Ceci suggère que l'apprentissage théorique n'est pas aussi efficace que le guidage visuo-haptique pour l'apprentissage des caractéristiques du geste. Ceci peut également expliquer l'augmentation du nombre de points de repères supplémentaires. Ces derniers ont alors été utilisés par les participants comme aide supplémentaire pour l'exécution du geste. Pour la phase de planification, les participants après un apprentissage théorique, ont été aussi performants que les participants ayant appris par guidage visuo-haptique.
- Après un apprentissage par guidage visuel, les résultats montrent que les participants ont été moins performants dans les deux phases. Dans la phase de planification ceci s'est traduit par l'augmentation du temps nécessaire pour planifier le geste. Dans la phase d'exécution du geste, on observe une augmentation du temps de manipulation de l'aiguille ainsi que le nombre de contacts avec les organes sensibles et le nombre de gestes d'insertion. Ces difficultés peuvent alors être expliquées par une augmentation de la charge cognitive des opérateurs par rapport aux deux autres conditions. En effet, selon Wickens (1984), multiplier les sources d'informations peut être préjudiciable en termes d'attention. Dans cette condition, l'apprentissage a été effectué par l'observation de l'expert. Cependant, la fragmentation de l'espace entre l'espace d'action (qui contient la main de l'expert ainsi que le bras haptique) et l'espace de retour visuel (l'EV) a perturbé le transfert des informations entre l'expert et le novice. Ces derniers devaient alors effectuer des « allers/retours » entre ces deux espaces pour apprendre. Cette situation est comparable à celle présentée par Gaver, Sellen, Heath et Luff (1993) dans la collaboration dans un médiaspace. Les auteurs avaient alors mis en évidence les problèmes de fragmentation de l'espace visuel dans les situations de communication. Ceci explique alors les difficultés des participants à mettre en pratique les connaissances apprises

puisque celles-ci étaient mal transmises dans cette condition. Par ailleurs, les amplitudes (moyenne et maximale) des gestes ont été semblables à celles des participants dans la condition AVH. Ceci est dû au fait que cette information a pu être transmise à travers le guidage visuel (ils pouvaient observer et ainsi acquérir les amplitudes des gestes de l'expert).

- Par ailleurs, on peut penser, pour les participants dans la condition AVH, que l'espace était également fragmenté. Cependant, le fait d'être guidé par l'interface haptique a permis de « libéré » la vision. Les opérateurs n'avaient pas à répartir l'attention visuelle entre deux espaces. Chaque modalité sensorielle était correctement affectée à un poste clef : la vision pour les aspects planification et supervision et l'haptique pour les aspects manipulation. Ceci est cohérent avec les résultats de Dingus et al. (1997) et de Van Erp et Van Veen (2001) qui ont montré que la communication haptique avec l'opérateur permet de réduire la surcharge visuelle. Dans notre étude, les participants pouvaient suivre le geste de l'expert directement à travers le bras haptique et pouvaient donc, se concentrer sur le retour visuel affiché sur l'écran. Ainsi, **ce guidage par la communication haptique leurs a permis de mieux apprendre les caractéristiques du geste**. Ceci s'est traduit par de meilleures performances dans la phase d'exécution du geste, aussi bien au niveau des amplitudes que du temps d'exécution. Les participants se sont également distingués en minimisant le nombre de contacts avec les organes sensibles. Ceci est donc une confirmation qu'ils ont bien pris en considération la dimension haptique.
- En ce qui concerne les participants ayant eu **un apprentissage théorique, ce dernier a surtout été efficace pour l'apprentissage des différentes contraintes**. En effet, les explications verbales, combinées avec un support visuel (images) semblent être suffisantes pour apprendre ce type d'information. Cependant, en ce qui concerne la phase d'exécution du geste, leurs performances ont été aussi mauvaises que celles des participants ayant appris par guidage visuel. Ceci peut être lié à l'absence d'apprentissage concernant l'exploitation du ressenti haptique pendant l'insertion de l'aiguille dans le corps et les organes. De plus, les résultats montrent que les amplitudes (moyennes et maximales) des gestes ont été plus importantes que dans les deux autres conditions. On peut en déduire que le manque d'informations sur le ressenti haptique du geste limite l'apprentissage des participants dans cette condition. Un apprentissage par la pratique est donc nécessaire pour ce type de tâche.

Synthèse :

Notre première hypothèse de **H1** était que le type d'apprentissage a une influence sur le contenu du RC. Les résultats ont montré que **l'apprentissage par guidage visuo-haptique permet un meilleur transfert des informations sur le geste entre un expert et un novice**. Ceci permet de confirmer l'hypothèse **H1**. Ceci permet alors d'avoir de meilleures performances essentiellement en ce qui concerne la phase d'exécution du geste. Ceci permet de confirmer l'hypothèse **H2**.

Le manque d'apprentissage de l'exploitation du ressenti haptique du geste dans l'apprentissage théorique et visuel limite les performances des apprenants essentiellement en ce qui concerne l'exécution du geste.

Notre troisième hypothèse **H3** était que l'apprentissage théorique permet d'avoir de meilleures performances pour planifier le geste individuellement. Les résultats obtenus ne l'ont pas vérifiée, puisque les novices (après un apprentissage théorique) n'ont pas eu de meilleures performances dans la phase de planification que les participants ayant suivi un apprentissage par guidage visuo-haptique.

Enfin, les résultats ont montré que la **fragmentation de l'espace visuel** dans la condition d'apprentissage visuel **augmente la surcharge cognitive** du sens visuel et **limite également l'apprentissage**.

4.6.2 *Session de coplanification*

La discussion traite des performances, des verbalisations et des questionnaires :

Performances

Concernant la performance globale les résultats montrent que les groupes dans la condition AT et dans la condition AVH ont été plus performants que les participants dans la condition AV. Ceci s'est traduit par la réduction du temps total pour accomplir la tâche. Ce résultat est cohérent avec les résultats de la première session. Pour avoir davantage de détails sur ces performances, les performances dans les deux phases de l'opération sont étudiées.

- **Phase de planification**

- Les résultats dans cette phase montrent un net avantage pour les groupes dans la condition AT par rapports aux deux autres groupes. Ceci s'est traduit par : la minimisation du temps de planification, la réduction de la distance au centre de la cible à la fin de l'intervention (qui montre qu'ils ont bien respecté la consigne d'être le plus près possible du centre de la cible), la minimisation de l'amplitude de perçage des organes sensibles, et la minimisation du nombre de scanners. Ces résultats montrent donc que les participants dans cette condition ont mieux respecté les règles théoriques qu'ils devaient suivre. La minimisation du nombre de points de repères et la minimisation du nombre de repères supplémentaires montrent également qu'après un apprentissage théorique, la planification des opérations était plus facile pour les participants. Ainsi on peut supposer que l'apprentissage à travers les instructions verbales et les images statiques a été plus efficace pour l'apprentissage des règles théoriques. De plus, cet apprentissage a favorisé dans cette phase de planification collaborative, la construction d'un RC autour des règles théoriques. Ceci a facilité la tâche des participants pour une planification efficace de leurs opérations communes. Nous tenterons par la suite de confirmer ce résultat à travers l'étude des verbalisations.
- En ce qui concerne les résultats des deux autres groupes, aucune différence n'a été observée entre eux au niveau de la planification des opérations. En effet, pour l'apprentissage des règles de planification dans ces deux conditions, les instructions étaient exactement les mêmes (l'observation visuelle de l'expert pendant qu'il planifie dynamiquement les opérations). Ceci suggère que l'apprentissage des règles à travers l'action n'est pas aussi efficace qu'un apprentissage théorique. Nous tenterons de confirmer également ce résultat à travers l'étude des verbalisations entre les participants. Cependant, l'avantage des participants ayant suivi un apprentissage théorique en ce qui concerne la planification n'a été observé que pendant les sessions collaboratives. Ceci peut être justifié par le fait que, pendant l'élaboration du RC, les partenaires ont mis en évidence et ont partagé les connaissances qu'ils ont le mieux intégrées et sur lesquelles ils se sont focalisés pendant l'apprentissage. Ainsi après un apprentissage théorique les connaissances mises en évidences concernaient essentiellement les règles théories.

- **Phase d'exécution du geste**

- Les résultats pour cette phase montrent que les participants dans la condition AVH ont été plus performants que les participants dans les deux autres conditions. Ceci s'est traduit par un temps d'exécution du geste plus court, la réduction du nombre de contacts avec les organes sensibles et les organes interdits et la réduction du nombre

de gestes d'insertion. Ces résultats montrent que les participants ont mieux maîtrisé les gestes de manipulation de l'aiguille après un apprentissage par guidage visuo-haptique. Cet apprentissage leur a permis alors d'acquérir et de mettre en pratique des habilités haptiques tels que la manipulation de l'aiguille et le perçage d'organes. En effet, la réduction du temps d'exécution du geste, et du nombre de contacts avec les organes traduisent une meilleure maîtrise du geste et l'élaboration d'un RC plus efficace autour des caractéristiques du geste technique. On peut également supposer que l'apprentissage par guidage haptique a permis aux partenaires de mieux maîtriser la communication haptique à travers le système de couplage des bras. En effet, ce temps réduit traduit également une meilleure compréhension par « l'observateur » des gestes de « l'acteur ». Ceci a permis à ce dernier d'accomplir les gestes plus rapidement. Ceci est confirmé par le nombre réduit de gestes d'insertions : ce résultat suggère qu'il y a eu davantage de continuité dans l'exécution des gestes par l'acteur et donc moins d'interruptions par l'observateur pour des demandes de concertations (dans ce cas implicite, c'est-à-dire sans utiliser le bouton de concertation). Ceci est un indice supplémentaire suggérant la construction d'un RC efficace autour du geste. Ces constatations doivent cependant, être confirmées par l'analyse des verbalisations.

- Les participants dans les deux autres groupes ont eu des résultats moins performants lors de la phase d'exécution du geste. Ceci s'est traduit par l'augmentation du temps d'exécution, du nombre de contacts avec les organes sensibles et interdits ainsi que le nombre de gestes d'insertion. Ceci suggère que les groupes dans ces deux conditions n'ont pas réussi à avoir une aussi bonne maîtrise du geste que les groupes dans la condition AVH. Ainsi l'apprentissage par l'observation ou à travers les instructions verbales ne semble pas être aussi efficace qu'un guidage visuo-haptique pour l'acquisition et la communication des caractéristiques du geste. Ceci suggère également, que les partenaires dans ce cas ont eu plus de mal à assurer la compréhension mutuelle de leurs actions et gestes parce qu'ils n'ont pas appris à utiliser le système de guidage haptique comme moyen de communication. L'absence de l'utilisation de ce canal a donc gêné les partenaires pour l'élaboration d'un RC efficace autour du geste. Ceci est confirmé par l'augmentation du nombre de gestes d'insertions traduisant une discontinuité des gestes et qui suggère qu'il y a eu davantage d'interruptions de l'acteur par l'observateur. Par ailleurs, la « non-utilisation » du bouton de concertation suggère que les partenaires ont privilégié dans tous les cas, la communication verbale pour la concertation. Bien évidemment, ces conclusions doivent être appuyées par l'analyse des verbalisations pour mettre en évidence certains composants du RC.
- Concernant les amplitudes (moyennes et maximales) des gestes, les mêmes profils que pour la session précédente sont observés. Cependant, aucune différence statistiquement significative n'est observée. La réduction de l'écart dans les amplitudes des gestes entre les participants dans le groupe AT et les participants dans les autres groupes suggère un rapprochement des performances entre les groupes.

Synthèse

Nous avons posé l'hypothèse que la nature des informations mises en évidence lors de l'élaboration du RC dépend du type d'apprentissage suivi (**H4**). Nous avons également fait l'hypothèse que le type d'apprentissage a une influence sur les performances collaboratives des partenaires (**H5**). Dans la situation de coplanification et après un certain délai vis-à-vis de l'apprentissage, **les participants ayant eu un apprentissage théorique ont réussi à mettre en évidence une meilleure compréhension des contraintes théoriques**. Ceci s'est traduit par plus de facilité à planifier ensemble les opérations et avoir ainsi de meilleurs résultats dans cette phase. De leur côté, les participants ayant suivi **un apprentissage par guidage visuo-haptique** ont réussi à **faire émerger une meilleure maîtrise des caractéristiques du geste**. Ceci s'est traduit par plus de facilité pour exécuter les gestes, et pour communiquer à travers le canal haptique. Ces résultats suggèrent que l'hypothèse H5 peut être vérifiée mais une analyse des verbalisations s'impose dans ce cas. Par ailleurs ceci confirme également

une partie de l'hypothèse H6. En effet, pour la coplanification, **l'apprentissage théorique a permis d'avoir de meilleurs résultats durant la phase de planification.**

- **Verbalisations**

- Bien que les analyses automatiques des verbalisations avec le logiciel Tropes ne soient pas aussi pertinentes qu'une analyse détaillée, elles ont permis d'extraire certains aspects des discussions entre les partenaires. Ces aspects permettent de donner une idée sur certains composants du RC élaborés pendant la tâche collaborative. Ces composants permettent alors de confirmer certaines des conclusions issues des mesures sur la performance.
- L'analyse des verbalisations fait immerger une caractéristique très importante des conversations dans la condition AVH : des échanges autour de la communication haptique.
- L'analyse montre que dans cette condition, les partenaires ont utilisé moins de références au lieu (« vers là », « là haut »...etc.). Ceci indique que les participants dans cette condition ont moins eu besoin de guider verbalement leur partenaire vers une direction précise. Dans ce cas, le guidage du partenaire était essentiellement effectué à travers le bras haptique. De plus, l'analyse montre également que les participants dans cette condition ont davantage fait référence à l'intensité (« pas encore », « trop », « à peu près »). Ces informations interviennent généralement dans les conversations de tous les jours pour compléter un autre canal de communication. On peut donc supposer, que les interlocuteurs ont utilisé ces références pour compléter des informations transmises à travers le canal haptique.
- L'analyse montre que les interlocuteurs ont davantage fait référence au toucher et aux organes. Ceci permet de mettre en évidence des échanges autour du sens haptique. De plus, les participants dans cette condition ont davantage fait référence à la perception. Cependant, cette notion regroupe plusieurs catégories incluant aussi bien la perception visuelle (« la vue », « le rouge ») que la perception haptique (« toucher la veine »). Ceci peut expliquer pourquoi les participants dans la condition AV ont autant fait référence à cette notion que les participants dans la condition AVH.
- Les participants dans les groupes d'apprentissage théorique se sont, de leur côté, distingués par davantage de références à la notion de jugement. Cette notion fait référence ici à un manque de confiance dans l'autre. Ceci suggère l'inclusion de la notion de doute entre les interlocuteurs ce qui traduit des difficultés à suivre et à comprendre son partenaire. Les participants dans cette condition ont également fait davantage référence aux dimensions (« hauteur », « longueur »). Ces notions étaient présentes dans notre interface à travers les informations sur la position de l'aiguille en temps réel. Ceci suggère que les participants après un apprentissage théorique utilisent ces informations pour suivre l'aiguille manipulée par leur partenaire plutôt que de s'appuyer sur le système de guidage haptique. Ceci montre que les participants ont développé ensemble un RC autour de ces informations sur la position et n'ont donc pas utilisé la dimension haptique pour guider leur partenaire.

Synthèse :

En résumé, l'analyse des verbalisations **confirme l'émergence dans les discussions, d'informations sur le sens haptique après un apprentissage par guidage visuo-haptique.** Ceci confirme que **le guidage visuo-haptique favorise l'élaboration d'un RC autour des informations haptiques.** Ainsi, on peut déduire que l'hypothèse H5 est vérifiée pour la communication haptique.

En ce qui concerne la collaboration après un apprentissage théorique, l'analyse des verbalisations montre **l'émergence d'informations sur un guidage théorique du geste.** Les participants ont fait davantage référence au jugement, ont davantage utilisé les informations sur la position de l'aiguille. Ils

ont ainsi élaboré un RC autour de ces informations théoriques. Ainsi, on peut déduire que l'hypothèse **H4** est vérifiée pour cette condition.

Par ailleurs, cette analyse n'a pas permis de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques des conversations dans la dernière condition. Il sera donc nécessaire de faire une analyse plus complète et plus détaillée des verbalisations pour essayer de donner des indications concernant le contenu du RC dans ce cas. Ainsi, l'hypothèse **H4** n'a pas pu être vérifiée pour l'apprentissage visuel.

- **Questionnaires**

- Concernant le sentiment de coprésence, notre hypothèse était que le développement d'un RC autour de la communication haptique permet d'augmenter le sentiment de coprésence avec le partenaire dans l'EVC (hypothèse **H6**).
- Globalement, les réponses aux questionnaires n'ont pas permis de faire apparaître des différences significatives entre les différentes conditions. Cependant, certaines caractéristiques méritent d'être discutées. En effet, les réponses des participants montrent qu'ils ont eu davantage l'impression d'être avec leur partenaire dans l'EV lorsqu'ils ont développé un RC autour de la communication haptique (dans la condition AVH). Ceci confirme que **la communication haptique a permis d'améliorer la perception de la coprésence avec le partenaire**. Ceci est cohérent avec les résultats de l'étude de Basdogan et al. (2000) et permet de valider l'hypothèse **H6**. De plus, les participants dans cette condition ont eu l'impression de mieux se comprendre mutuellement que dans la condition AV. **Ceci suggère l'élaboration d'un RC plus efficient lorsque les partenaires utilisent la communication haptique.**

4.6.3 Session de comanipulation

Notre dernière hypothèse (**H7**) était que le développement d'un RC autour de la communication haptique permet d'avoir de meilleure performance dans une tâche de comanipulation d'un outil. Bien que les résultats dans cette session aient le même profil que ceux de la session précédente, les analyses statistiques ne montrent pas de différence significative entre les trois groupes (hormis concernant le nombre total de points repères et le nombre de points repères supplémentaires). Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que cette session se soit déroulée après la session de coplanification. En effet, des effets d'apprentissage de l'utilisation du système de communication haptique ont pu interférer avec l'exécution du geste en comanipulation. Ceci ne permet donc pas de vérifier l'hypothèse **H7** pour la comanipulation. Il sera plus intéressant de réétudier les effets de la modalité d'apprentissage sur ce type de tâches collaboratives immédiatement après la fin de l'apprentissage individuel. Ceci permettra alors de déterminer si le type de guidage influe sur l'exécution d'un geste collaboratif.

5 Conclusion

La collaboration dans des tâches basées sur des gestes techniques nécessite l'élaboration d'un RC entre les partenaires autour des caractéristiques du geste. Dans cette deuxième étude, les problèmes de communication dans ce type de tâche a été abordé. Un nouveau paradigme de communication haptique dans les EVC : le « WYFIWIF » a été défini. Un système de communication basé sur des interfaces haptiques pour évaluer ce paradigme a été alors mis en place. Une première session expérimentale a permis d'étudier la communication entre un opérateur expert et un novice pour l'apprentissage d'un geste de biopsie. Les résultats ont montré que la communication haptique permet un meilleur transfert des caractéristiques du geste par rapport à un apprentissage théorique ou un apprentissage par l'observation. Les résultats ont montré également qu'un apprentissage à travers des instructions verbales est plus efficace pour l'enseignement de règles théoriques. Une deuxième session expérimentale a permis d'étudier l'influence du type d'apprentissage sur les l'élaboration du RC à travers un EVC et ainsi sur la collaboration. Les résultats ont montré qu'après un apprentissage théorique, les partenaires étaient plus efficaces pour planifier les opérations en construisant un RC efficient autour des connaissances théoriques. Les résultats montrent également que la communication haptique a favorisé l'élaboration d'un RC plus riche autour des caractéristiques du geste après un apprentissage par guidage visuo-haptique. Cette communication haptique a permis aussi d'améliorer la sensation de coprésence d'un partenaire distant dans un EVC. Ces résultats ont des conséquences pour la conception d'EV qui favorisent la collaboration. En effet, l'étude a montré que la communication haptique est nécessaire pour la collaboration autour de tâches basées sur les gestes techniques. Le paradigme de communication haptique défini peut donc avoir un apport important pour assurer l'élaboration du RC dans l'EVC. Ce système peut également servir pour étudier d'autres situations collaboratives à distance dans les EVC telles que l'exécution de gestes collaboratifs. De plus, il serait important d'étudier l'impact d'un tel système pour l'exécution de tâches plus simples en isolant les effets de la communication haptique (en éliminant la communication verbale par exemple). Ceci permettrait de mieux comprendre l'impact de ce canal de communication sur l'élaboration du RC.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Nos travaux sur les interactions homme-homme ont pour but d'améliorer le travail collaboratif synchrone à travers un environnement virtuel. Cette conclusion a pour objectif de résumer les résultats de ces recherches et d'ouvrir des perspectives.

Bilan

L'objectif était de comprendre la collaboration homme-homme afin de concevoir des outils mieux adaptés. La revue de littérature a permis dans un premier temps de révéler un certain nombre de problèmes liés à la conception des outils informatiques pour la collaboration et plus particulièrement des environnements virtuels collaboratifs. Partant du constat que les systèmes actuels ne répondent pas aux exigences des utilisateurs en termes de support des interactions collaboratives, l'objectif était de faire émerger des recommandations et des lignes directrices pour leur conception.

Après avoir défini la notion de collaboration, l'importance de la notion de référentiel commun a été mise en évidence. En effet, toute activité collaborative repose sur l'élaboration d'un référentiel commun : un processus actif d'échange d'informations permettant aux partenaires de construire une représentation commune de la situation leur permettant de se comprendre mutuellement et de travailler ensemble. Notre objectif était de déterminer comment favoriser l'élaboration de ce référentiel commun afin de concevoir des systèmes qui facilitent la collaboration homme-homme. Pour ce faire, il est important de :

- prendre en considération les caractéristiques des EV, les utilisateurs ainsi que la tâche collaborative qui les réunit,
- minimiser les efforts à fournir par les utilisateurs afin de comprendre la situation, à travers une communication efficace et la prise en considération du partenaire et de ses activités.

Une démarche de travail a été définie. Celle-ci a consisté à :

- étudier le contenu du RC pour une tâche collaborative donnée,
- agir sur les informations multimodales manipulées par les divers participants pour enrichir les interactions,
- évaluer ces modifications pour montrer qu'elle améliore l'élaboration du référentiel commun.

L'étape suivante était de valider cette approche à travers des situations concrètes. Deux études expérimentales ont permis de valider notre démarche et de donner un certain nombre de recommandations pour la conception des environnements virtuels collaboratifs.

Contributions

Les contributions apportées par ce travail de thèse sont résumées dans ce qui suit :

- **Une conception centrée sur le référentiel commun** : la démarche de conception basée sur l'étude du contenu du référentiel commun peut être considérée comme un premier pas vers une méthodologie de conception dédiée aux environnements virtuels collaboratifs, qui

s'intéresse d'abord à la construction de l'environnement lui-même pour supporter la collaboration, avant de mettre en place des techniques d'interactions dédiées à la collaboration. Autrement dit, il est préférable de concevoir des environnements virtuels qui intègrent naturellement la collaboration, plutôt que de rendre collaboratif un environnement virtuel existant.

En effet, nous avons mis en évidence l'importance du référentiel commun dans l'activité collaborative et la nécessité de faire des choix de conception de l'environnement virtuel qui favorisent la construction du référentiel commun.

- **Le paradigme de référence spatiale fixe** : l'étude des systèmes de référence a permis de mettre en évidence les problèmes de communication spatiale (les échanges d'information sur les positions des objets et sur leur manipulation dans l'espace) dans un environnement virtuel collaboratif. Une solution originale a été proposée. Celle-ci a permis de résoudre certains problèmes de référenciation des objets et de description spatiale des actions dans l'environnement virtuel. Cette solution a permis d'améliorer le déroulement collaboratif d'une tâche de manipulation d'objets. Cette solution est basée sur l'utilisation des références spatiales fixes. L'utilisation de ce type d'indice visuel comme support à l'activité collaborative peut être envisagée dans d'autres environnements virtuels. Pour faciliter leur utilisation, des recommandations quant aux caractéristiques qu'elles doivent avoir ont été proposées. Le contenu de l'environnement virtuel peut donc permettre un meilleur déroulement de l'activité collaborative. Ce contenu peut être manipulé facilement par le concepteur. Ainsi, le choix du contenu doit être guidé par la nature de la tâche collaborative.
- **Le paradigme de WYFIWIF** : ce travail a permis de proposer un paradigme de communication haptique basé sur la notion de guidage. Ce paradigme a été utilisé comme support à l'interaction homme-homme à travers un environnement virtuel. Il a alors permis d'améliorer les échanges d'informations entre les partenaires dans une tâche collaborative basée sur un geste technique. Il a également permis de comprendre que la nature des informations échangées est dépendante du canal de communication utilisé. Enfin, la communication haptique a permis d'accroître le sentiment de coprésence d'un partenaire dans l'EV. Ce paradigme a donc une influence positive sur la collaboration à travers les environnements virtuels. Les concepteurs doivent donc prendre en considération cette dimension haptique lors de la mise en place de nouveaux systèmes. L'utilisation d'un tel paradigme peut être projetée dans d'autres tâches pour lesquels les informations haptiques sont importantes pour le bon déroulement de l'activité collaborative (tâches de comanipulation d'objets virtuels ou encore d'exécution de gestes collaboratifs).

Recommandations

Ce travail de thèse permet de faire un certain nombre de recommandations pour améliorer la conception des environnements virtuels collaboratifs pour certaines tâches :

- **Pour la communication spatiale** : pour améliorer la communication spatiale dans les environnements virtuels la présence de la référence spatiale fixe est utile. Pour être efficace, cette référence spatiale fixe doit respecter un certain nombre de contraintes :
 - Elle doit être latéralisée de façon à permettre un codage exocentré de la position des objets par rapport à elle,
 - Elle doit être immobile afin d'éviter un changement dans le codage exocentré en cours de tâche,

Conclusion générale

- Elle doit être facile à nommer et facilement identifiable par rapport aux autres objets virtuels afin d'éviter les ambiguïtés,
- Elle doit être visible par tous les utilisateurs qui collaborent à un instant donné pour que la référence exocentrée soit accessible à tous simultanément.
- **Pour la communication haptique :** pour améliorer la communication haptique dans les environnements virtuels collaboratifs, le paradigme de guidage haptique WYFIWIF est utile. Pour aider les utilisateurs dans des tâches de comanipulation d'objets, un système basé sur le WYFIWIF doit respecter un certain nombre de contraintes :
 - Il doit permettre d'échanger des informations sur les forces exercées sur les objets comanipulés,
 - Il doit permettre d'échanger des informations sur les mouvements effectués pour manipuler les objets (directions, vitesses et accélérations)
 - L'exécution du geste doit pouvoir se faire de la manière la plus transparente pour les utilisateurs. En effet, ces derniers ne doivent pas être gênés lors de l'exécution de leurs gestes par le dispositif.

Limites

Dans ce qui suit, les difficultés rencontrées ainsi que les limites de la portée de nos contributions sont abordées. Certaines solutions envisagées pour les surmonter sont également présentées.

- Bien que les résultats des deux études expérimentales soient intéressants, leur portée reste pour l'instant limitée à certains types de tâches collaboratives. Il est donc important d'envisager d'autres études sur d'autres modes d'interactions homme-homme pour pouvoir élargir notre champ d'action et généraliser notre démarche.
- L'étude sur la comanipulation haptique d'outils n'a pas permis de dégager des aspects intéressants. Ceci était essentiellement dû aux choix de déroulement des sessions expérimentales. En effet, il est possible que ces choix aient biaisé les résultats pour cette session. Ce mode d'interaction étant très intéressant dans l'étude de la collaboration dans les environnements virtuels, il sera intéressant de mettre en place de nouvelles études expérimentales. Celle-ci devrait permettre de mieux comprendre le déroulement des gestes collaboratifs et mettre en évidence l'importance de la communication haptique.
- Le nombre limité des participants dans la première étude n'a pas permis de mettre en évidence des profils de collaboration pour les participantes féminines. Une extension de l'étude à d'autres participants peut permettre d'extraire davantage d'information sur les différences inter genre quant à la communication spatiale.

Perspectives de recherche

Au-delà de la reprise à court-terme de ces expérimentations, d'autres pistes peuvent être envisagées à plus long terme :

- **Définir une méthodologie de conception pour les environnements virtuels collaboratifs :** Ces travaux de thèse se sont essentiellement basés sur l'étude de la conception des environnements virtuels collaboratifs. Ce type d'environnements est utilisable dans plusieurs domaines tels que la chirurgie, l'architecture, le design, l'éducation ou encore le divertissement. Notre travail a montré qu'en s'inspirant des méthodes utilisées en ergonomie et en psychologie cognitive il est possible de proposer une démarche de conception efficace et prometteuse pour les environnements virtuels collaboratifs. Il serait donc intéressant de poursuivre ces travaux pour définir d'autres lignes directrices qui seraient un guide pour les

concepteurs de tels systèmes. L'étude d'autres formes de communication à travers les environnements virtuels et l'élaboration du référentiel commun serviront alors de support de travail pour définir ces lignes directrices. L'objectif à terme, sera de converger vers une réelle démarche de conception centrée sur les utilisateurs pour les EVC. Celle-ci permettra de mettre en place des systèmes mieux adaptés à leurs besoins en termes de collaboration.

- **Utiliser de nouvelles méthodes d'analyse des verbalisations :** Les études du référentiel commun présentées ont été essentiellement basées sur l'analyse des verbalisations entre les partenaires. Deux types de méthodes d'analyse ont été utilisés. La première est une méthode automatique basée sur l'utilisation d'un logiciel dédié à l'analyse du discours. Cette méthode n'a pas été satisfaisante, car les résultats qu'elle a permis d'obtenir n'étaient pas assez précis (le logiciel utilisé était mal adapté à l'analyse des conversations). La deuxième méthode a consisté à faire une analyse approfondie des verbalisations grâce à une grille d'analyse spécialement conçue pour les besoins de l'étude. Bien que cette méthode ait permis de mettre en évidence les caractéristiques du référentiel commun et de son élaboration, sa mise en place reste très fastidieuse. En effet, elle nécessite un processus d'analyse très couteux en termes de temps. Il serait donc plus intéressant pour la suite de nos recherches, de se diriger vers d'autres méthodes d'analyses, telles que celle présentée par Détienne Détienne, Boujut, et Hohmann (2004) qui pourrait être plus simple à utiliser et donner des résultats satisfaisants.
- **Poursuivre les études de la communication haptique :** la communication haptique semble un domaine de recherche très prometteur. En effet, bien que ce canal soit très important pour la communication, très peu d'études y ont été consacrées dans ce sens. Ceci est essentiellement dû aux contraintes technologiques. Avec l'avènement de nouveaux dispositifs, de nouvelles formes d'interactions collaboratives peuvent être envisagées à travers ce canal. L'accomplissement de gestes collaboratifs (la comanipulation d'outils par exemple) en est l'illustration. Il sera donc intéressant de poursuivre les études autour de la communication haptique pour mieux comprendre dans un premier temps, la nature exacte des informations qu'elle peut véhiculer. Ceci permettra par la suite, d'expérimenter de nouvelles formes d'interactions homme-homme.
- **Étudier le sentiment de coprésence dans les environnements virtuels collaboratifs :** Notre travail a concerné également des questions sur le sentiment de présence dans les environnements virtuels et plus précisément, le sentiment de coprésence avec un partenaire dans un environnement virtuel collaboratif. Il serait donc intéressant de poursuivre nos travaux dans cet axe. En effet, les recherches sur les environnements virtuels et sur la présence sont fortement liées. Il serait alors intéressant d'étudier plus en détails les effets que peut induire l'utilisation des environnements virtuels sur la présence. Il serait également intéressant d'étudier les effets de la communication haptique sur le sentiment de coprésence dans un environnement virtuel collaboratif ou encore d'étudier les effets de la coprésence sur la performance collaborative dans ce type d'environnements.
- **Étudier la transmission des connaissances des experts :** Ces travaux ont permis de découvrir une problématique de recherche très intéressante : La transmission du savoir faire des experts. En effet, certains savoir-faire (essentiellement dans le domaine de la chirurgie) sont perdus parce que certains experts ont des difficultés à les transmettre. Ceci démontre le besoin grandissant d'outils adaptés pour assurer la transmission des connaissances et la pérennité des expertises. La recherche autour de l'apprentissage des gestes techniques et la transmission des savoir-faire offre donc un champ d'application très intéressant pour les environnements virtuels collaboratifs. L'objectif sera de poursuivre nos travaux de recherche dans cet axe pour apporter de nouvelles solutions à cette problématique.

- **Généraliser l'utilisation des paradigmes définis à d'autres situations de collaboration :**
Notre travail a permis de valider deux nouveaux paradigmes de communication dans les environnements virtuels collaboratifs. Ces paradigmes visent à améliorer la collaboration lorsque la communication non-verbale est contrainte par l'environnement partagé entre les partenaires. L'utilisation de ces paradigmes peut être élargie alors à d'autres domaines d'application. Dans le cadre des travaux de recherche de l'équipe Robotique en collaboration avec l'équipe PsyChoTec, il semble intéressant d'étudier l'impact de ces paradigmes sur la collaboration homme-robot. En effet, les mêmes problématiques autour de la communication spatiale et haptique peuvent être abordé puisque les échanges non verbaux entre un opérateur humain et un robot sont également limités.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abric, J.-C. (2008). *Psychologie de la communication: théories et méthodes* (éd. 3). Paris: Armand Colin.
- Allwood, J., Traum, D., & Jokinen, K. (2000). Cooperation, Dialogue and Ethics. *International Journal of Human-Computer Studies* , 53, 871-914.
- Appelle, S. (1991). Haptic perception of form: Activity and stimulus attributes. (M. Heller, & W. Schiff, Éds.) *The psychology of touch* , 169-188.
- Arnaldi, B. (2004). Applications Industrielles : La plate-forme française de Réalité Virtuelle PERF-RV. Dans P. Fuchs, & G. Moreau (Éds.), *Traité de la Réalité Virtuelle* (pp. 157-205). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Arthur, K., Preston, T., Taylor II, R., Brooks Jr, F., Whitton, M., & Wright, W. (1998). Designing and Building the PIT: a Head-Trackted Stereo Workspace for Two Users. *In Proceedings of the 2nd International Immersive Projection Technology Workshop* .
- Aubry, S. (2007). *Annotations et Gestion des Connaissances en Environnement Virtuel Collaboratif*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie Compiègne , Compiègne.
- Bach, C. (2004). *Elaboration et validation de Critères Ergonomiques pour les Interactions Homme-Environnements Virtuels*. Thèse de doctorat, Université de Metz, Metz.
- Bardram, J. (1998). Designing for the Dynamics of Cooperative Work Activities. *In Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work* .
- Basdogan, C., De, S., Kim, J., Muniyandi, M., Kim, H., & Srinivasan, M. A. (2004). Haptics in Minimally Invasive Surgical Simulation and Training. *IEEE Computer Graphics and Applications* , 24 (2), 56 - 64.
- Basdogan, C., Ho, C., Srinivasan, M. A., & Slater, M. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* , 7 (4), 443 - 460.
- Bénech, P. (2005). *Apprentissage collaboratif et coopératif*. Consulté le 3- 27, 2008, sur <http://www.dismoitic.net/-Apprentissage-collaboratif-et-.html>
- Benford, S., Bowers, J., Fahlen, L., Greenhalgh, C., Mariani, J., & Rodden, T. (1995). Networked virtual reality and cooperative work. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* , 4 (4), 364–386.
- Benford, S., Greenhalgh, C., Bowers, J., Snowdon, S., & Fahlén, L. (1995). User Embodiment in Collaborative Virtual Environments. *In Proceedings of CHI'95* .

- Bibin, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J., Delbos, A., & Bonnet, M. (2008). SAILOR: a 3-D medical simulator of loco-regional anaesthesia based on desktop virtual reality and pseudo-haptic feedback. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology* , 97-100 .
- Biocca, F., Harms, C., & Burgoon, J. (2003). Towards a More Robust Theory and Measure of Social Presence: Review and Suggested Criteria. *Presence: Journal of Teleoperators and Virtual Environments* , 12 (5), 456-480.
- Birdgemen, G. (1999). Separate representations of visual space for perception and visually guided behavior. (G. Aschersleben, T. BachMenn, & J. Müsseler, Éds.) *Cognitive Contribution to the Perception of Spatial and Temporal Events* , 3-18.
- Bisseret, A., Sébillotte, S., & Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Toulouse: Octarès.
- Blavier, A. (2006). Impact des images en 2D ou 3D sur les processus cognitifs impliqués dans le traitement visuel et dans le contrôle de l'action : le cas de la chirurgie minimale invasive. Thèse de doctorat, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'éducation , Liège.
- Bloomfield, A., Deng, Y., Wampler, J., & Rondot, P. (2003). A Taxonomy and Comparison of Haptic Actions for Disassembly Tasks . *In Proceedings of the IEEE Virtual Reality '03* , 225-231.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, j., Fleury, M., Forget, R., et al. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. (S. B. Heidelberg, Éd.) *Experimental Brain Research* , 93 (2), 324-331.
- Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., & Gentaz, E. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. *PLoS ONE* , 3 (3), e1775.
- Bly, S. A., Harrison, S. R., & Irwin, S. (1993). Mediaspaces: Bringing people together in a video, audio and computing environment. *Communications of the ACM* , 36 (1), 28-47.
- Bourdot, P., Jessel, J.-P., & Thouvenin, I. (2006). Industries Manufacturières. Dans P. Fuchs (Éd.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle* (éd. 3, Vol. 4, pp. 175-200).
- Bowers, J., Pycock, J., & O'Brien, J. (1996). Talk and Embodiment in Collaborative Virtual Environments. *In Proceedings of the ACM CHI'96* , 58-65.
- Brave, S., & Dahley, A. (1997). InTouch: A Medium for Haptic Interpersonal Communication. *In Proceedings of CHI'97* , 363-364.
- Brennan, S. E. (1998). The Vocabulary Problem in Spoken Dialogue Systems. Dans S. Luperfoy (Éd.), *Automated Spoken Dialog Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bril, B., & Roux, V. (Éds.). (2002). *Le Geste Technique - Réflexions Méthodologiques Et Anthropologiques* (Vol. 14). Ramonville Saint-Agne: Erès (Revue d'Anthropologie des connaissances, Technologies /Idéologies / Pratiques).
- Bryson, S., & Levit, C. (1992). The Virtual Wind Tunnel. *IEEE Computer Graphics & Applications* , 25-34.

Références bibliographiques

- Burkhardt. (2007). Immersion, représentation et coopération : discussion et perspectives de recherches empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica : Virtuel et cognition* (45), 59-87.
- Burkhardt, J. -M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française* , 35-42.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Lequatre, F. (2005). Environnements Virtuels pour l'Apprentissage : de l'image d'Epinal à la réalité des usages et des configurations socio-techniques. *In Proceedings of the 17th international conference on Francophone sur l'Interaction Homme-Machine IHM05* , 163-170.
- Butler, B. E. (1994). Spatial Puzzles: a guide for researchers. *Canadian Psychology* , 35 (1), 47-65.
- Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S., & Olano, T. (1992). 3DM: a three dimensional modeler using a head-mounted display. *In Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics* , 135 - 138.
- Buxton, W. A. (1992). Telepresence: Integrating Shared Task and Person Spaces. *Proceedings of Graphics Interface '92* , 123-129.
- Cadoz, C. (1994). Le geste canal de communication homme/machine: la communication «instrumentale». *Technique et science informatiques* , 13 (1), 31-61.
- Cadoz, C. (1994). *Les réalités virtuelles*. Paris : Flammarion.
- Caplat, G. (2001). *Modélisation cognitive et résolution de problèmes*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Carlson, L. A., & Van Demana, S. R. (2008). Inhibition within a reference frame during the interpretation of spatial language. *Cognition* , 16 (1), 384-407.
- Carlson-Radvansky, L. A., & Jiang, Y. (1998). Inhibition accompanies reference frame selection. *Psychological Science* , 9, 386-391.
- Carlsson, C., & Hagsand, O. (1993). DIVE—a multi-user virtual reality system. *In Proceedings of IEEE VRAIS'93* , 396-402.
- Caulier, P., & Houriez, B. (1996). Incident case reusing in telephone traffic control. (P. Borne, M. Staroswiecki, J.-p. Cassar, & S. El Khattabi, Éds.) *In Proceedings of the IMACS-IEEE/SMC Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications* , 820-827.
- Churchill, E. F., Snowdon, D. N., & Munro, A. J. (2001). *Collaborative Virtual Environments: Digital Places and Spaces for Interaction*. (E. F. Churchill, D. N. Snowdon, & A. J. Munro, Éds.) Springer Verlag.
- Clark, H. H. (1996). *Using Language*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clark, H., & Brennan, S. (1991). Grounding in Communication. Dans L. Resnick, J. Levine, & S. Teasley (Éds.), *Cognition, Perspectives on Socially Shared* (pp. 127-149). Washington D.C.: American Psychological Association.

Références bibliographiques

- Cockburn, A., & Greenberg, S. (1998). The design and evolving of TurboTurtle, a collaborative microworld for exploring newtonian physics. *International Journal of Human-Computer Studies* , 48, 777-801.
- Cohen, P., & Levesque, H. (1991). Teamwork. *Nous* , 25 (4), 487-512.
- Cottone, P., & Mnatovani, G. (2003). Grounding "subjective views" Situation awareness and co-reference in distance learning. Dans G. Riva, F. Davide, & W. IJsselsteijn (Éds.), *Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments*. Amsterdam, Netherland: Ios Press.
- Cratty, B. J. (1962). Comparison of Learning a Fine Motor Task With Learning a Similar Gross Motor Task, Using Kinesthetic Cues. *Research Quarterly* , 212-221.
- D'Ambra, J., Rice, R. E., & O'Connor, M. (1998). Computer-mediated communication and media preference : An investigation of the dimensionality of perceived task equivocality and media richness. *Behavior and Information Technology* , 164-174.
- Daly-Jones, O., Monk, A., & Watts, L. (1998). Some advantages of video conferencing over high-quality audio conferencing : Fluency and awareness of focus. *International Journal of Human-Computer Studies* , 24-58.
- De Greef, P., & IJsselsteijn, W. A. (2000). Social Presence in the PhotoShare Tele-Application. *In the proceedings of the 3rd International Workshop on Presence* .
- De Terssac, G., & Chabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. Dans J. Leplat, G. De Terssac, & Octarès (Éd.), *Les Facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes* (pp. 111-139).
- Desmurgeta, M., Pélissona, D., Rossettia, Y., & Prablanca, C. (1998). From Eye to Hand: Planning Goal-directed Movements. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* , 22, 761-788.
- Détienne, F., Boujut, J.-F., & Hohmann, B. (2004). Characterization of Collaborative Design and Interaction Management Activities in a Distant Engineering Design Situation. Dans F. Darses, R. Dieng, C. Simone, & M. Zaklad (Éds.), *Cooperative Systems design* (pp. 83-98). IOS Press.
- Dillenbourg, P. (1999). What do you mean by collaborative learning? Dans P. Dillenbourg (Éd.), *Collaborative learning: Cognitive and Computational Approaches* (pp. 1-19). Oxford: Elsevier Science.
- Dingus, T. A., McGehee, D. V., Manakkal, N., Jahns, S. K., Carney, C., & Hankey, J. M. (1997). Human factors field evaluation of automotive headway maintenance/collision warning devices. *Human Factors* , 39 (2), 216-229.
- Dominguez, C. (1994). Can SA be defined? (M. Vidulich, C. Dominguez, E. Vogel, & G. Mcmillan, Éds.) *Situation awareness: Papers and annotated bibliography* , 5-15.
- Donikian, S., Moreau, G., & Thomas, G. (1999). Multimodal driving simulation in realistic urban environments. Dans S. zafestas, & G. Schmidt, *Progress in System and Robot Analysis and Control Design*.

- Dumas, C. (1999). Un modèle d'interaction 3D : Interaction homme-machine et homme-machine-homme dans les interfaces 3D pour la TCAO synchrone. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille, Lille.
- Durlach, N., & Slater, M. (1998). Presence in Shared Virtual Environments and Virtual Togetherness . *In BT Presence Workshop* .
- Ekman, P., & Friesen, W. (1972). Hand movements. (353-374, Éd.) *Journal of Communication* .
- Ellis, C. A., Gibbs, S. J., & Rein, G. L. (1991). Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM* , 34 (1), 38-58.
- Ellis, R. S. (1991). Nature and Origins of Virtual Environments: A Bibliographical Essay. *Computer Systems in Engineering* , 2 (4), 321-347.
- Erickson, T. (1993). From Interface to Interplace: The Spatial Environment as a Medium for Interaction. *in the Proceedings of Conference on Spatial Information Theory* .
- Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance, Its structure and acquisition. *American Psychologist* , 49 (8), 725-747.
- Fay, N., Garod, S., & Carletta, J. (2000). Group discussion as interactive dialogue or serial monologue: the influence of group size. *Psychological Science* , 11 (6), 487-492.
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, F. (2002). Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill. *In Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems: HAPTICS'02* , 40-47.
- Fischer, K. (2007). The Role of Users' Concepts of the Robot in HumanRobot Spatial Instruction. Dans S. B. Heidelberg (Éd.), *Spatial Cognition V Reasoning, Action, Interaction* (pp. 76-89).
- Fish, R. S., Kraut, R. E., & Chalfonte, B. L. (1990). The video window system in informal communication. *In Proceedings of CSCW'90* .
- Fröhlich, B., & Plate, J. (2000). The cubic mouse: a new device for three-dimensional input. *In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems CHI2000* , 526 - 531.
- Fröhlich, B., Barrass, S., Zehner, B., Plate, J., & Göbel, M. (1999). Exploring geo-scientific data in virtual environments. *Proceedings of the IEEE conference on Visualization* , 169 - 173.
- Fuchs, P., & Stergiopoulos, P. (2006). Les interfaces manuelles sensori-motrices, Interfaces à retour d'effort. Dans P. Fuchs, & G. Moreau (Éds.), *Le traité de la Réalité Virtuelle* (éd. 3, Vol. 1, pp. 267-310). Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., & Vercher, J. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (éd. 3, Vol. 1). (P. Fuchs, & G. Moreau, Éd.) Paris: Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Garrod, S., & Anderson, A. (1987). Saying What You Mean in Dialogue: A Study in Conceptual and Semantic Coordination. *Cognition* , 27, 181-218.
- Gaver, W. W., Sellen, A., Heath, C., & Luff, P. (1993). ONE IS NOT ENOUGH: MULTIPLE VIEWS IN A MEDIA SPACE. *In Proceedings of INTERCHI* , 335-341.

- Giboin, A. (2004). La construction de référentiels communs dans le travail coopératif. Dans J. Hoc, & F. Darses (Éds.), *Psychologie ergonomique tendances actuelles* (pp. 119-139). Paris: Presses Universitaires de France.
- Gillespie, R. B., O'Modhrain, M., Tang, P., Zaretsky, D., & Pham, C. (1998). The virtual teacher. *In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition* .
- Givens, D. (2000, October). Body speak: what are you saying? *Successful Meetings Magazine* (51), p. 4.
- Goodwin, C., & Goodwin, M. (1996). Seeing as Situated Activity: Formulating planes. Dans Y. Engeström, & D. Middleton (Éds.), *Communication & Cognition at Work*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gossweiler, R., Laferriere, R., Keller, M., & Pausch, R. (1994). An introductory tutorial for developing multiuser virtual environments. *Presence* , 3 (4), 225-264.
- Grudin, J. (1994). CSCW: History and Focus. *IEEE Computer* , 27 (5), 19-26.
- Gupta, R., Sheridan, T., & Whitney, D. (1997). Experiments using multimodal virtual environments in design for assembly analysis. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* , 6 (3), 318-338.
- Guye-Vuillème, A., Capin, T. K., Pandzic, I., Thalmann, N., & Thalmann, D. (1998). Nonverbal Communication Interface for Collaborative Virtual Environments. *Proceedings of CVE 1998* , 105-112.
- Hand, C. (1997). A survey of 3d interaction techniques. *In Proceedings of Computer Graphics Forum* , 269-281.
- Hare, A. P. (1962). *Handbook of small group research*. New York: Free Press of Glencoe.
- Harvey, E., & Gingold, C. (2000). Hapticrepresentation of the atom . *In Proceedings of the IEEE International Conference on Information Visualization* , 232-235.
- Hasser, C. J., Goldenberg, A. S., Martin, K. M., & Rosenberg, L. B. (1998). User performing a GUI pointing task with a low-cost force-feedback computer mouse. *In Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division* , 64, 151-156.
- Heath, C., Jirotko, M., Luff, P., & Hindmarsh, J. (1995). Unpacking Collaboration: The interactional organisation of trading in a city dealing room. (S. Netherlands, Éd.) *Computer-Supported Cooperative Work* , 3 (2), 147-165.
- Henmi, K., & Yoshikawa, T. (1998). Virtual lesson and its application to virtual calligraphy system. *In proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* .
- Hermann, T., & Grabowski, J. (1994). Sprechen. *Psychologie der. Spektrum* .
- Hinckley, K., Pausch, R., Downs, J. H., Proffitt, D., & Kassell, N. (1995). The Props-Based Interface For Neurosurgical Visualization. *MMVR5: Medicine Meets Virtual Reality 5* , 552-562.
- Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C., & Kassell, N. F. (1994). A survey of design issues in spatial input. *In Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology* , 213-222.

- Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., Benford, S., & Greenhalgh, C. (1998). Fragmented interaction: Establishing mutual orientation in virtual environments. *In Proceedings of the ACM 1998 Conference on Computer-Supported Cooperative Work* , 217-226.
- Ho, C., Basdogan, C., Slater, M., Durlach, N., & Srinivasan, M. A. (1998). An Experiment on the Influence of Haptic Communication on the Sense of Being Together. *In Proceedings of the British Telecom Workshop on Presence in Shared Virtual Environments* .
- Hoc, J. M. (2003). Coopération humaine et systèmes coopératifs. (G. Boy, Éd.) *IHM et cognition* , 139-187.
- Horacek, H. (2000). Tailoring Inference-Rich Descriptions Through Making Compromises Between Conflicting Cooperation Principles. *International Journal of Human-Computer Studies* , 53, 1117-1146.
- Hunter, I., Tilemachos, D., Lafontaine, S., Charette, P., Jones, L., Sagar, M., et al. (1993). A Teleoperated Microsurgical Robot and Associated Virtual Environment for Eye Surgery. *Presence* , 2 (4), 265-280.
- Hutchins, M., Adcock, A., Stevenson, D., Gunn, C., & Krumpholz, A. (2005). The design of perceptual representations for practical networked multimodal virtual training environments. *In the Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction : HCI International '05* .
- Ishii, H., Kobayashi, M., & Arita, K. (1994). Iterative Design of Seamless Collaboration Media. *Communications of the ACM* , 37 (8), 83-97.
- Jensen, C. F. (2000). The effect of communication modality on cooperation in online environments. *In Proceedings of the ACM Conference on Computer-Human Interaction* .
- Johnson, P. M. (1995). Collaboration in the small vs. collaboration in the large. *SIGOIS Bull* , 15 (3), 19-21.
- Joslin, C., Pandzic, I., & Magnenat Thalmann, N. (2003). Trends in networked collaborative virtual environments. *Computer Communications* , 26 (5), 430-437 .
- Kalawsky, R. (2000). The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. *In proceedings of the Presence Workshop '00* .
- Kalawsky, v. (1996). Exploiting virtual reality techniques in education and training : Technological issues. In SIMA Report.
- Kheddar, A., Chellali, R., & Coiffet, P. (2002). Virtual Environment-Assited Teleoperation. Dans K. M. Stanney (Éd.), *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications* (pp. 959-997). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kimura, D. (2001). *Cerveau d'homme et cerveau de femme ?* Paris: Odile Jacob.
- Kolb, B., & Whishaw, I. (2002). *Cerveau et comportement*. De Boeck Université.
- Kraut, R. E., Fussell, S. R., & Siegel, J. (2003). Visual information as a conversational resource in collaborative physical tasks. *Human-Computer Interaction* , 13-49.

Références bibliographiques

- Latta, J., & Oberg, D. (1994). A conceptual virtual reality model. *IEEE Computer Graphics and Applications* , 23-29.
- Lawley, E. (1994). *The Sociology of Culture in Computer-Mediated Communication: An Initial Exploration*. Consulté le 2 Juillet, 2009, sur <http://www.itcs.com/elawley/bourdieu.html>
- Lawton, C. A. (2001). Gender and Regional Differences in Spatial Referents Used in Direction Giving. *Sex Roles* , 321-337.
- Le mer, P. (2001). Modèle de communication Homme-Clone-Homme pour les Environnement Virtuels Collaboratifs non-immersifs. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies , Lille.
- Le Robert. (2005). Le grand Robert de la langue française.
- Lécuyer, A., Mobuchon, P., Mégard, C., Perret, J., Andriot, C., & Colinot, J. (2003). HOMERE: a Multimodal System for Visually Impaired People to Explore Virtual Environments. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Virtual Reality (IEEE VR)* .
- Lefebvre, L. (2008). *Les indicateurs non verbaux dans les interactions médiatisées*. Thèse de doctorat, Université Bretagne Sud, Vannes.
- Lehtinen, E., Hakkarainen, K., Lipponen, L., Rahikainen, M., & Muukkonen, H. (2001). Computer Supported Collaborative Learning in Primary and Secondary Education. Dans H. MEJIDEN, R. SIMONS, & F. DE JONG (Éds.), *Final Report for the European Commission, Project 2017*. University of Nijmegen.
- Leigh, J., & Johnson, A. E. (1996). Supporting transcontinental collaborative work in persistent virtual environments. *IEEE Comput Graph App* , 16 (4), 47–51.
- Leigh, J., Johnson, A. E., Defanti, T. A., & Brown, M. (1999). A Review of Tele-Immersive Applications in the CAVE Research Network. *Proceeding of the IEEE Virtual Reality '99* .
- Leplat, J. (1991). Activité collective et nouvelles technologies. *Revue Internationale de Psychologie Sociale* , 4, 335-356.
- Levellet, W. (1989). *Speaking: From Intention to Articulation*. MIT Press .
- Levinson, S. C. (1996). *Language and Space*. (P. Bloom, M. A. Peterson, L. Nadel, & M. F. Garrett, Édés.) MIT Press.
- Levinson, S. C. (2003). *Space in Language and Cognition: Explorations in Cognitive Diversity*. Cambridge University Press .
- Loiselet, A., & Hoc, J. (2001). La gestion des interférences et du référentiel commun dans la coopération: implications pour la conception. *Psychologie Française* , 46, 167-179.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication* , 3 (2).
- Luff, P., Hidmarsh, J., & Heath, C. (2000). *Workplace Studies: Recovering Work Practice and Informing System Design*. Cambridge University Press .

Références bibliographiques

- Macedonia, M., Zyda, M., Pratt, D., Barham, P., & Zeswitz, S. (1994). NPSNET: A Network Software Architecture for Large Scale Virtual Environments. *Presence* , 3 (4), 265-287.
- Machado, L. S., Mello, A. N., Lopes, R. D., Odone Filho, V., & Zuffo, M. K. (2001). A Virtual Reality Simulator for Bone Marrow Harvest for Pediatric Transplant. *Medical Meets Virtual Reality proceedings* , 293-297.
- Mackay, W. (1999). Media Spaces: Environments for Informal Multimedia Interaction. Dans M. Beaudouin-Lafon (Éd.), *Computer Supported Cooperative Work* (pp. 55-82). John Wiley & Sons.
- Majid, A., Bowerman, M., Kita, S., Haun, D., & Levinson, S. C. (2004). Can language restructure cognition? The case for space. *Trends in Cognitive Sciences* , 8 (3), 108-114.
- McLaughlin, M. L., Sukhatme, G., Hespanha, J., Shahabi, C., Ortega, A., & Medioni, G. (2000). The Haptic Museum. In *Proceedings of the Conference on Electronic Imaging and the Visual Arts EVA 2000* .
- Mehrabian, A. (1969). Methods and design: Some referents and measures of nonverbal behavior. *Journal of Behav. Res. Meth. and Instrum.* , 1 (6), 203-207.
- Michailidis, A., & Rada, R. (1997). Activities and communication modes. *International Journal of Human-Computer Studies* , 46, 469-483.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsimi, A., & Kishino, F. (1994). Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Proceedings of Telem manipulator and Telepresence Technologies* , 282-292.
- Miller, G., & Johnson-Laird, P. (1976). Language and perception. *Harvard University Press* .
- Moran, T., & Anderson, R. (1990). The workaday world as a paradigm for CSCW design. *Proceedings of the Conference on Computer-Supported Cooperative Work, CSCW '90* , 381-393.
- Morris, D., Sewell, C., Blevins, N., Barbagli, F., & Salisbury, K. (2004). A Collaborative Virtual Environment for the Simulation of Temporal Bone Surgery. *Proceedings of the International Conference on Medical Imaging Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)* , 3217, 319-327.
- Morris, D., Tan, H., Barbagli, F., Chang, T., & Salisbury, K. (2007). Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning. In *proceedings of EuroHaptics: Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* , 21-26.
- Navarro, C. (2001). Partage de l'information en situation de coopération à distance et nouvelles technologies de la communication : bilan de recherches récentes. *Presses Universitaires de France* , 64 (4), 297-319.
- Nova, N. (2005). A Review of How Space Affords Socio-Cognitive Processes during Collaboration. *Psychology* , 3 (2), 118-148.
- Ott, D., & Dillenbourg, P. (2001). Using Proximity and View Awareness to Reduce Referential Ambiguity in a Shared 3D Virtual Environment. In *Proceedings of CSCL 2001* .

- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2007). A Visuo-Haptic Device - Telemaque - Increases Kindergarten Children's Handwriting Acquisition. In *Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 72-77.
- Pandzic, I. (1998). *Facial Communication in Networked Collaborative Virtual Environments*. Thèse de Doctorat, Université de Genève I, Genève.
- Pandzic, I., Capin, T., Lee, E., Magnenat Thalmann, N., & Thalmann, D. (1997). A flexible architecture for virtual humans in networked collaborative virtual environments. In *Proceedings of Eurographics 97*.
- Pang, A., & Wittenbrink, C. (1997). Collaborative 3D Visualization with CSpray. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 32-41.
- Panitz, T. (1997). Collaborative versus Cooperative Learning- A Comparison of the Two Concepts which will Help us Understand the Underlying Nature of Interactive Learning. *ERIC Clearinghouse*.
- Piolat, A., & Bannour, R. (2009). An example of text analysis software (EMOTAIX-Tropes) use: The influence of anxiety on expressive writing. *Current Psychology Letters*, 15 (2).
- Presson, C. C. (1980). Spatial egocentrism and the effect of an alternate frame of reference. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 391-402.
- Prothero, J., Parker, D., & Furness, T. (1995). Towards a robust, quantitative measure for presence. In *Proceedings of the Conference on Experimental Analysis and Measurement of Situation Awareness*, 359-366.
- Provenzano, L., Delzons, J., Plénacoste, P., & Vandromme, J. (2007). Designing Viewpoint Awareness for 3D Collaborative Virtual Environment Focused on Real-Time Manipulation of Multiple Shared Objects. Dans S. Berlin/Heidelberg (Éd.), *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 4563/2007, pp. 147-156).
- Querrec, R., Buche, C., Maffre, E., & Chevallier, P. (2003). SecuReVi : Virtual environments for fire fighting training. Dans S. Richir, P. Richard, & B. Taravel (Éd.), *VRIC 2003 (Colloque Laval Virtual 2003 Cinquième Conférence Internationale Sur La Réalité Virtuelle)*, (pp. 169-175). Laval, France.
- Reed, K., Peshkin, M. A., Hartmann, M., Colgate, J. E., & Patton, J. L. (2005). Kinesthetic Interaction. In *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*.
- Rekimoto, J. (2002). SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of CHI 2002*, 113-120.
- Roberts, D., Wolff, R., Otto, O., & Steed, A. (2003). Constructing a Gazebo: supporting teamwork in a tightly coupled, distributed task in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12 (6), 644 - 657.
- Roberts, R., & Aman, C. (1993). Developmental differences in giving directions: spatial frames of reference and mental rotation. *Child Dev.*, 64, 1258-1270.
- Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le travail humain*, 57, 425-443.

- Roschelle, J., & Teasley, S. D. (1995). Construction of shared knowledge in collaborative problem solving. Dans C. O'Malley (Éd.), *Computer-supported collaborative learning* (pp. 69- 97). New York: Springer-Verlag.
- Roussou, M., Oliver, M., & Slater, M. (2008). Exploring activity theory as a tool for evaluating interactivity and learning in virtual environments for children. *Cogn Tech Work* , 10, 141-153.
- Rovers, A., & Van Essen, H. A. (2004). Design and evaluation of Hapticons for enriched Instant Messaging. In *Proceedings of EuroHaptics 2004* .
- Salas, E., Prince, C., Baker, D., & Shrestha, L. (1995). Situation awareness in team performance: implications for measurement and training. *Human Factors* , 37, 123-136.
- Salber, D. (1995). De l'interaction individuelle aux systèmes multiutilisateurs. L'exemple de la Communication Homme-Homme-Médiatisée. Thèse de doctorat Informatique, Université Joseph Fourier: Grenoble.
- Salisbury, J. K. (1999). Making graphics physically tangible. *Communications of the ACM* , 42 (8), 74-81.
- Sallnäs, E.-L. (2004). The Effect of Modality on Social Presence, Presence and Performance in Collaborative Virtual Environments. Doctoral Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Sallnäs, E.-L., & Zhai, S. (2003). Collaboration meets Fitts' law: Passing Virtual Objects with and without Haptic Force Feedback. In *Proceedings of INTERACT 2003, IFIP Conference on Human-Computer Interaction* .
- Sallnäs, E.-L., Rasmussen-Gröhn, K., & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* , 7 (4), 461-476.
- Savoyant, A. (1984). Définition et voies d'analyse de l'activité collective des équipes de travail. *Cahier de psychologie cognitive* , 4, 273-284.
- Schafer, W. A., & Bowman, D. A. (2004). Evaluating the Effects of Frame of Reference on Spatial Collaboration Using Desktop Collaborative Virtual Environments. *Virtual Reality* , 7, 164-174.
- Schmidt, K. (1990). Analysis of Cooperative Work, A Conceptual Framework. *Rise National Laboratory* , [Rise-M-2890].
- Schmidt, R. (1987). *Motor control and learning: A behavioural emphasis* (éd. 2). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schober, M. F. (1998). How addressees affect spatial perspective choice in dialogue. Dans P. Oliver, & K. Gapp (Éds.), *Representation and Processing of Spatial Expressions* (pp. 231-245).
- Schober, M. F. (1993). Spatial Perspective-Taking in Conversation. *Cognition* , 47, 1-24.
- Schroeder, R. (2002). Copresence and Interaction in Virtual Environments: An Overview of the Range of Issues. In *proceedings of the Fifth International Workshop on Presence '02* , 274-295.

- Schroeder, R., Steed, A., Axelsson, A.-S., Haldal, I., Abelin, Å., Wideström, J., et al. (2001). Collaborating in networked immersive spaces: as good as being there together? *Computers and Graphics* , 25, 781-788.
- Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., & van der Mast, C. A. (2001). Research on Presence in Virtual Reality: A Survey. *Cyberpsychology and Behavior* , 4 (2), 183–201.
- Shaw, M. E. (1976). *Group Dynamics : the psychology of small groups behavior*. Montreal: McGraw Hill Book Co.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Sheridan, T. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence* , 1, 120–126.
- Sire, S., & Chatty, S. (1998). Vers des interfaces à collaboration directe pour le travail de groupe. *Communication, société et internet, actes du colloque GRESICO* , 259-275.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., Kooper, R., & Street, G. (1996). Immersion, Presence, and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-Dimensional Chess. *ACM Virtual Reality Software and Technology* , 163-172.
- Smith, C. M. (1997). Human factors in haptic interfaces. *Crossroads* , 3 (3), 14-16 .
- Smith, R. B., Hixon, R., & Horan, B. (1998). Supporting Flexible Roles in a Shared Space. *In Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)* , 197-205.
- Snowdon, D., & Churchill, E. F. (1998). Collaborative Virtual Environments: A Conference Report. *SIGGROUP Bulletin* , 19 (2).
- Solis, J., Avizzano, C., & Bergamasco, M. (2003). Validating a skill transfer system based on reactive robots technology. *In Proceedings of The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, ROMAN'03* , 175- 180.
- Spante, M., Schroeder, R., & Axelsson, A. S. (2004). How Putting Yourself into the Other Person's Virtual Shoes Enhances Collaboration. *Proceeding of the 7th International Workshop on Presence*, (pp. 190-196). Valencia, Spain.
- Sperber, D., & Wilson, D. (1986). *Relevance: communication and cognition*. Oxford: Harvard University Press.
- Srinivasan, M. A., & Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics* , 21 (4), 393-404.
- Stanney, K. M., & Zyda, M. (2002). Virtual Environments in the 21st Century. Dans K. M. Stanney (Éd.), *Handbook of Virtual Vnvironment: Design, Implementation, and Applications* (pp. 1-14). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stasser, G., & Taylor, L. (1991). Speaking turns in face-to-face discussions. *Journal of personality and social psychology* , 60, 675-684.

Références bibliographiques

- Stefik, M., Bobrow, D. G., Lanning, S., & Tatar, D. (1987). WYSIWIS revised: Early experiences with multiuser interfaces. *ACM Transactions on Information Systems* , 5 (2), 147-167.
- Sternberger, L. (2006). *Interaction en réalité virtuelle*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg 1, Strasbourg.
- Stoakley, R., Conway, M. J., & Pausch, R. (1995). Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature. *Proceedings of Human Factors and Computer Systems* , 265–272.
- Subasi, E., & Basdogan, C. (2008). A new haptic interaction and visualization approach for rigid molecular docking in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* , 73-90.
- Tang, J. C., & Isaacs, E. (1993). Why do users like video? Studies of multimedia supported collaboration. *Journal of Computer Supported Cooperative work* , 163-196.
- Taylor, R., Robinett, W., Chi, V., Brooks Jr., F., Wright, W., Williams, S., et al. (1993). The nanomanipulator: a virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope. *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* , 127-134 .
- Tisseau, J. (2001). *Réalité Virtuelle –autonomie in virtuo*. Thèse d’habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1.
- Valin, S., Francu, A., Trefftz, H., & Marsic, I. (2001). Sharing Viewpoints in Collaborative Virtual Environments. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences* .
- Van Erp, J. B., & Van Veen, H. A. (2001). Vibro-tactile information presentation in automobiles. *In Proceedings of Eurohaptics 2001* .
- Verjat, I. (1994). Confrontation de deux approches de la localisation spatiale. *L'année psychologique* , 94 (3), 403-423.
- Vermersch, P. (1996). *L'entretien d'explicitation*. Paris: ESF.
- Walairacht, S., Koike, Y., & Sato, M. (1999). A New Haptic Display for Both-Hands-Operation :SPIDAR-8. *In Proceedings of ISPACS'99* , 569-572.
- Watt, R. (1995). An Examination Of The Visual Aspects Of Human Facial Gesture. *London: Academic Press* .
- White, N., & Back, D. (1986). *Telephonic Arm*. Consulté le 2009, sur <http://www.turbulence.org/blog/archives/000142.html>.
- Whittaker, S. (2003). Theories and Methods in Mediated Communication. Dans A. C. Graesser, M. A. Gernsbacher, & S. R. Goldman (Éds.), *Handbook of Discourse Processes* (pp. 243-286). New Jersey: Erlbaum.
- Wickens, C. D. (1984). *Processing resources in attention*. New York: Academic press.
- Wideström, J., Axelsson, A.-S., & Abelin, A. (2000). The Collaborative Cube Puzzle: A comparison of Virtual and Real Environments. *In Proceedings of the Conference on Collaborative Virtual Environments (CVE' 2000)* .

Références bibliographiques

Wideström, J., Axelsson, A.-S., Shroeder, R., Nilsson, A., Heldal, I., & Abselin, A. (2000). The collaborative cube puzzle: a comparison of virtual and real environements. *In Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments* .

Williams, R., Srivastava, M., Conaster, R., & Howell, J. (2004). Implementation and Evaluation of a Haptic Playback System. *Haptics-e Journal* , 3 (3).

Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review* , 105 (3), 558-584.

Wilson, J., Brown, D., Cobb, S., D'Cruz, M., & Eastgate, R. (1995). Manufacturing Operations in Virtual Environments (MOVE). *Prsence* , 4 (3), 306-317.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Journal of Presence: Teleoperators and Virtual Environments* , 7 (3), 225-240.

Annexes

Annexes

1 Expérience 1

1.1 Fiche d'instruction pour l'utilisation des manettes de jeu

Voici la fiche présentée aux participants pour leur expliquer l'utilisation des différentes commandes de la manette de jeu lors de l'expérience 1 :

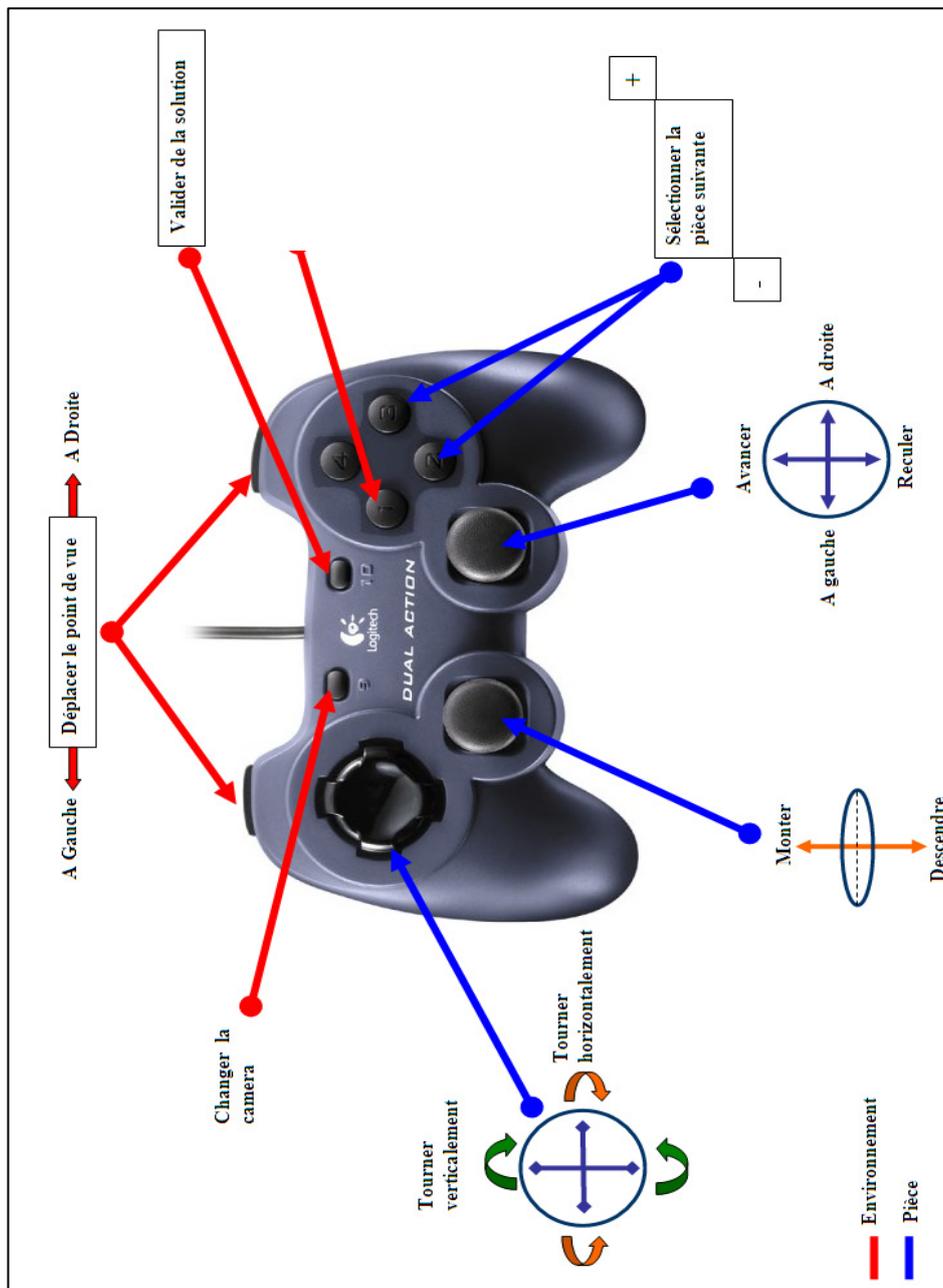
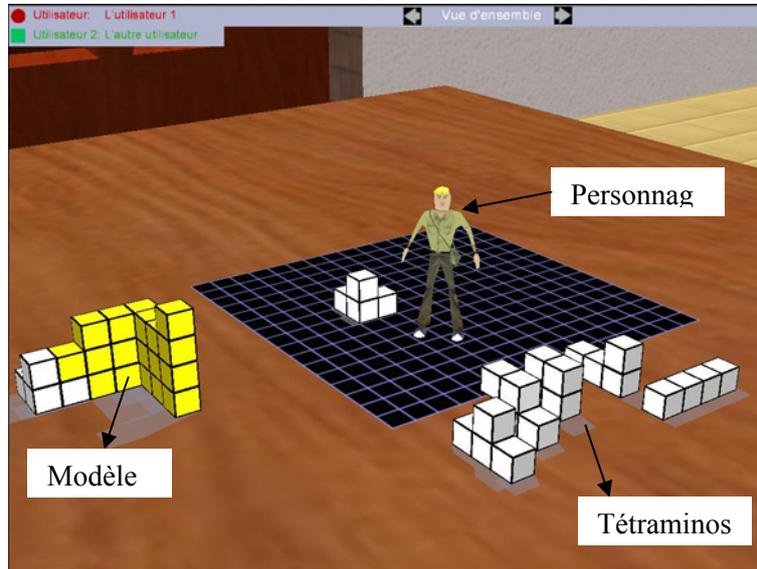


Figure 62 : Fiche d'explication des commandes de la manette de jeu pour l'expérience 1

1.2 Fiche de consignes pour la condition P-RSF

Voici la fiche de consignes présentée aux participants (dans la condition avec référence spatiale fixe) lors de l'expérience 1 :

Voici l'interface dans laquelle vous allez évoluer :



Votre tâche consiste à utiliser différents tétramino en 3D afin de reproduire une figure géométrique (modèle). Il s'agit d'un début de mur devant encercler le personnage qui se trouve au milieu de la pièce. Il ne vous est pas possible d'agir sur ce personnage mais vous pouvez le « transpercer » avec les tétramino si vous avez besoin de passer.

Vous devrez définir ensemble quels tétramino placer sur la figure afin de reproduire le modèle et de quelle façon les disposer.

Vous ne pouvez pas aller regarder ce que fait votre voisin sur son ordinateur mais vous pouvez échanger à voix haute autant que vous voulez afin de vous accorder sur les actions à effectuer.

Pour agir dans l'interface vous disposerez de la manette suivante (montrer la manette).

Vous pouvez placer et déplacer les tétramino à votre guise sur la figure en construction.

Vous n'avez pas de temps limite pour réaliser la figure mais il est préférable de ne pas trop « trainer » afin d'éviter que la manip ne dure trop longtemps.

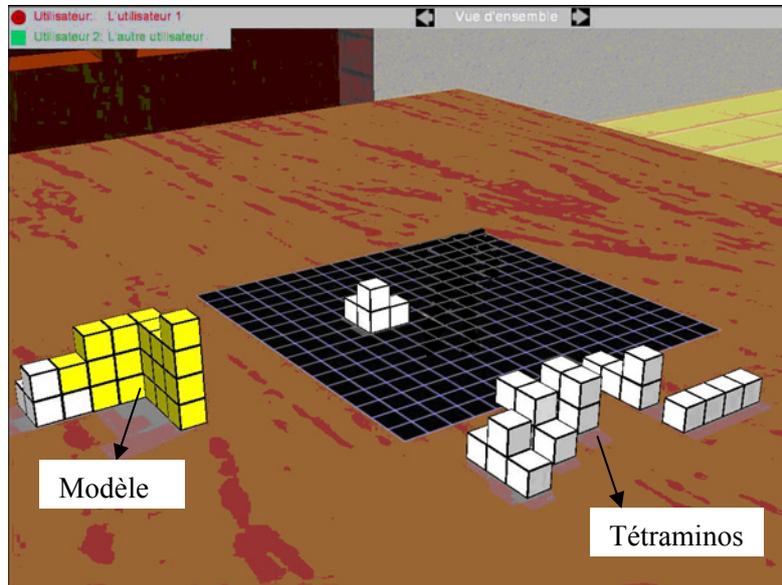
Une fois la figure achevée appuyez sur la touche « select » pour valider.

Vous aurez en tout 5 modèles à reproduire.

1.3 Fiche de consignes pour la condition A-RSF

Voici la fiche de consignes présentée aux participants (dans la condition sans référence spatiale fixe) :

Voici l'interface dans laquelle vous allez évoluer :



Votre tâche consiste à utiliser différents tétraminos en 3D afin de reproduire une figure géométrique complexe (modèle).

Vous devrez définir ensemble quels tétraminos placer sur la figure afin de reproduire le modèle et de quelle façon les disposer.

Vous ne pouvez pas aller regarder ce que fait votre voisin sur son ordinateur mais vous pouvez échanger à voie haute autant que vous voulez afin de vous accorder sur les actions à effectuer.

Pour agir dans l'interface vous disposerez de la manette suivante (montrer la manette) :

Vous pouvez placer et déplacer les tétraminos à votre guise sur la figure en construction.

Vous n'avez pas de temps limite pour réaliser la figure mais il est préférable de ne pas trop « trainer » afin d'éviter que la manip ne dure trop longtemps.

Une fois la figure achevée appuyez sur la touche « select » pour valider.

Vous aurez en tout 5 modèles à reproduire.

2 Expérience 2

2.1 Grille d'observation de l'activité

A quelle étape de l'activité	Type de comportement		A qui/quoi (Patient, assistant, à lui-même, aux observateurs machine, outil) est destiné le comportement (verbalisation ou agissement)
	Agissements	Verbalisations	
I.1. Activité globale			
1- Préparation du patient			
2- Premier scanner (sert à définir la zone de ponction)			
3- Préparation du radiologue			
4- Préparation de la tablette			
5- Stérilisation de la zone d'incision			
6- Anesthésie locale			
7- Scanner de contrôle			
8- Retrait de l'aiguille d'anesthésie			
9- Incision scalpel			
10- Insertion de l'aiguille			
11- Scanner de contrôle (position de l'aiguille)			
12- Ajustement de l'aiguille			
13- Scanner de contrôle			
14- Enfoncement de l'aiguille			
15- Scanner de contrôle			
16- Insertion de l'aiguille à biopsie dans le coaxial			
17- Scanner avant réalisation de la biopsie			
18- Ponction du tissu à			

analyser			
19- Retrait de l'aiguille à biopsie			
20- Mise sous bocal de l'échantillon			
21- Retrait du tissu autocollant			
22- Pansage de la plaie			
23- Scanner post-Biopsie			
I.2. Scanner			
1- Premier scanner :			
- Réglage du scanner			
- Déclenchement du scanner			
- Analyse de l'image			
- Définition de la zone de ponction			
2- Scanner de contrôle de la position de l'aiguille			
- Réglage du scanner			
- Déclenchement du scanner			
- Analyse de l'image			
- Définition de la modification à apporter à la position de l'aiguille			
3- Deuxième scanner de contrôle			
4- Scanner post-Biopsie			
- Réglage du scanner			
- Déclenchement du scanner			
- Analyse de l'image			
- Choix de l'action à entreprendre (fin de l'intervention, nouvelle			

biopsie, arrêt d'une hémorragie etc...)			
I.3. Biopsie			
1- Définition de la zone de ponction (cf. Partie scanner étape 1)			
2- Positionnement du trocart (si il y en a un...)			
3- Préparation de l'aiguille			
4- Positionnement de l'aiguille			
5- Insertion de l'aiguille			
6- Contrôle de la position de l'aiguille (cf. Partie scanner étape 2)			
7- Modification de la position de l'aiguille			
8- Réalisation de la ponction			
9- Retrait de l'aiguille			
10- Mise en boîte stérile du prélèvement			
11- Evaluation du résultat			

2.2 Questionnaire utilisé pour interroger les radiologues

Voici le questionnaire auquel les praticiens devaient répondre lors de la phase d'analyse de l'activité d'insertion d'aiguille en radiologie interventionnelle :

Profil du praticien :

- Nombres d'années de pratiques de la radiologie ?
- Nombres d'années de pratique radiologie interventionnelle ?
- A partir de quel moment pratiquez-vous de la radiologie interventionnelle dans les études ?
- Poste à plein temps au C.H.U. ? Autres sites ? Autres lieux ?
- Type de pratique en radiologie interventionnelle : biopsies, radiofréquences..., spécialisation : pulmonaire, vasculaire, ...
- Estimation de la fréquence des opérations / nb dans l'année ?

Préparation de l'intervention :

- Comment êtes vous prévenus des cas ?
- Les patients viennent-ils du C.H.U. ?
- Comment vous répartissez vous les cas ? En fonction de la spécialité, de la disponibilité ?
- Préparation : en fonction de l'intervention ?
- Combien de scanner avant l'intervention ? Dossier du patient ? Info du médecin clinicien en amont ?
- Réunion avec les autres radiologues ? Avec les autres spécialistes ?
- Pour discuter des cas ?
- En fonction de quoi vont-ils choisir tels outils plutôt qu'un autre ?
- Comment définissez-vous la zone d'incision ? (repère métallique et laser).

Intervention :

Présentation du schéma des activités par étape tiré des vidéos.

Discussions autour des différentes étapes,

- Sur la manière de faire,
- Sur la gestion du temps,
- Les outils utilisés ?
- La coopération avec les deux manipulateurs ?
- Besoin d'autres personnels ? Infirmière ?

Le geste :

- Difficulté du geste ?
- Indices spatiaux dont il se sert ? Image, toucher des organes (dureté ? résistance ? élasticité ?), déplacements latéraux/verticaux de l'aiguille, percement, autres ?
- Quelle est l'importance/l'intérêt de ces indices en fonction de la profondeur d'aiguille ?
- (sensation à 5 et à 20 cm ?), est-ce différent ?
- Importance de la localisation de la pointe pendant l'insertion ? Reconnaître les organes en avançant ? S'appuyer dessus ?
- Test des passages (retour haptique) ou avancée principalement à partir de l'image ?

Après l'intervention :

- Débriefing après les cas ?
- Retour sur les effets de l'opération ?

Activités du Praticien :

- Quelles sont les autres missions/champs d'interventions à part la radio interventionnelle ?
- Activité recherche ? Laboratoire ? Encadrement d'étudiants en radio interventionnelle ?
- Activité enseignement ? Participation au DES/DU de radiologie ?
- Comment enseignez-vous le geste d'insertion ?
- Où sont les difficultés de l'apprentissage de ce métier ? (en commentant si possible)
- gestion du risque
- choix de l'aiguille
- choix de la zone de passage
- repérage 3D
- gestion du temps
- gestes d'insertion
- Utilisez-vous des techniques d'entraînement particulières ? Des simulateurs ? Intérêt d'outil d'apprentissage du geste ?

Ouverture :

- Présentation des objectifs du projet robotique.
- Que pensez vous de l'apport de la robotique en interventionnelle ?

2.3 Chronologie des activités

Voici la chronologie des activités qui constitue une liste d'invariants repérés après analyse de l'activité de biopsie en radiologie interventionnelle :

- (00 00) 1- Préparation du patient.
- (00 00)- Arrivée du patient dans le service
- (02 00)- Installation dans le scanner en fonction de la biopsie (décubitus ventral, dorsal ou latéral)
- (02 55) 2- Premier scanner (sert à définir la zone de ponction).
- (02 35)-Pose d'un repère métallique par un manipulateur. (Point blanc image du scanner, mesure faite à partir de ce point)
- (02 45)-Grâce au croisement que forme le repère métallique (sert à définir la hauteur de coupe) et le laser rouge émit par le scanner (coupe transversale) on détermine le point d'entrée de la ponction (ou point d'incidence).
- (02 55)-actionnement du scanner par le manipulateur.
- (02 55)-Le praticien décide du parcours pour atteindre la cible.
- (04 00) 3- Préparation du radiologue.
- (04 00)- Stérilisation du praticien (lavage de main : lotion moussante, stérilium).
- (04 30)-Habillage du praticien (casaque chirurgicale stérile et gants stériles, charlotte et masque chirurgical). NB : différent selon les praticiens.
- (04 00) 4- Préparation de la « tablette » contenant scalpel, aiguille et seringue pour anesthésie) par le manipulateur en salle de scanner.
- (04 40) 5-Stérilisation du patient (zone d'incision)
- (05 00)-Pose des champs (tissu entourant la zone d'incision)
- (05 20)-Stérilisation avec Bétadine
- (05 50) 6-Pose de l'aiguille de l'anesthésie.
- (05 50)-pose de l'aiguille intramusculaire sur le point d'incidence (permet de valider la zone de référence du point d'incidence, 1à 2% d'échec chez les manipulateurs).
- (06 10) 7-Scanner de contrôle.
- (06 20)-Vérification que l'aiguille d'anesthésie prend le bon point d'incidence et le bon centrage.
- (06 45) 8- Anesthésie locale (ou générale pour les radiofréquences).

12- Ajustements (optionnel) ex : si aiguille mal engagée.

13-Deuxième scanner de contrôle (optionnel) vers la cible.

-Vérification que l'aiguille est bien engagée

(09 30) 14-Armeement de l'aiguille en dehors du patient (si coaxial)

(09 40)15- Enfonceement de l'aiguille à biopsie (à l'aide ou non d'un coaxial) jusque dans la cible à ponctionner (ou quelques mm avant)

(09 55)16-Scanner de contrôle

(10 10)-Vérification que l'aiguille se trouve au contact de la lésion à ponctionner ou quelques mm avant. (De préférable en périphérie de la lésion sur les plus grandes).

(10 30) 17- Si utilisation d'un coaxial, retrait du mandrin une fois la cible atteinte.

(10 45) 18- Le praticien doit pousser la détente de l'aiguille à biopsie.

(10 46)-Déploiement de la partie de l'aiguille permettant de faire une carotte (zone de vide) dans la zone à ponctionner. (Allongement de l'aiguille de 25 mm).

(11 05) 19-Scanner avant de réaliser la biopsie.

(11 25)-Vérification que la zone de recueil de l'échantillon est idéalement placée pour réaliser la biopsie.

(12 00) 20-Ponction du tissu à analyser (« clic » de l'aiguille à biopsie, l'aiguille se déploie sur la

2.4 Fiche d'instruction pour l'utilisation des commandes du shuttle pro

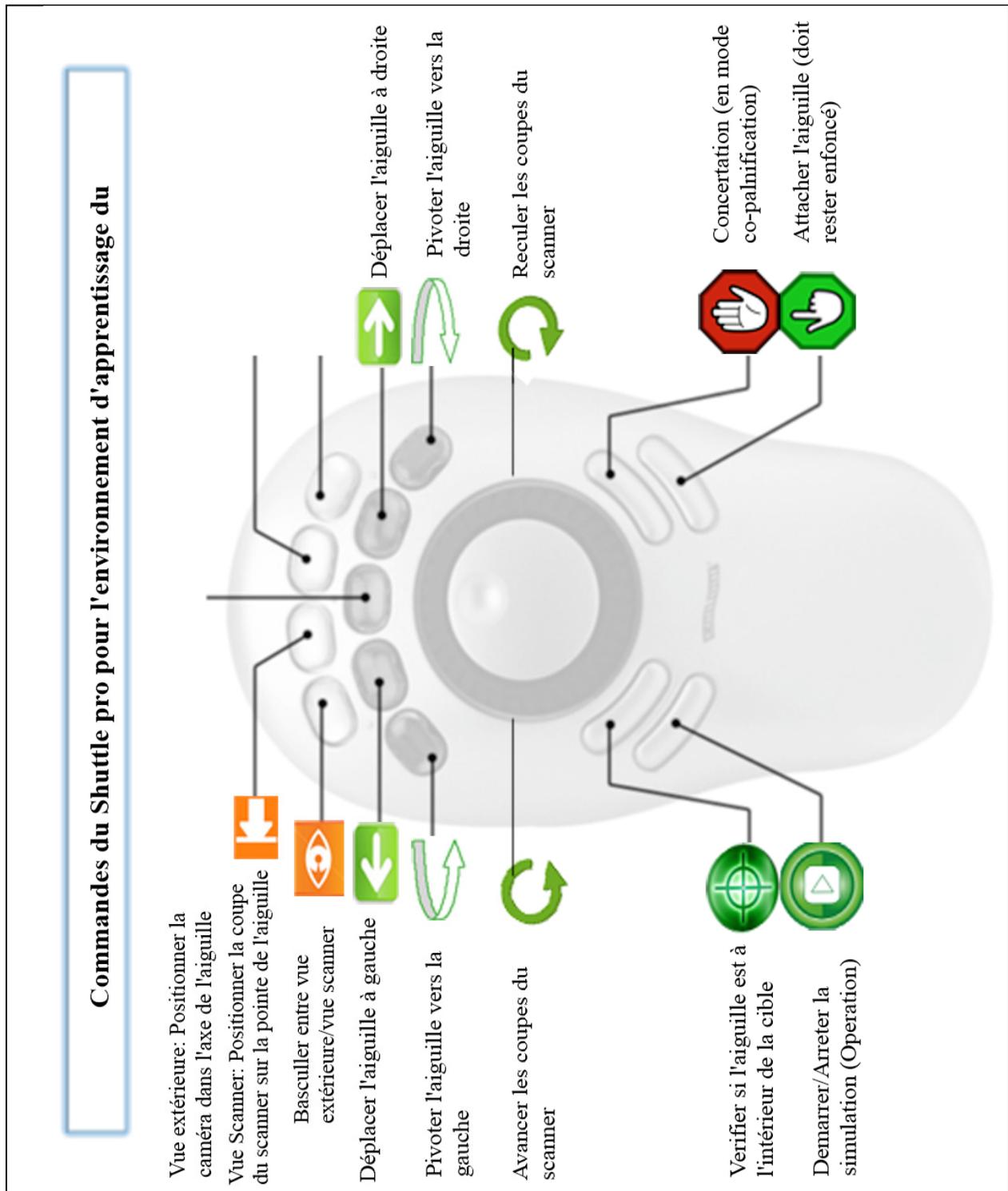


Figure 63 : Commandes du Shuttle pro pour l'expérience 2

2.5 La fiche de consignes

Voici la fiche de consignes présentée aux participants pour toutes les sessions (le reste des consignes était expliqué verbalement) :



Perçage des organes :

Il est interdit de transpercer les organes rouges et les veines.

Les organes verts peuvent être transpercés sans contrainte.

Les organes jaunes peuvent être transpercés mais il faut minimiser la surface transpercée.

On ne peut pas transpercer deux organes jaunes en même temps.

On peut transpercer deux organes verts en même temps.

On peut transpercer un organe jaune et un organe vert en même temps.

Il faut mieux transpercer un organe vert et un organe jaune si cela permet de minimiser la surface percée dans l'organe jaune plutôt que de percer seulement un organe jaune mais sur une grande surface.

Contacts avec les organes :

Il est interdit de pousser, toucher les veines.

On peut pousser tous les autres organes (même si il est préférable de ne pas pousser un organe rouge).

Les os étant très durs, il est impossible de les transpercer ou de les pousser mais on peut s'appuyer dessus.

Règles de priorité concernant les organes:

Plutôt que de risquer de toucher ou pousser une veine ou un organe rouge, il vaut mieux transpercer un organe vert ou jaune quelle que soit la surface sur laquelle on les transperce.

Il faut mieux pousser un organe jaune que le transpercer.

On peut pousser et transpercer un organe vert indifféremment.

La règle la plus importante est de minimiser en priorité tout contact ou risque de contact avec les veines. Cette règle est prioritaire sur toutes les autres. Sauf si elle implique de transpercer un organe rouge. Il vaut mieux risquer de s'approcher d'une veine que de percer un organe rouge. Tout les autres cas rendent l'intervention impossible.

Divers :

Il y a un seuil limite de déformation des organes. Par exemple on ne peut pas déformer un organe de plus d'un quart de sa surface initiale.

Il est préférable de choisir avant l'insertion entre une inclinaison sur le plan sagittal (qui sépare le corps entre la gauche et la droite) ou sur le plan transversal (qui sépare le corps entre le haut et le bas, c'est notre coupe scanner).

Une fois qu'un organe est percé on ne peut plus modifier l'inclinaison de l'aiguille. Dans ce cas il faut ressortir l'aiguille de l'organe pour changer l'inclinaison.

2.6 Description des exercices

2.6.1 Session d'apprentissage

Exercice1 : L'objectif de cet exercice était d'enseigner les bases de la planification du geste d'insertion et le choix du point d'insertion. La cible était accessible directement sans que l'on ait d'organes à contourner ou à transpercer (Figure 64).

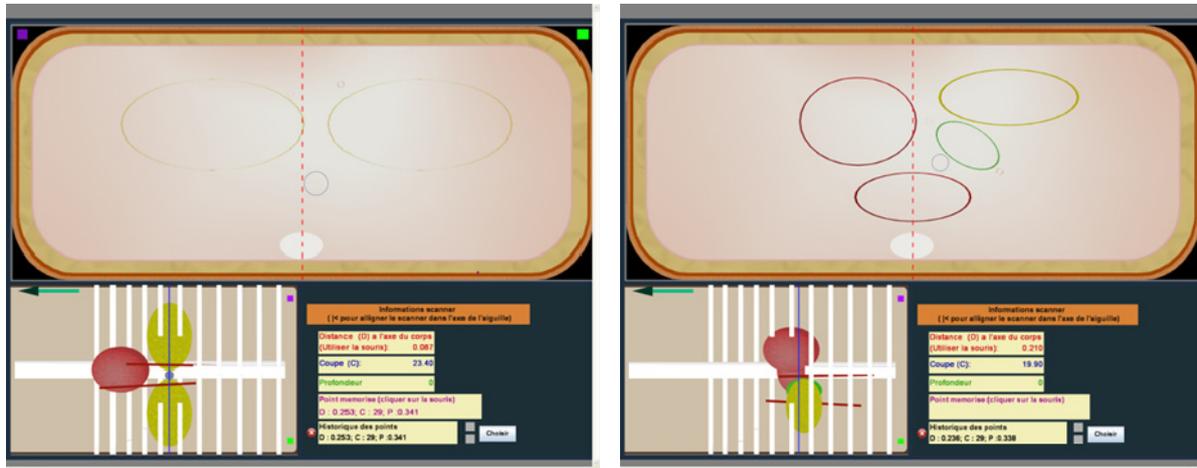


Figure 64 : A gauche, exercice 1; A droite, exercice 2 (session d'apprentissage)

Exercice2 : l'objectif de cet exercice était d'enseigner à l'apprenant la minimisation des risques et la gestion de l'inclinaison de l'aiguille. La cible pouvait être atteinte de deux façons : soit en frôlant un organe interdit (une veine) soit en perçant un organe sensible. Dans tous les cas, il était nécessaire de percer un organe permit placé au dessus de la cible, sous l'organe sensible et contre la veine. Le bon choix était de percer l'organe sensible mais en minimisant l'amplitude de perçage. Il est nécessaire de calculer l'inclinaison de l'aiguille de façon à ce qu'elle permette d'être le plus loin possible de la veine tout en perçant le moins possible l'organe sensible. L'aiguille devait être insérée avec une inclinaison sur le plan horizontal. Un autre organe interdit était également positionné sous la cible pour enseigner à l'apprenant à contrôler la force appliquée à l'aiguille lors du perçage d'un organe (l'apprenant devait faire attention à ne pas dépasser la cible et risquer ainsi de toucher l'organe interdit en appuyant trop fort sur l'aiguille, Figure 64).

Exercice 3 : l'objectif de cet exercice était d'enseigner à l'apprenant à éviter les os et à gérer l'inclinaison de l'aiguille. La cible était placée sous une côte et était entourée par une veine à droite et par un organe interdit sur la gauche. Pour l'atteindre Il n'y avait pas d'autre possibilité que d'insérer l'aiguille entre deux côtes plus loin avec une forte inclinaison sur le plan sagittal. Un autre organe interdit était placé sous la cible pour apprendre à contrôler la force d'appuie sur l'aiguille (Figure 65).

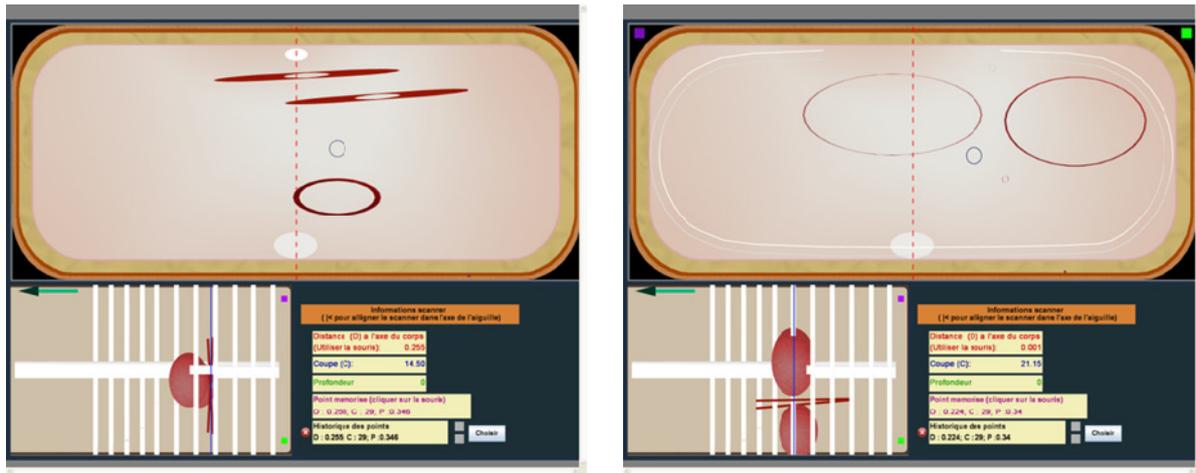


Figure 65 : A gauche, exercice 3; A droite, exercice 4 (session d'apprentissage)

Exercice 4 : l'objectif de cet exercice était d'enseigner à l'apprenant à pousser les organes tout en évitant de les percer. La cible était entourée d'organes interdits et ne pouvait être atteinte que si l'on poussait un des organes en prenant appui sur un os pour faire levier (Figure 65).

2.6.2 Session d'application

Exercice 1 : l'objectif de cet exercice était de tester la capacité de l'apprenant à gérer les priorités des contraintes. La cible était placée entre un organe vert et une veine. Dans ce cas le meilleur choix était de transpercer l'organe permit en maximisant l'amplitude de perçage plutôt que de risquer de frôler la veine (Figure 66).

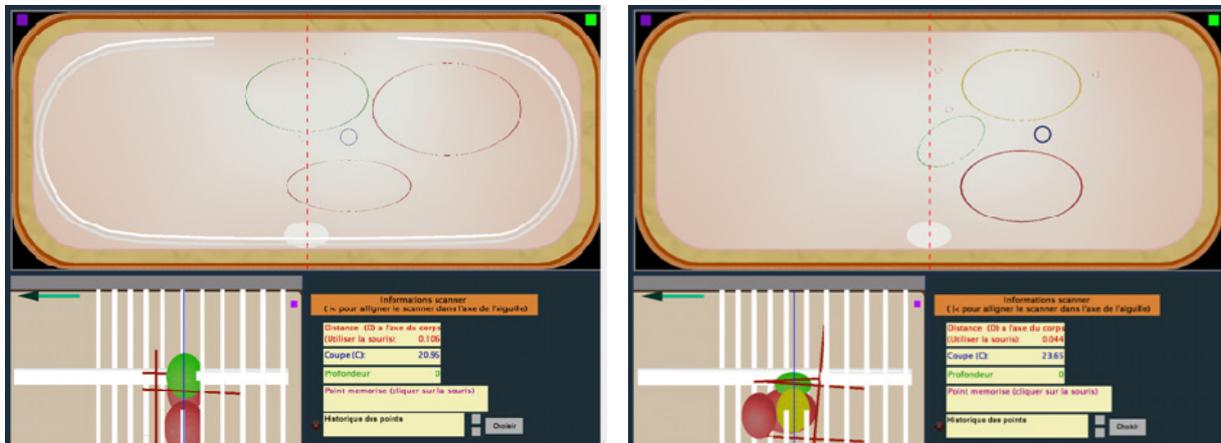


Figure 66 : A gauche exercice 1; A droite, exercice 2 (session application)

Exercice 2 : La cible était placée à moitié sous une côte et à moitié sous un organe sensible arrondie et entouré à son tour par des organes interdits. Pour atteindre la cible, l'apprenant devait gérer l'inclinaison de l'aiguille dans le plan horizontal de façon à minimiser l'amplitude de perçage de l'organe sensible qui devait inévitablement être transpercé (Figure 66).

Exercice 3 : L'objectif était de savoir si l'apprenant était capable de planifier des trajectoires avec des inclinaisons sur un plan sagittal. La cible était placée sous un organe sensible. Devant cet organe se trouvait un organe permit. Au-dessus de cet organe permit se trouvait un os qui imposait d'incliner l'aiguille dans le plan sagittal pour transpercer l'organe permit et atteindre la cible. Une veine placée au dessus de l'organe permit restreignait la possibilité d'incliner l'aiguille pour atteindre la cible. Un

organe interdit était placé sous la cible pour vérifier l'aptitude à doser la force d'appuie sur l'aiguille (Figure 67).

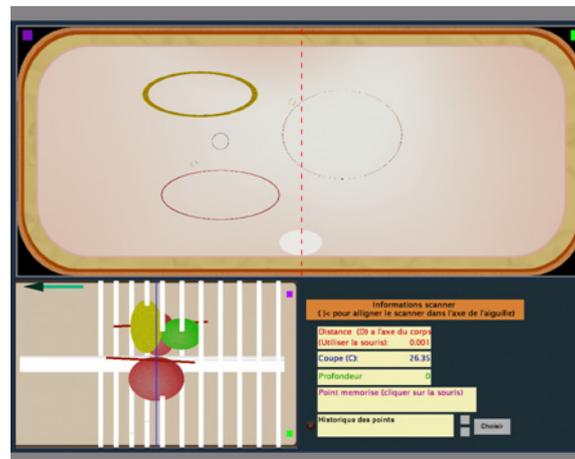


Figure 67 : Exercice 3 (session application)

2.6.3 Session de coplanification

Exercice 1 : L'objectif était de tester la capacité des apprenants à faire une insertion avec inclinaison sur le plan sagittal. La cible se trouvait sous un organe sensible. Celui-ci était entouré d'organes interdits. On pouvait percer tout droit mais dans ce cas on perçait l'organe sensible sur toute sa surface (on ne respectait pas la contrainte de minimisation de l'amplitude de perçage). Si on perçait en inclinant l'aiguille dans le plan transversal on minimisait l'amplitude de perçage. Le meilleur choix était de percer sur un plan sagittal pour éviter de percer l'organe sensible (Figure 68).

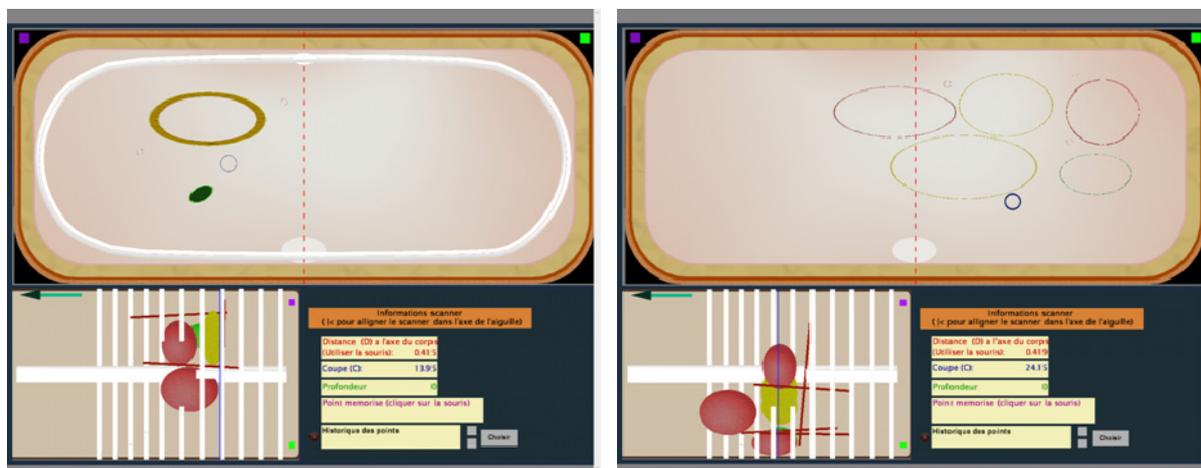


Figure 68 : A gauche, exercice 1; A droite, exercice 2 (session de coplanification)

Exercice 2 : L'objectif était de tester la capacité des apprenants à pousser un organe pour éviter de le percer. La cible se situait sous deux organes sensibles. Le premier était rond et assez petit et le second était allongé et décalé légèrement vers la gauche. Une veine était placée à droite du premier organe sensible. Un organe interdit était placé à droite de cette veine. Un organe interdit était placé à gauche du premier organe sensible. Il était impossible de passer l'aiguille tous droit sans transpercer les deux organes sensibles. Pour éviter de percer ces deux organes, il était nécessaire de pousser le premier sur un plan transversal. Pour minimiser l'amplitude de perçage du second organe sensible, il était nécessaire de passer à droite tout en se rapprochant de la veine. Il était donc préférable de transpercer

le deuxième organe sensible sur une plus grande surface en passant par la gauche et d'éviter ainsi de se rapprocher trop de la veine (Figure 68).

Exercice 3 : L'objectif était de tester la capacité des apprenants à pousser un organe interdit sans risquer de le percer. La cible se trouvait sous un organe interdit, entouré de veines. La seule solution pour atteindre la cible était de pousser cet organe dans le plan horizontal en passant au raz de l'os. Ceci permettait de minimiser la distance sur laquelle l'organe était poussé et de minimiser ainsi les risques de le percer (Figure 69).



Figure 69 : A gauche, exercice 3; A droite, exercice 4 (session de coplanification)

Exercice 4 : L'objectif était de tester la capacité des apprenants à prévoir la trajectoire la plus sécurisée. La cible était placée sous deux organes sensibles. Un organe permet était placé sur la gauche du premier organe sensible et un organe interdit était placé sur sa droite. Pour atteindre la cible il était nécessaire de transpercer l'organe permet. De cette façon, il était possible d'éviter de se rapprocher de la veine (qui se trouvait entre cet organe et le second organe sensible). Dans ce cas il était préférable de percer l'organe sensible sur une plus grande surface plutôt que de risquer de toucher cette veine (Figure 69).

2.6.4 Session comanipulation

Exercice 1 : L'objectif était de tester la capacité des apprenants à trouver la bonne inclinaison de l'aiguille et à gérer cette inclinaison jusqu'à l'atteinte de la cible.

La cible était placée sous un organe sensible. Un organe permet était placé au dessus de celui-ci. Un deuxième organe sensible était placé à côté du premier et était entouré par deux organes interdits. Une veine était placée en dessous de l'organe permet et au dessus de la partie gauche du deuxième organe sensible. Une deuxième veine était placée en dessous du premier organe sensible (Figure 70). Deux solutions étaient alors possibles :

- passer par l'organe permet tout en se rapprochant dangereusement de la veine,
- transpercer l'organe sensible en gérant une grande inclinaison de l'aiguille (et les retours de force appliqués par la peau qui en résultent) pour éviter de toucher les deux organes interdits.



Figure 70 : exercice 1 (session de comanipulation)

2.7 Analyses statistiques des résultats

2.7.1 Session d'application

Performances

Performances globales

- **Temps total pour accomplir la tâche** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps total pour accomplir la tâche ($F(2, 57) = 7.9381$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus rapides pour accomplir la tâche dans la condition AVH que dans la condition AV ($t(38) = 4.8681$; $p < 0.05$) et la condition AT ($t(38) = 2.8555$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(38) = 1.7049$; $p > 0.05$; Figure 71).

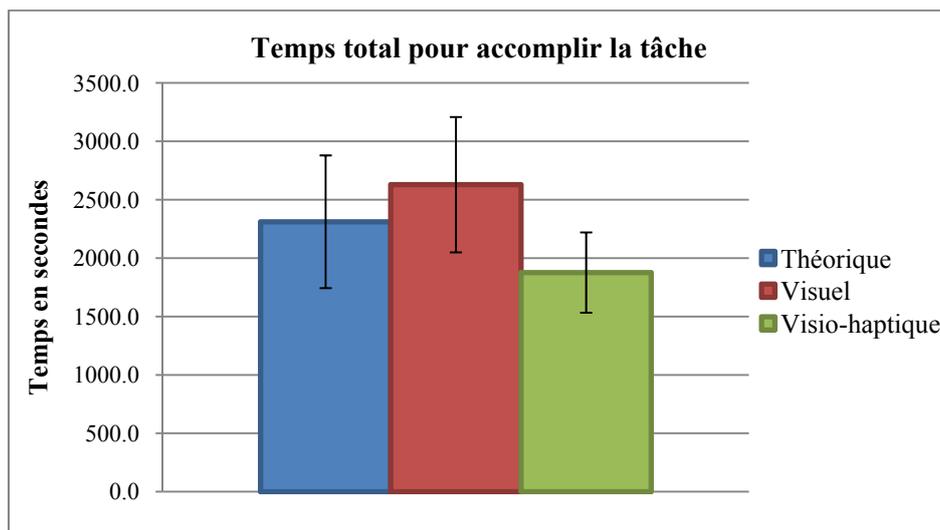


Figure 71 : Temps total pour accomplir la tâche

- **Temps passé avant la première insertion** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps passé avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 57) = 0.2908$; $p > 0.05$; Figure 72).

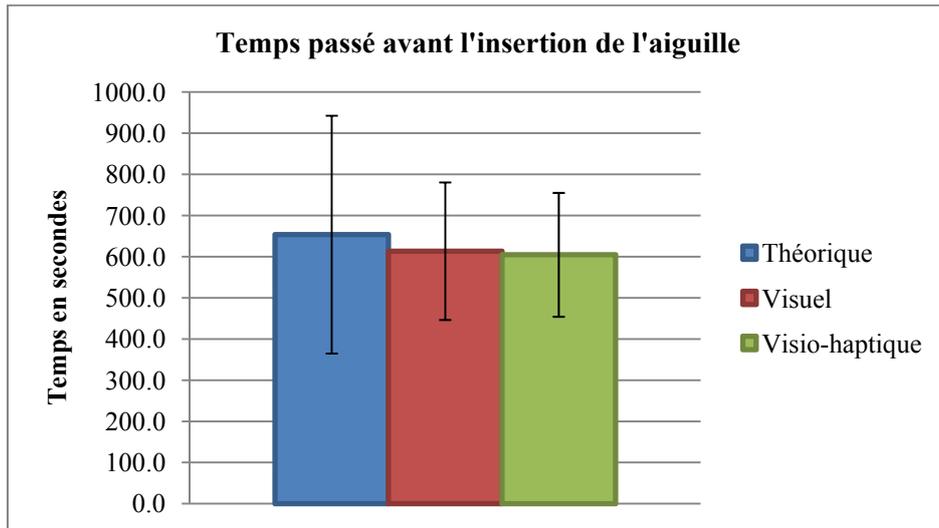


Figure 72 : Temps passé avant l'insertion de l'aiguille

- **Nombre d'erreurs** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre d'erreurs ($F(2, 57) = 1.1317$; $p > 0.05$; Figure 73).

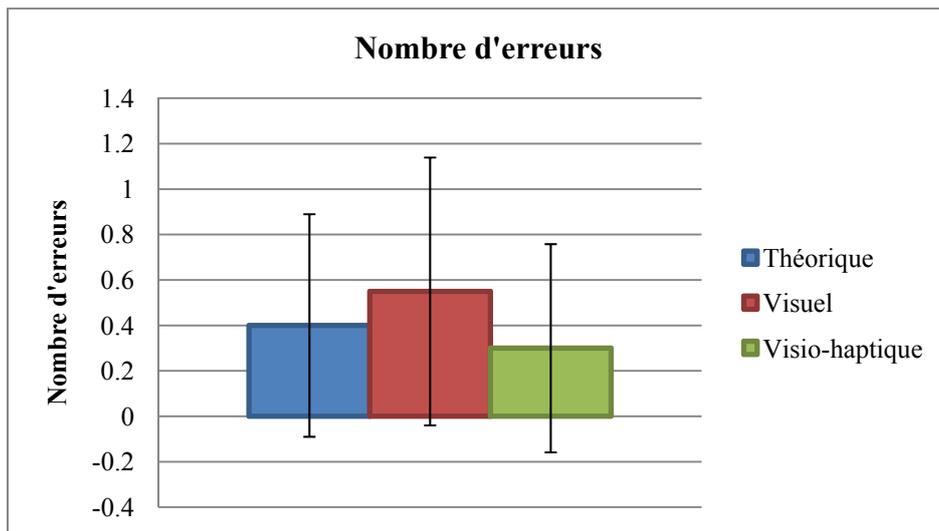


Figure 73 : nombre des erreurs

Performances liées à la phase de planification du geste

- **Temps total pour planifier le geste** : Les résultats montrent qu'il n'existe pas un effet significatif du type d'apprentissage sur le temps de planification de l'opération ($F(2, 57) = 2.5908$; $p > 0.05$). Néanmoins, les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus rapides pour planifier le geste dans la condition AVH que dans la condition AV ($t(38) = 2.2339$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(38) = 1.1017$; $p > 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AVH ($t(38) = 1.2262$; $p > 0.05$; Figure 74).

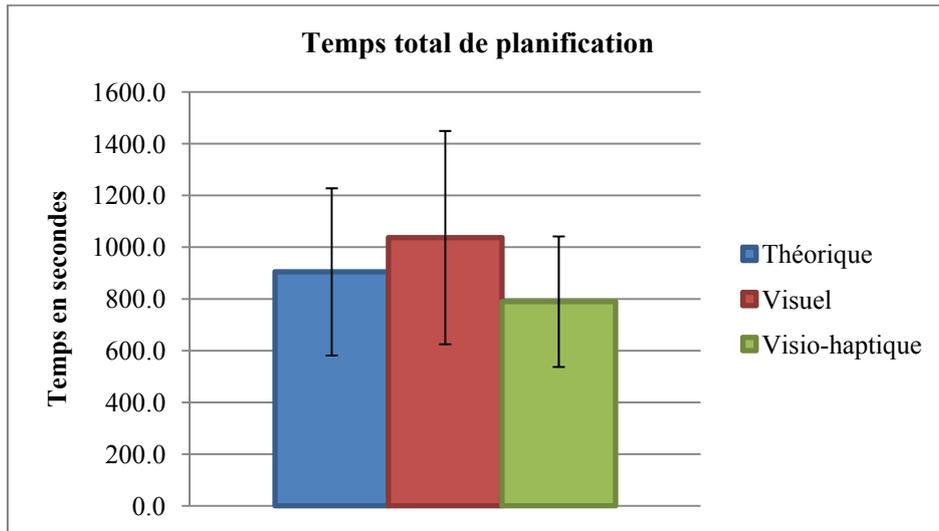


Figure 74 : Temps de planification de l'opération

- **Distance moyenne finale par rapport au centre de la cible :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur la distance moyenne au centre de la cible à la fin de l'intervention ($F(2, 57) = 0.9890$; $p > 0.05$; Figure 75).

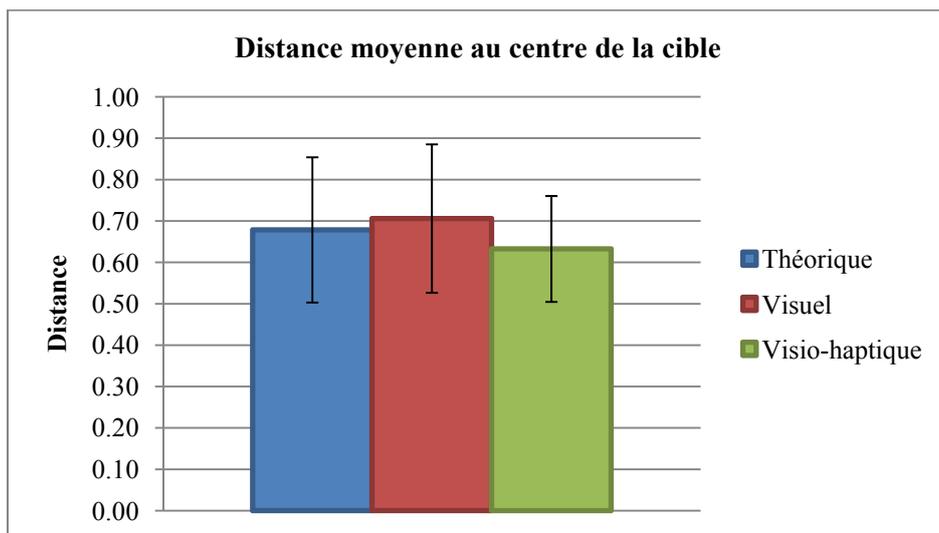


Figure 75 : Distance moyenne au centre de la cible à la fin de l'opération

- **Amplitude de perçage des organes sensibles :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude de perçage des organes sensibles ($F(2, 57) = 0.3495$; $p > 0.05$; Figure 76).

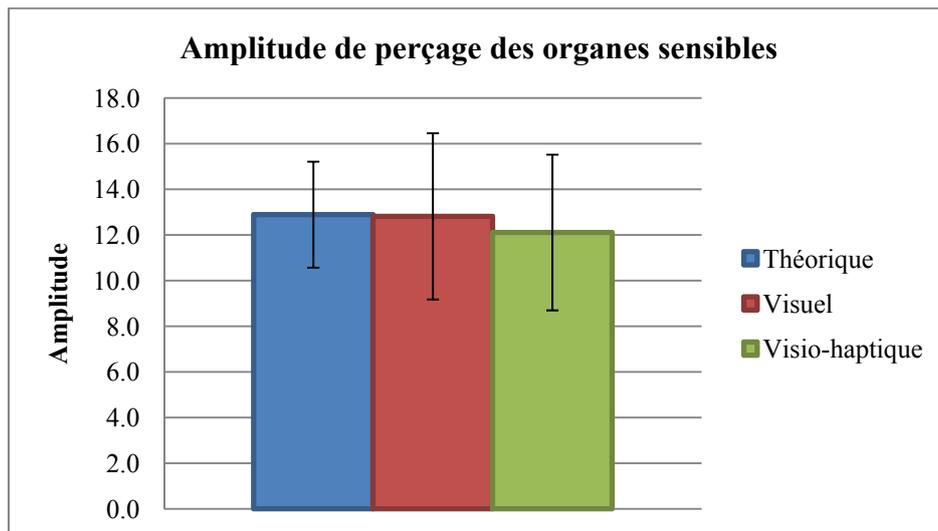


Figure 76 : Amplitude de perçages des organes sensibles

- **Nombre total de repère :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre total de points repères utilisés ($F(2, 57) = 1.4844$; $p > 0.05$; Figure 77).

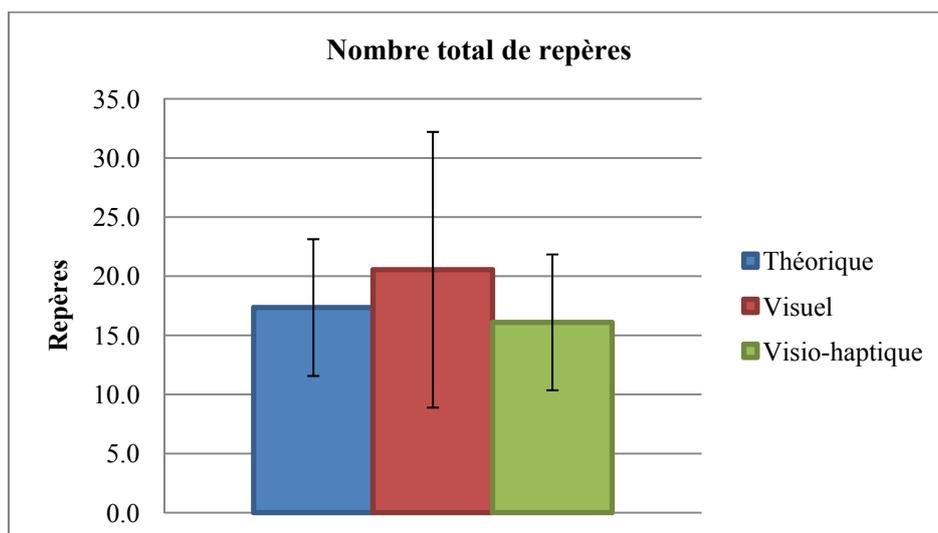


Figure 77 : Nombre total de points repères

- **Nombre de repère avant la première insertion :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de points repères utilisés avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 57) = 0.1595$; $p > 0.05$; Figure 78).

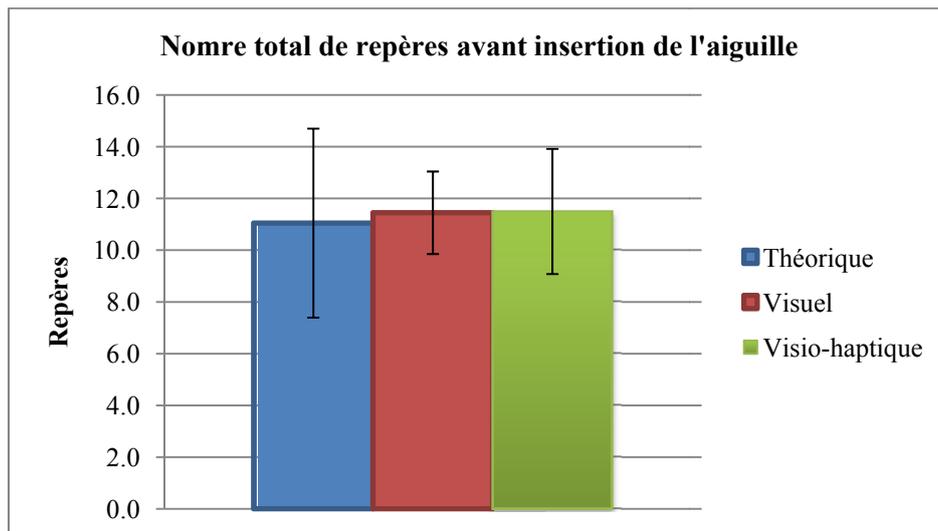


Figure 78 : Nombre total de points repères avant l'insertion de l'aiguille

- Nombre de repère supplémentaires :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps total pour accomplir la tâche ($F(2, 57) = 4.0546$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont utilisé moins de repères supplémentaires que les participants dans la condition AT ($t(38) = 2.1011$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AV ($t(38) = 2.6594$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(38) = 1.1508$; $p > 0.05$; Figure 79).

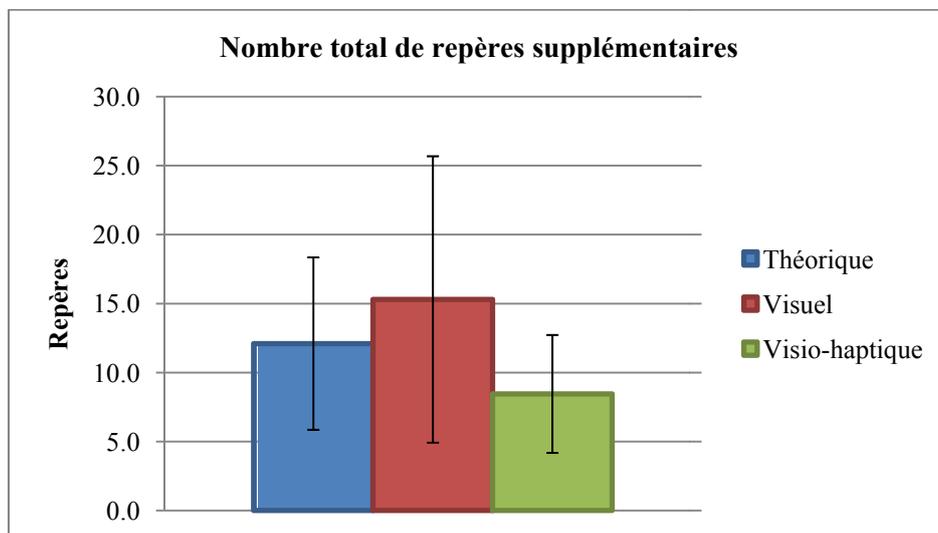


Figure 79 : Nombre de points repères supplémentaires

- Nombre de scanner :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de scanner effectués ($F(2, 57) = 0.7677$; $p > 0.05$; Figure 80).

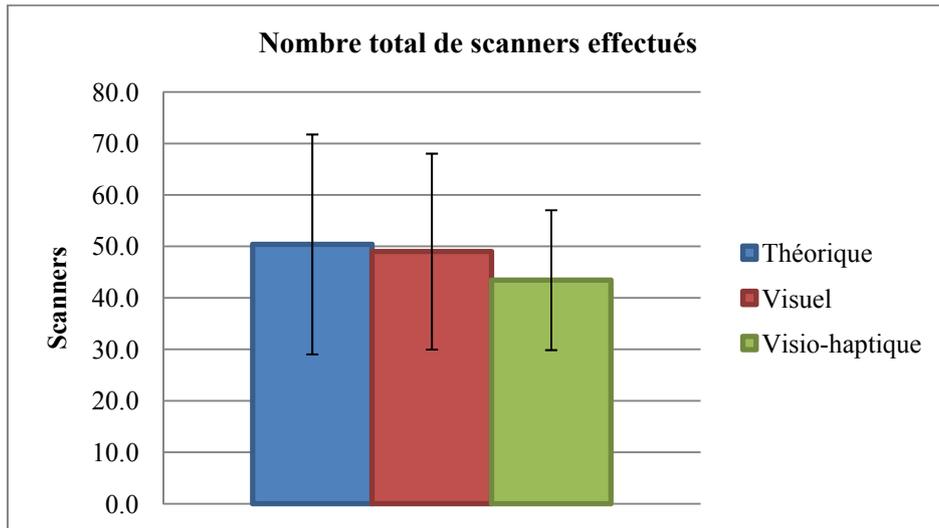


Figure 80 : Nombre total de scanners effectués

Performances liées à l'exécution du geste

- Temps pour accomplir le geste :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps passé à effectuer les gestes d'insertion ($F(2, 57) = 6.9638$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont accompli les gestes plus rapidement que les participants dans la condition AT ($t(38) = 3.1093$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AV ($t(38) = 3.5090$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(38) = 0.9073$; $p > 0.05$; Figure 81).

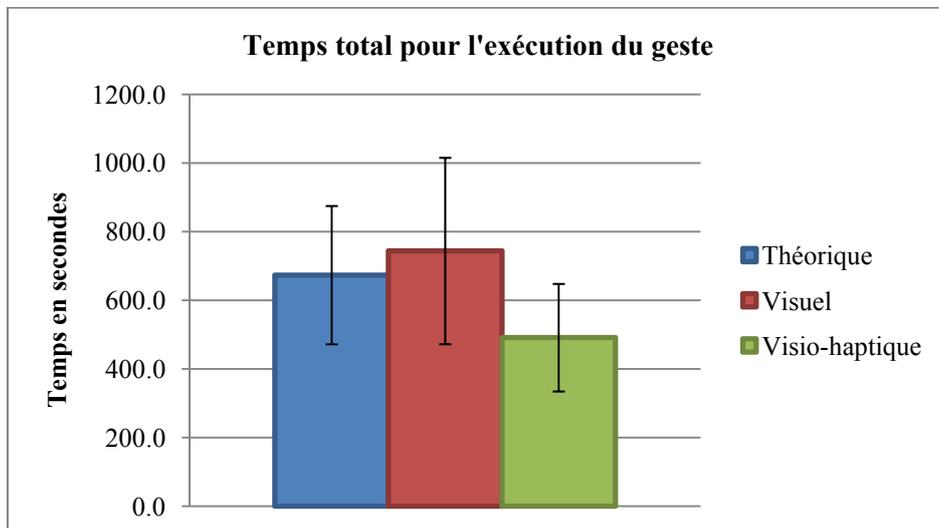


Figure 81 : Durée totale pour l'exécution du geste

- Contacts avec les organes sensibles :** Les résultats montrent qu'il n'existe pas un effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de contacts avec les organes sensibles ($F(2, 57) = 2.7991$; $p > 0.05$). Néanmoins, les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont minimisé les contacts avec les organes sensibles en comparaison avec les participants dans la condition AT ($t(38) = 2.2904$; $p < 0.05$) et les participants dans la condition AV ($t(38) = 2.1719$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre

les participants dans la condition AT et dans la condition AV ($t(38)= 0.1067$; $p>0.05$; Figure 82).

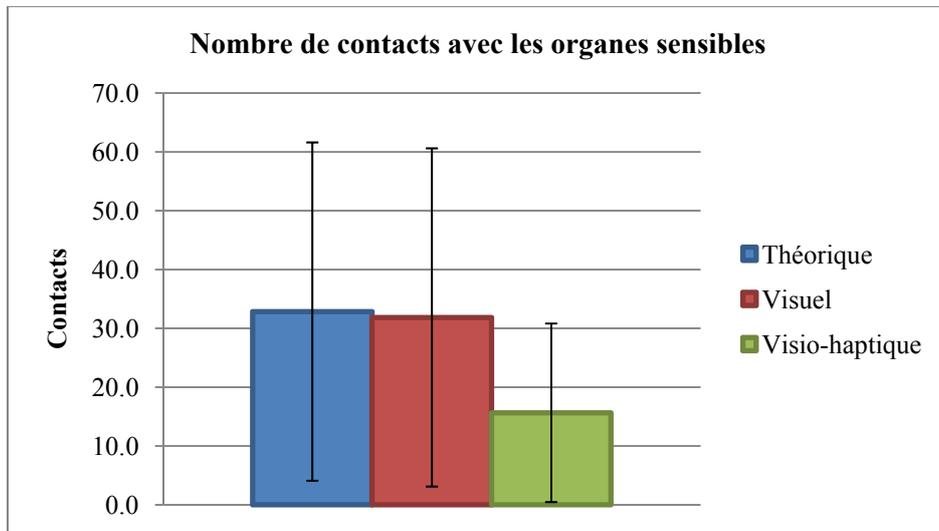


Figure 82 : Nombre de contacts avec les organes sensibles

- Nombre de gestes d'insertion :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre total de gestes d'insertion ($F(2, 57)= 8.9900$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AV ont effectué davantage de gestes d'insertion que les participants dans la condition AT ($t(38)= 2.8313$; $p<0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(38)= 4.2121$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et la condition AVH ($t(38)= 0.9402$; $p>0.05$; Figure 83).

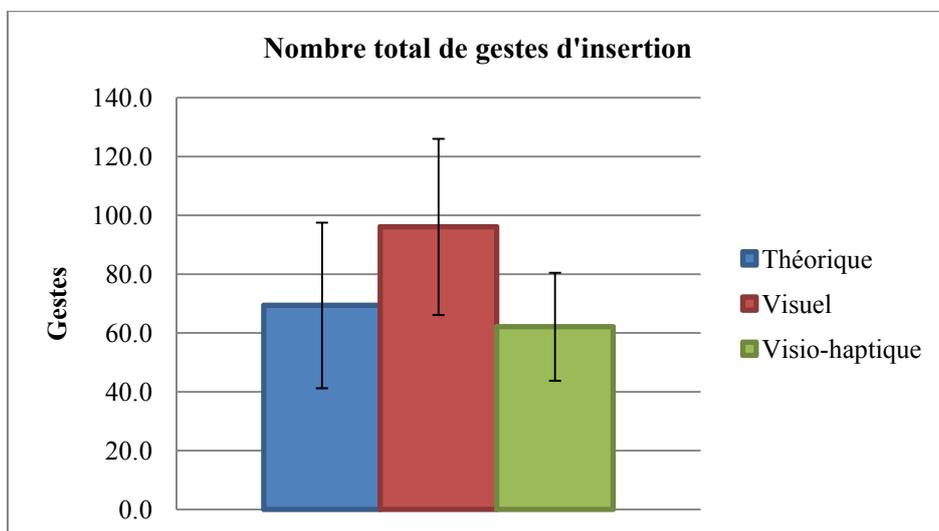


Figure 83 : Nombre total de gestes d'insertion

- Amplitude moyenne des gestes :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur l'amplitude moyenne des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,57)= 3.5907$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont effectué des gestes d'insertion de plus grande amplitude moyenne que les participants dans la condition AV ($t(38)= 2.2419$; $p<0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(38)=$

2.1513; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(38) = 0.1959$; $p > 0.05$; Figure 84).

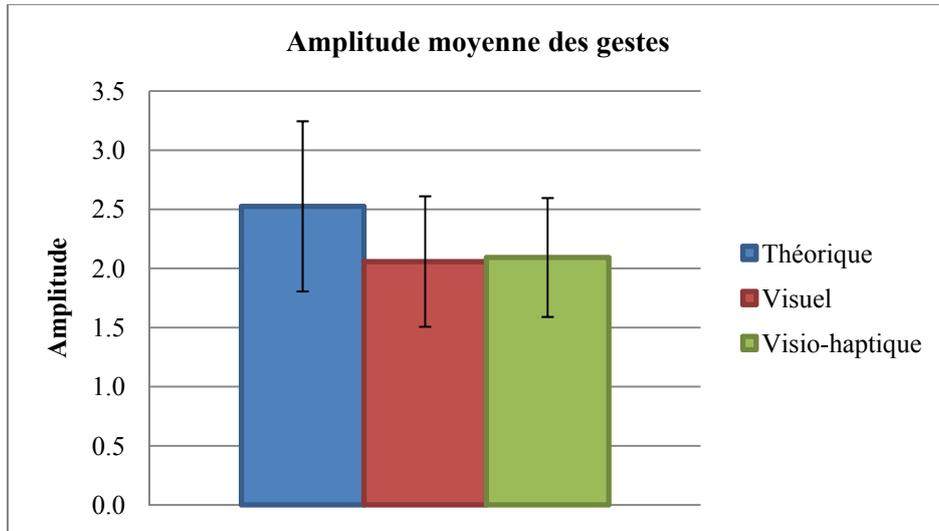


Figure 84 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion

- Amplitude maximale des gestes :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur l'amplitude maximale des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2, 57) = 4.5655$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont effectué des gestes d'insertion de plus grande amplitude maximale que les participants dans la condition AVH ($t(38) = 3.0476$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(38) = 1.8422$; $p > 0.05$), et entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(38) = 1.0511$; $p > 0.05$; Figure 85).

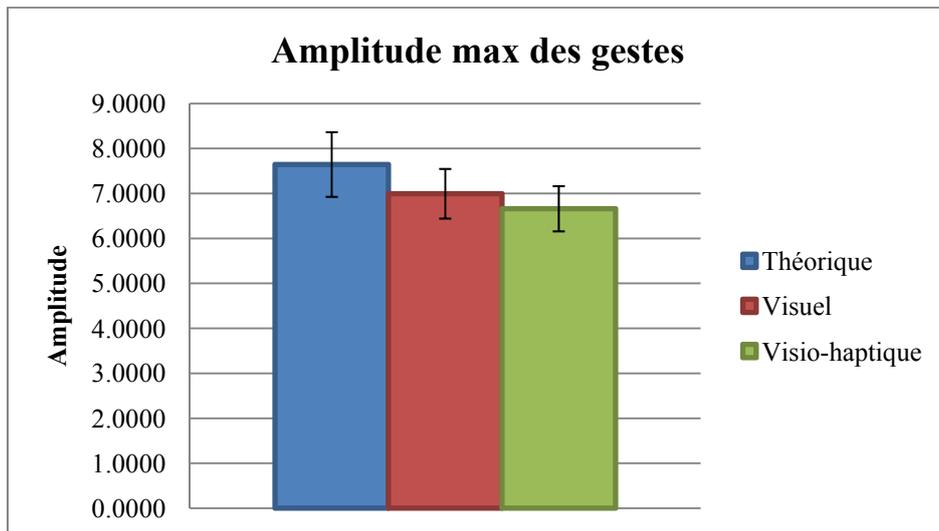


Figure 85 : Amplitude maximale des gestes d'insertion

2.7.2 Session de coplanification

Performance

Performances globales

- **Temps total pour accomplir la tâche** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps total pour accomplir la tâche ($F(2, 27) = 4.5926$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus lents pour accomplir la tâche dans la condition d'apprentissage AV que les participants dans la condition AT ($t(18) = 2.4256$; $p < 0.05$) et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 2.7198$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 0.0302$; $p > 0.05$; Figure 86).

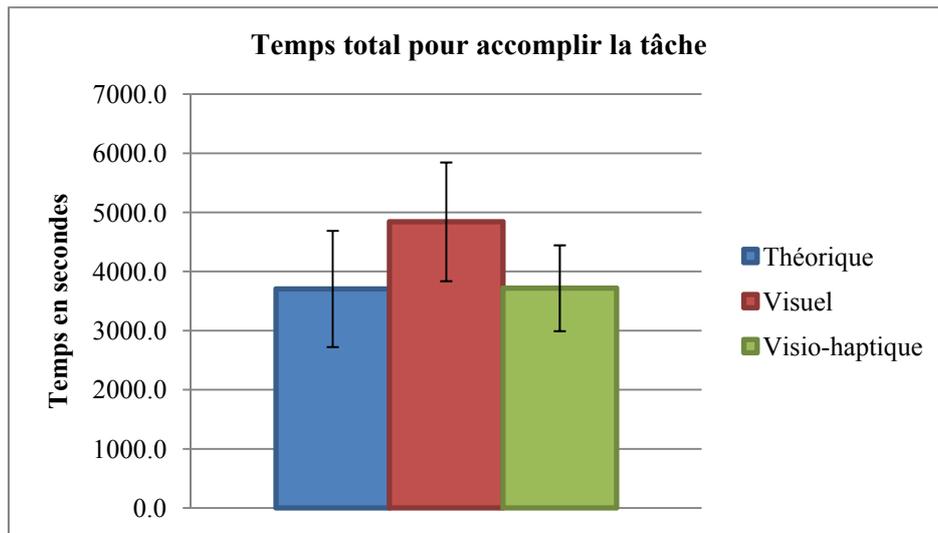


Figure 86 : Temps total pour accomplir la tâche (session coplanification)

- **Temps passé avant la première insertion** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps passé avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 27) = 0.9557$; $p > 0.05$; Figure 87).

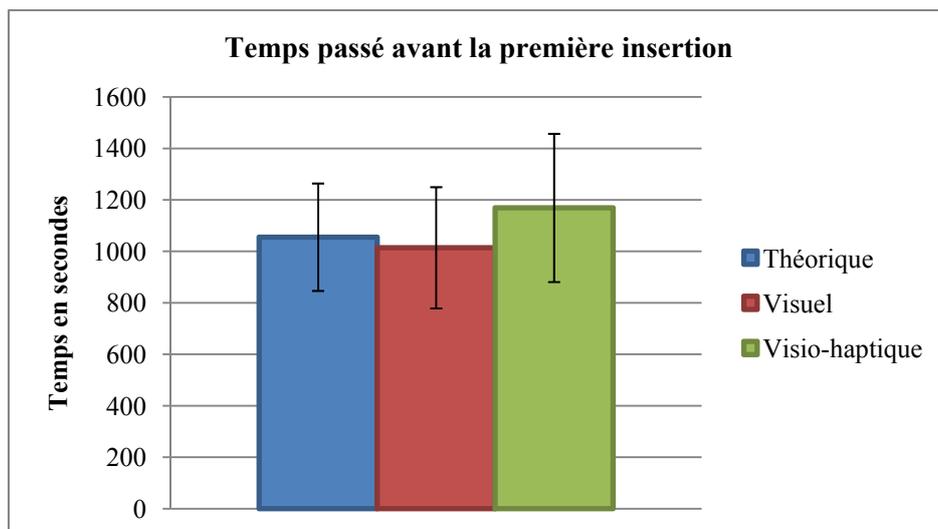


Figure 87 : Temps passé avant l'insertion de l'aiguille (session coplanification)

- **Fréquences d'erreurs** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre d'erreurs ($F(2, 27) = 0.1627$; $p > 0.05$; Figure 88)

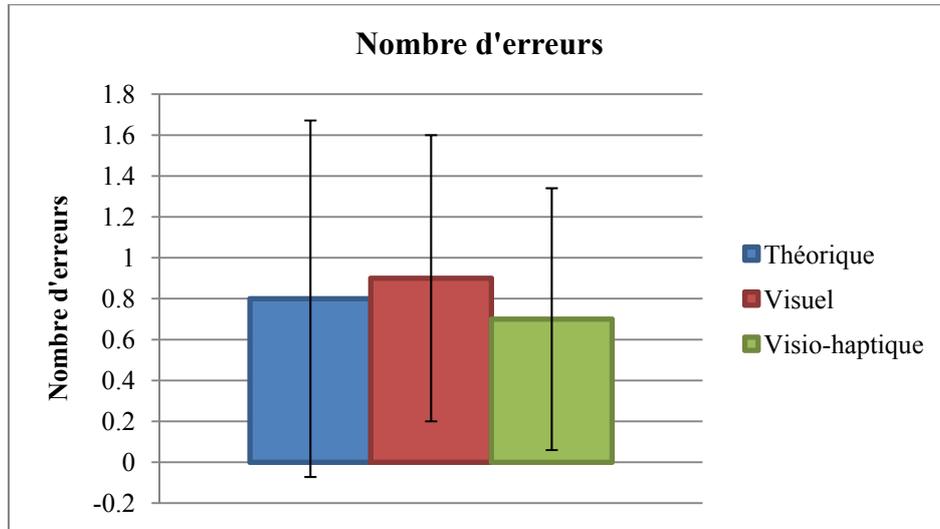


Figure 88 : Nombre d'erreurs

Performances liées à la phase de planification du geste

- **Temps total pour planifier le geste** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps total de planification de l'opération $F(2,27) = 9.9968$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus rapides pour planifier le geste dans la condition AT que dans la condition AV ($t(18) = 4.1616$; $p < 0.05$) et dans la condition AVH ($t(18) = 3.8545$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 0.3620$; $p > 0.05$; Figure 89).

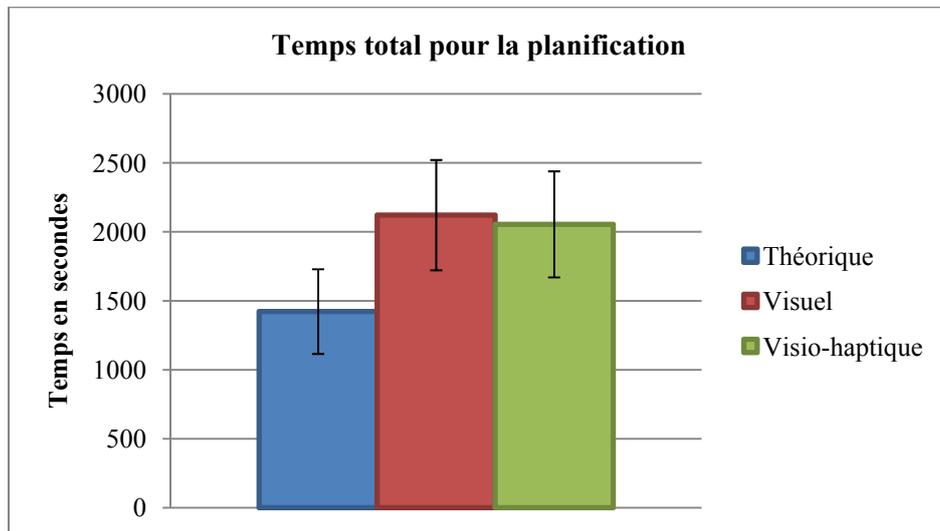


Figure 89 : Temps total pour la planification de l'opération (session coplanification)

- **Distance finale moyenne par rapport au centre de la cible** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur la distance moyenne du centre de la cible ($F(2, 27) = 5.4110$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants ont été plus précis pour viser le centre de la cible dans la condition AT que dans la condition AV ($t(18) = 3.0736$; $p < 0.05$), et dans la condition AVH ($t(18) = 2.6315$; $p < 0.05$). Aucune différence

significative n'est observée entre les participants dans la condition AV et dans la condition AVH ($t(18)= 0.2348$; $p>0.05$; Figure 90).

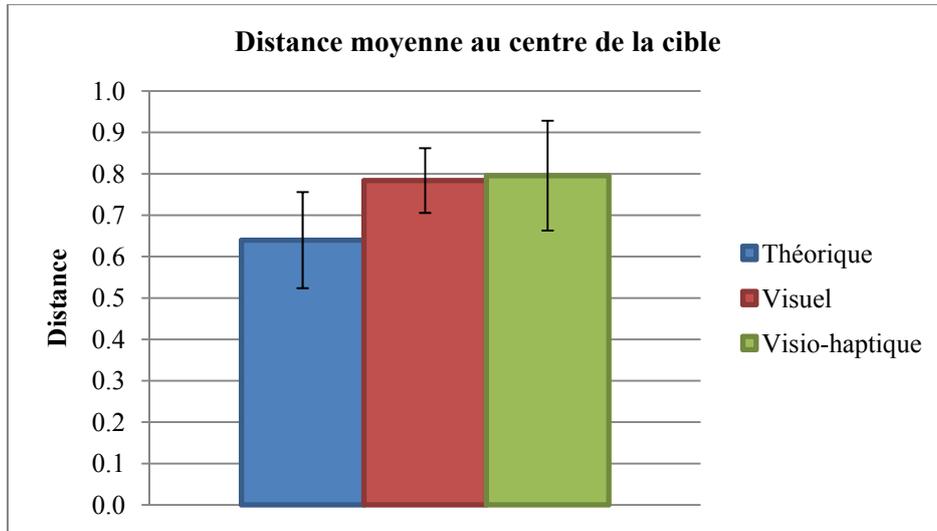


Figure 90 : Distance moyenne du centre de la cible à la fin de l'opération (session coplanification)

- Amplitude de perçage des organes sensibles** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur l'amplitude de perçage des organes sensibles ($F(2, 27)= 7.9281$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que l'amplitude de perçage des organes sensibles a été plus importante pour les participants dans la condition AV que les participants dans la condition AT ($t(18)= 4.5864$; $p<0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 3.2596$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 0.3120$; $p>0.05$; Figure 91).

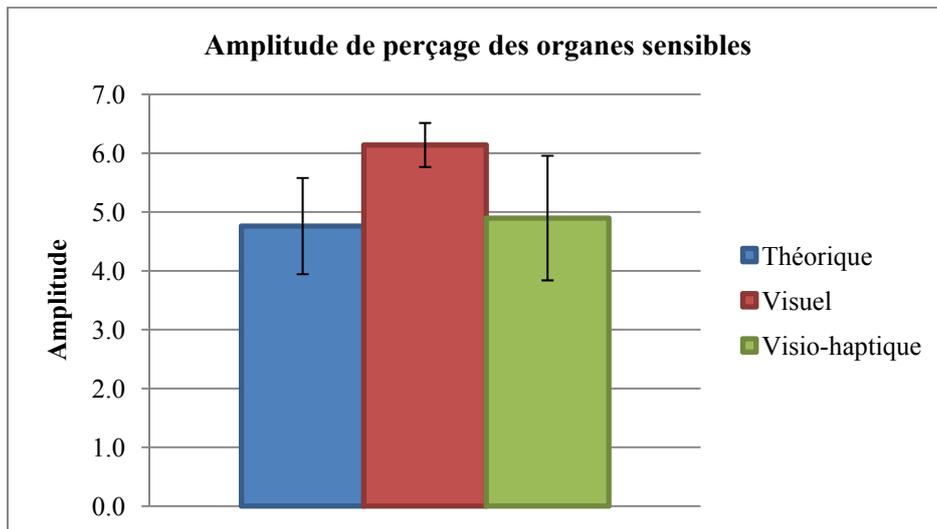


Figure 91 : Amplitude de perçage des organes sensibles (session coplanification)

- Nombre total de repères** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre total des repères utilisés ($F(2, 27)= 3.5220$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont utilisé davantage de points repères que les participants dans la condition AT ($t(18)= 2.7148$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants

dans la condition AV ($t(18)= 1.8635$; $p>0.05$), et entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 0.7779$; $p>0.05$; Figure 92).

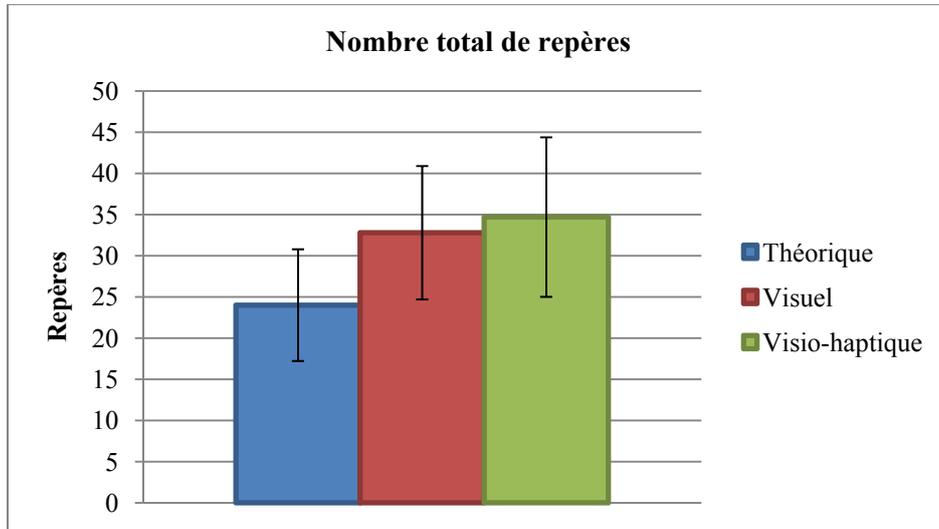


Figure 92 : Nombre total de points repères (session coplanification)

- **Nombre de repère avant la première insertion :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de repères utilisés avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 27)=1.9569$; $p>0.05$; Figure 93).

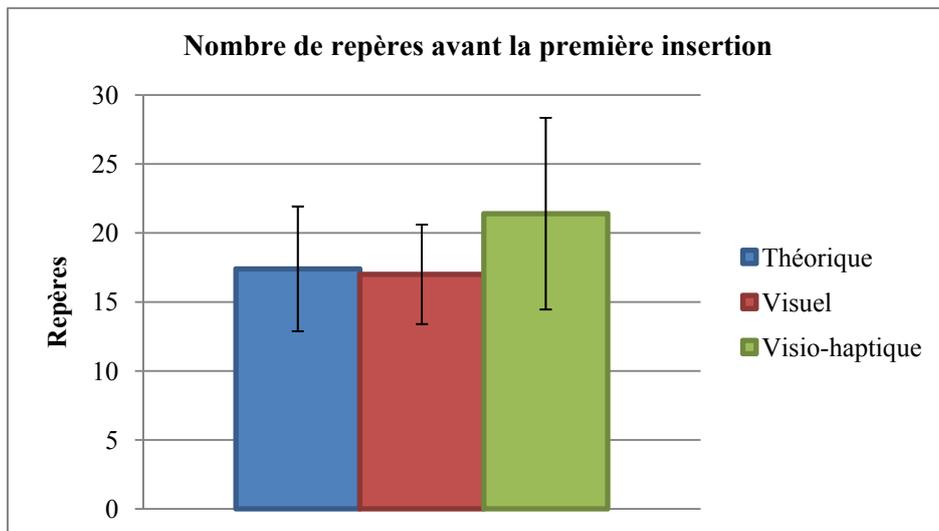


Figure 93 : Nombre de points repères avant l'insertion de l'aiguille (session coplanification)

- **Nombre de repère supplémentaires :** Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre de repères supplémentaires utilisés ($F(2,27)= 3.3686$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé moins de repères supplémentaires que les participants dans la condition AV ($t(18)= 0.0474$; $p<0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 2.7649$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 0.2589$; $p>0.05$; Figure 94).

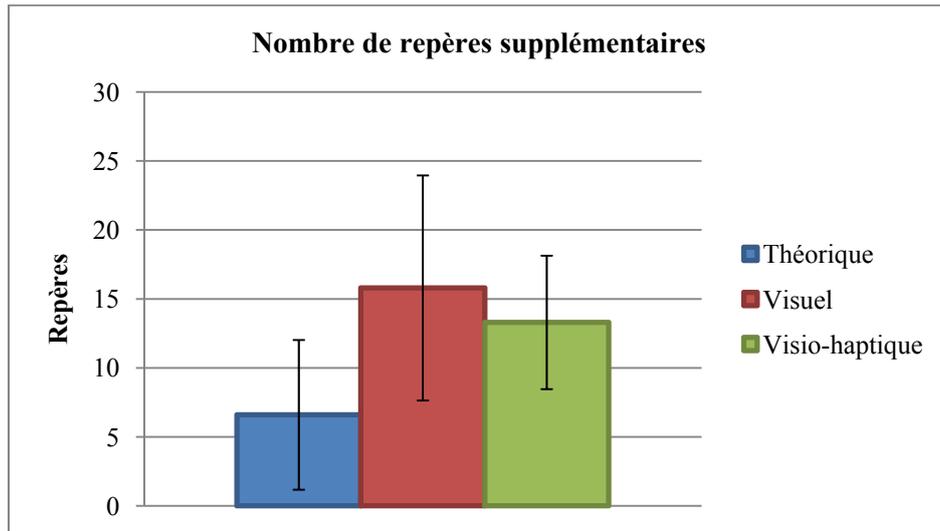


Figure 94 : Nombre de points repères supplémentaires (session coplanification)

- Nombre de scanners** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre de scanners effectués ($F(2,27)= 4.7437$; $p<0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont effectué moins de scanners que les participants dans la condition AV ($t(18)= 2.5798$; $p<0.05$), et que les participants dans la condition AVH ($t(18)= 2.8439$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18)= 0.6468$; $p>0.05$; Figure 95).

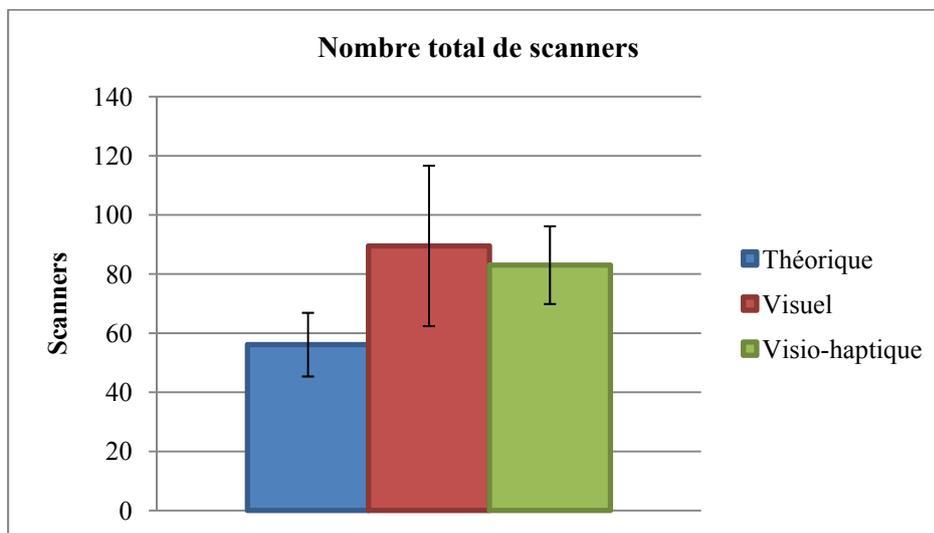


Figure 95 : Nombre total de scanner effectués (session coplanification)

Performances liées à l'exécution du geste

- Temps total pour accomplir le geste** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le temps total pour exécuter le geste ($F(2, 27)= 5.5347$; $p<0.05$). Les participants dans la condition AVH ont accompli les gestes plus rapidement que les participants dans la condition AT ($t(18)= 2.9713$; $p<0.05$) et les participants dans la condition AV ($t(18)=3.3295$; $p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(18)= 0.4204$; $p>0.05$; Figure 96).

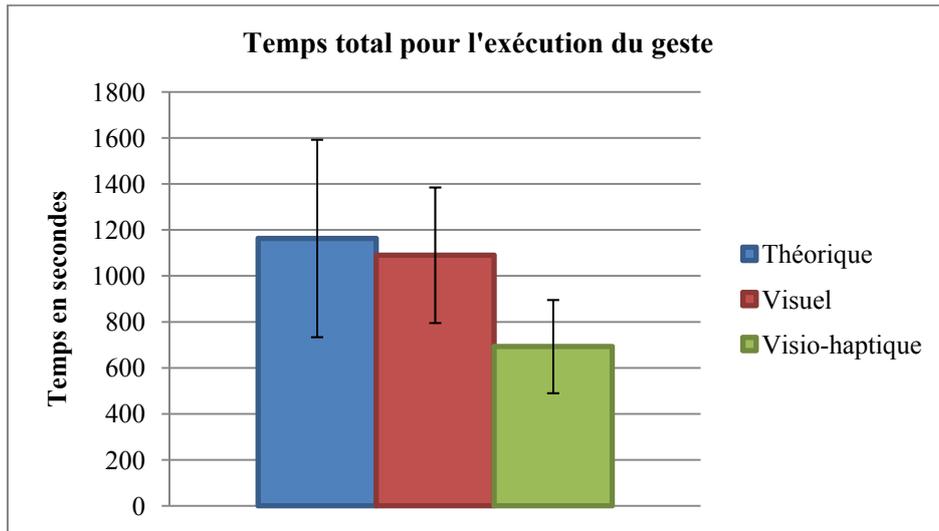


Figure 96 : Durée totale de l'exécution du geste (session coplanification)

- Contacts avec les organes sensibles** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre de contacts avec les organes sensibles ($F(2, 27) = 4.6360$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont minimisé davantage le nombre de contacts avec les organes sensibles que les participants dans la condition AT ($t(18) = 3.9482$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AV ($t(18) = 2.4689$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(18) = 1.6453$; $p > 0.05$; Figure 97).

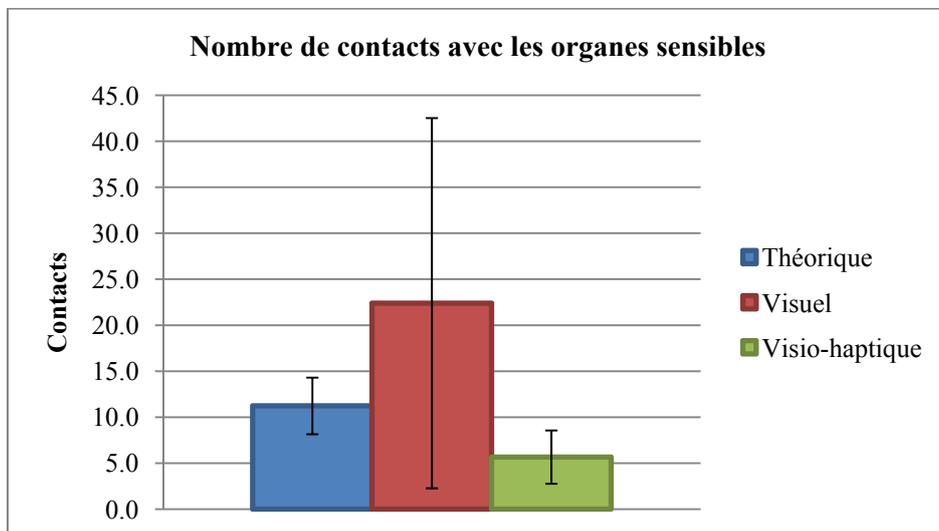


Figure 97 : Nombre de contacts avec les organes sensibles (session coplanification)

- Nombre de gestes d'insertion** : Les résultats montrent qu'il existe un effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27) = 3.2675$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AVH ont minimisé davantage le nombre de gestes d'insertion que les participants dans la condition AT ($t(18) = 2.1450$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AV ($t(18) = 2.5012$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AT et les participants dans la condition AV ($t(18) = 0.7585$; $p > 0.05$; Figure 98).

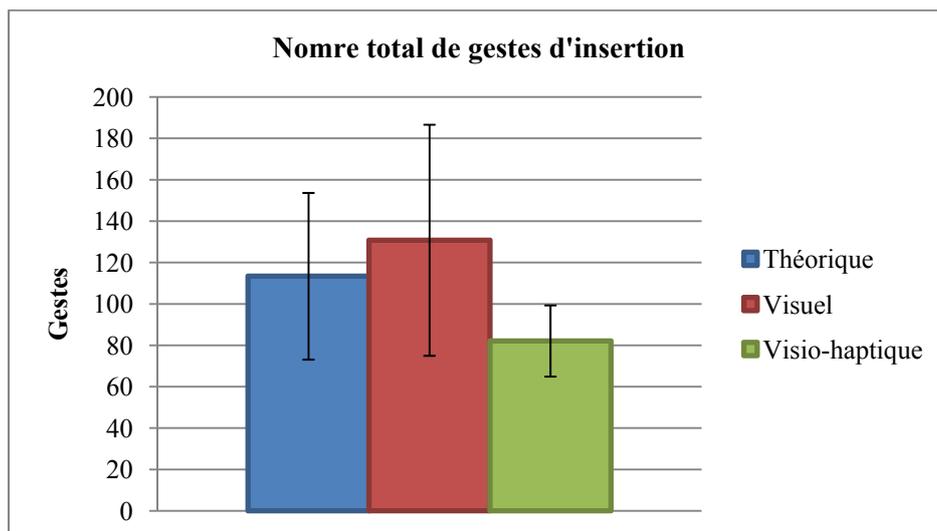


Figure 98 : Nombre total de gestes d'insertions (session coplanification)

- **Amplitude moyenne des gestes** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude moyenne des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27)=1.9238$; $p>0.05$; Figure 99).

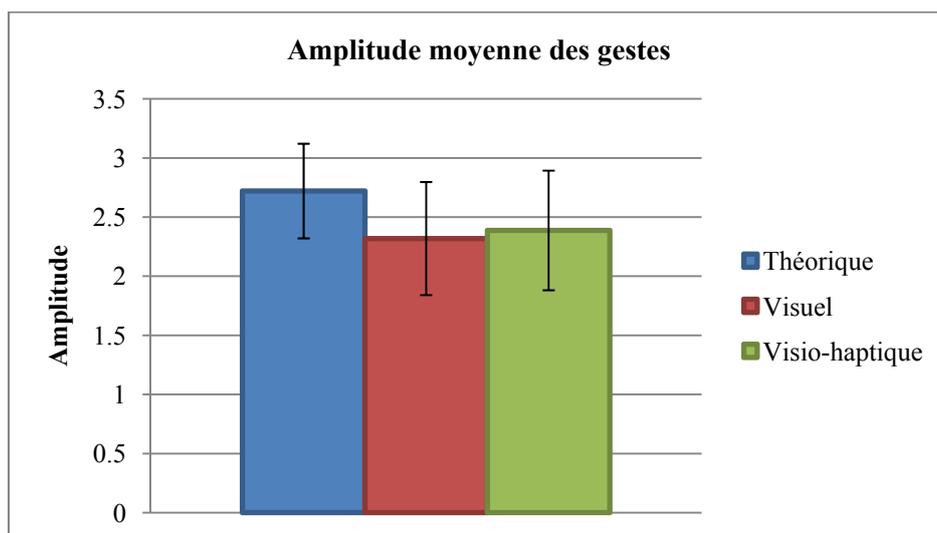


Figure 99 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion (session coplanification)

- **Amplitude maximale des gestes** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude maximale des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27)=1.1629$; $p>0.05$; Figure 100).

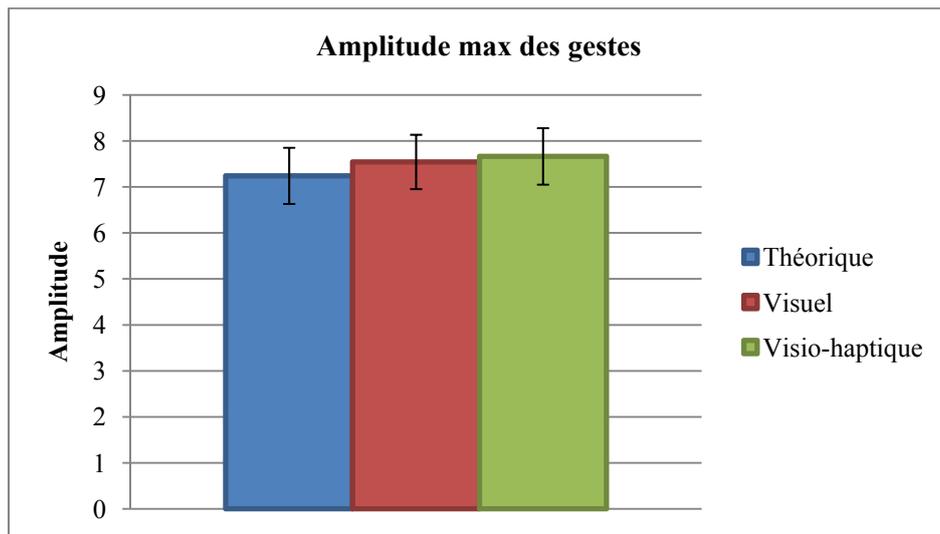


Figure 100 : Amplitude maximale des gestes d'insertion (session coplanification)

- **Demandes de concertation :** Aucun des participants n'a utilisé le bouton d'arrêt pour demander explicitement une concertation sur l'exécution du geste. Aucun traitement statistique n'a donc été réalisé pour cette mesure.

2.7.3 Session de comanipulation

Performance

Performances globales

- **Temps total pour accomplir la tâche :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps total pour accomplir la tâche ($F(2, 27) = 0.7686$; $p > 0.05$; Figure 101).

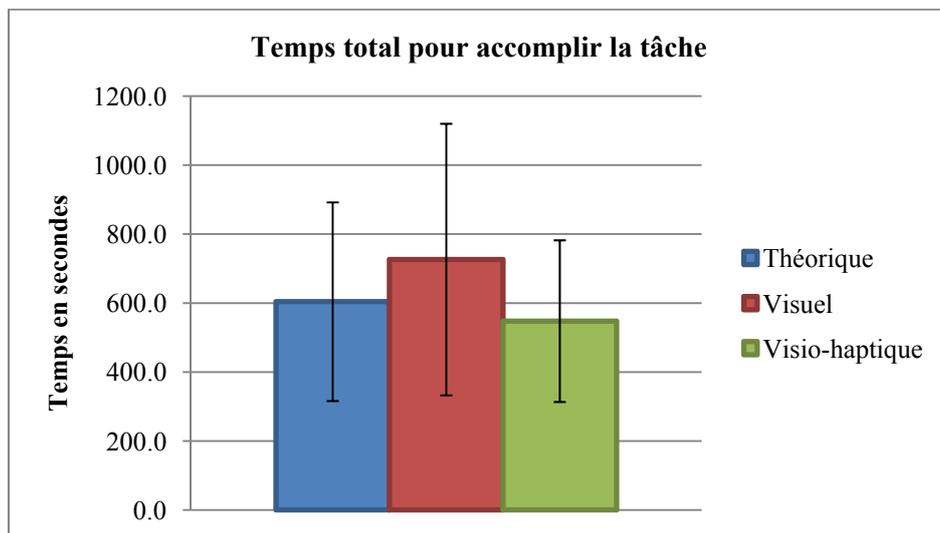


Figure 101 : Temps total pour accomplir la tâche (session de comanipulation)

- **Temps passé avant la première insertion :** Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps passé avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 27) = 1.0118$; $p > 0.05$; Figure 102).

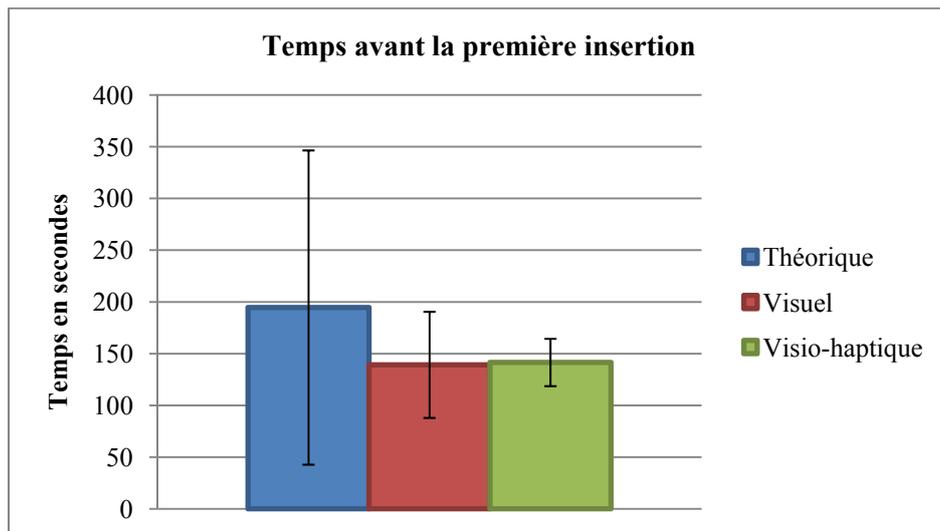


Figure 102 : Temps passé avant la première insertion de l'aiguille (session de comanipulation)

- **Fréquences d'erreurs** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre d'erreurs ($F(2, 27) =$; $p =$; Figure 103)

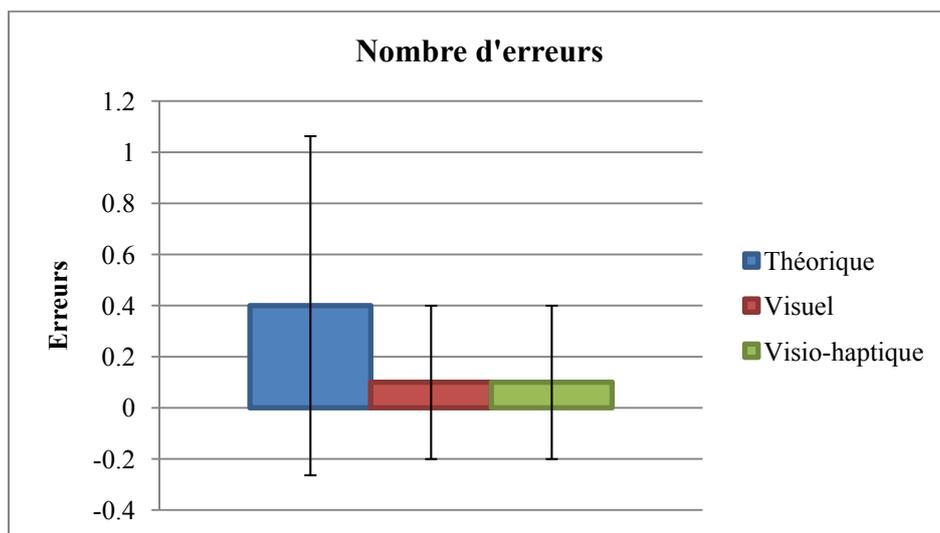


Figure 103 : nombre d'erreurs

Performances liées à la phase de planification du geste

- **Temps total pour planifier le geste** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps total de planification de l'opération $F(2,27) = 1.3065$; $p > 0.05$; Figure 104).

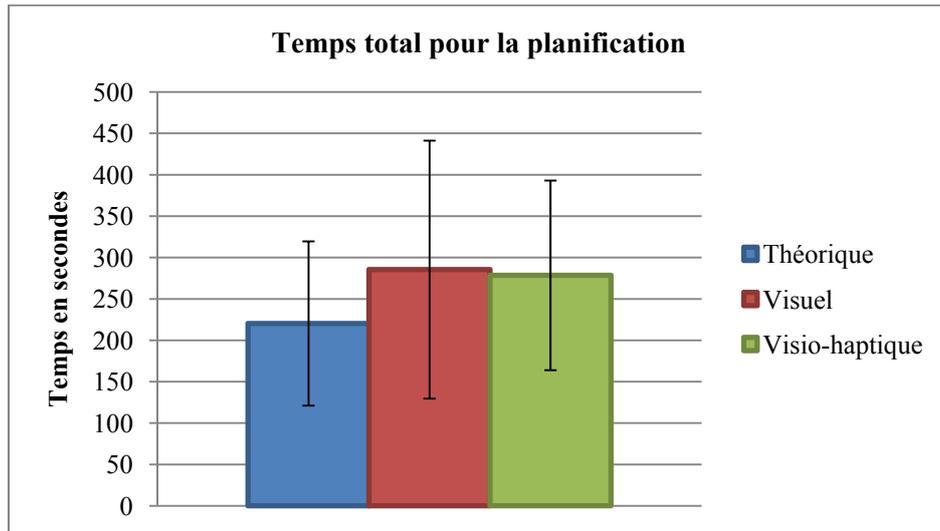


Figure 104 : Durée totale de la planification de l'opération (session de comanipulation)

- **Distance finale moyenne par rapport au centre de la cible** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur la distance moyenne du centre de la cible ($F(2, 27) = 2.0483$; $p > 0.05$; Figure 105).

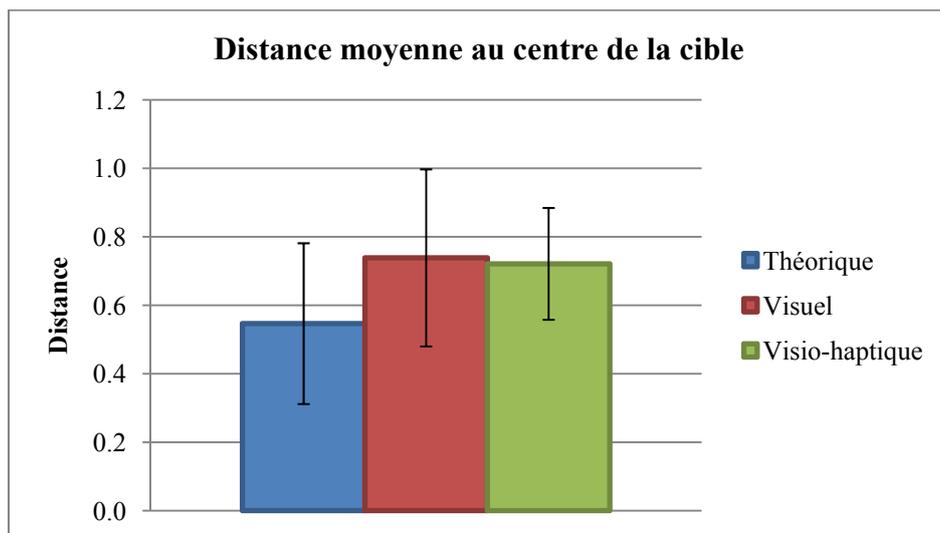


Figure 105 : Distance moyenne du centre de la cible à la fin de l'opération (session de comanipulation)

- **Amplitude de perçage des organes sensibles** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude de perçage des organes sensibles ($F(2, 27) = 0.6420$; $p > 0.05$; Figure 106).

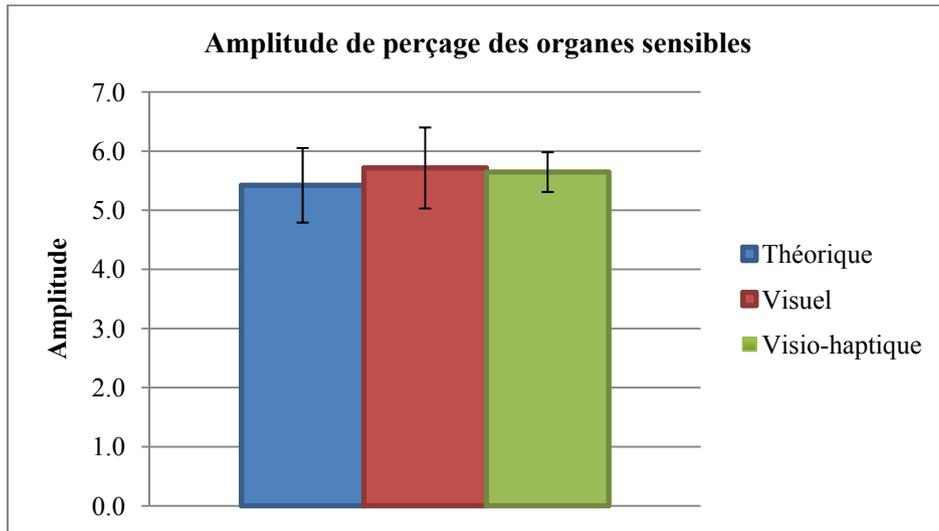


Figure 106 : Amplitude de perçages des organes sensibles (session de comanipulation)

- Nombre total de repères** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre total des repères utilisés ($F(2, 27) = 8.8697$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé moins de points repères que les participants dans la condition AV ($t(18) = 3.9862$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 3.9001$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 0.9762$; $p > 0.05$; Figure 107).

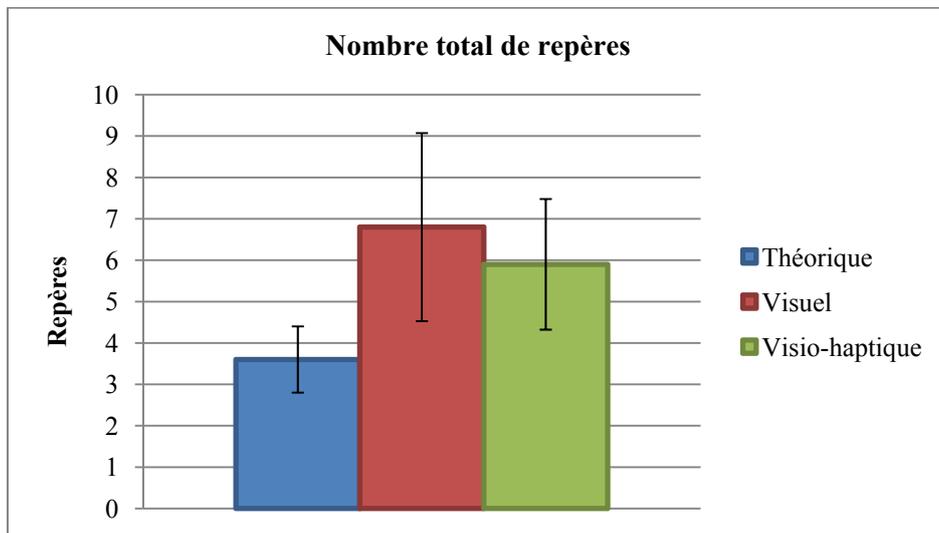


Figure 107 : Nombre total de points repères (session de comanipulation)

- Nombre de repère avant la première insertion** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de repères utilisés avant la première insertion de l'aiguille ($F(2, 27) = 2.3010$; $p > 0.05$; Figure 108).

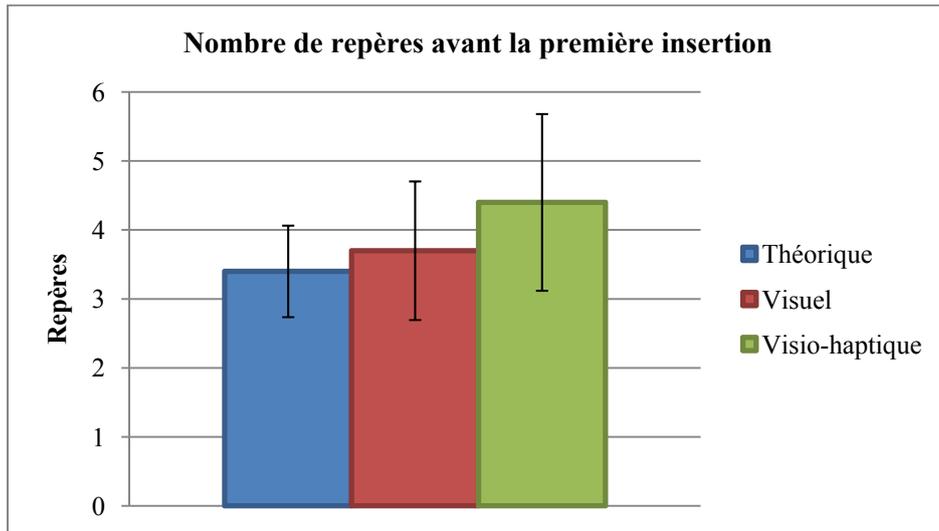


Figure 108 : Nombre de points repères avant la première insertion de l'aiguille (session de comanipulation)

- Nombre de repère supplémentaires** : Les résultats montrent qu'il existe un effet du type d'apprentissage sur le nombre de repères supplémentaires utilisés ($F(2,27) = 10.7491$; $p < 0.05$). Les comparaisons deux à deux montrent que les participants dans la condition AT ont utilisé moins de repères supplémentaires que les participants dans la condition AV ($t(18) = 5.1534$; $p < 0.05$), et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 2.3265$; $p < 0.05$). Aucune différence significative n'a été observée entre les participants dans la condition AV et les participants dans la condition AVH ($t(18) = 0.2589$; $p > 0.05$). Les participants dans la condition AVH ont de leur côté, utilisé moins de repères supplémentaires que les participants dans la condition AV ($t(18) = 2.1596$; $p < 0.05$; Figure 109).

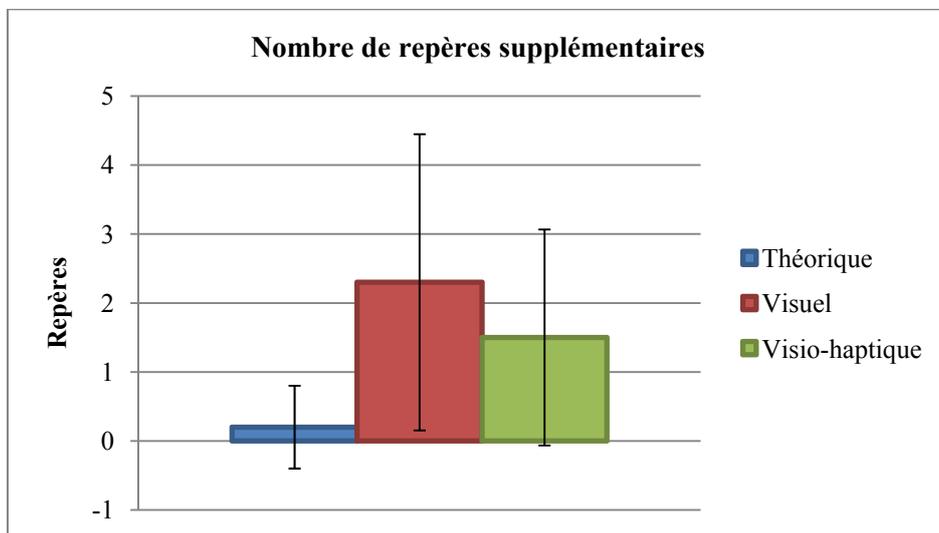


Figure 109 : Nombre de points repères supplémentaires (session de comanipulation)

- Nombre de scanners** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de scanners effectués ($F(2,27) = 0.5868$; $p > 0.05$; Figure 110).

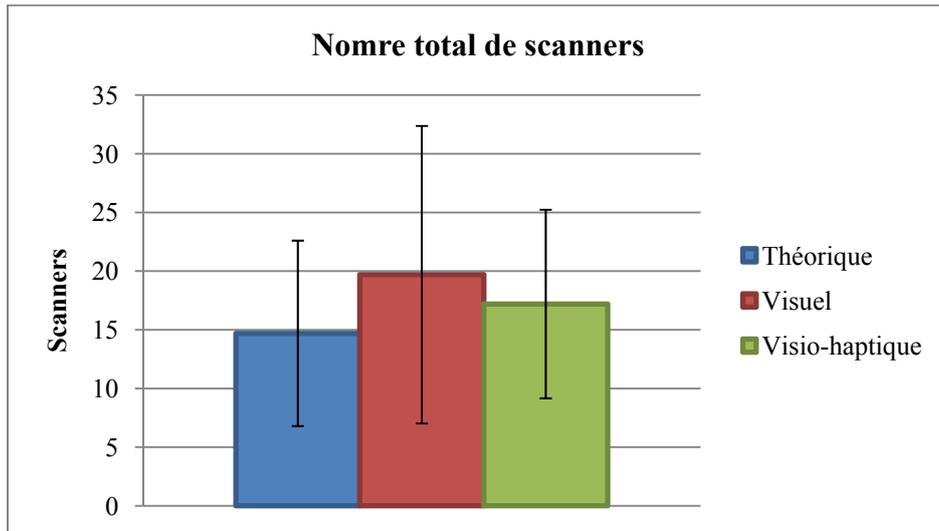


Figure 110 : Nombre de scanners effectués (session de comanipulation)

Performances liées à l'exécution du geste

- **Temps total pour accomplir le geste** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le temps total pour exécuter le geste ($F(2, 27) = 0.5259$; $p > 0.05$; Figure 111).

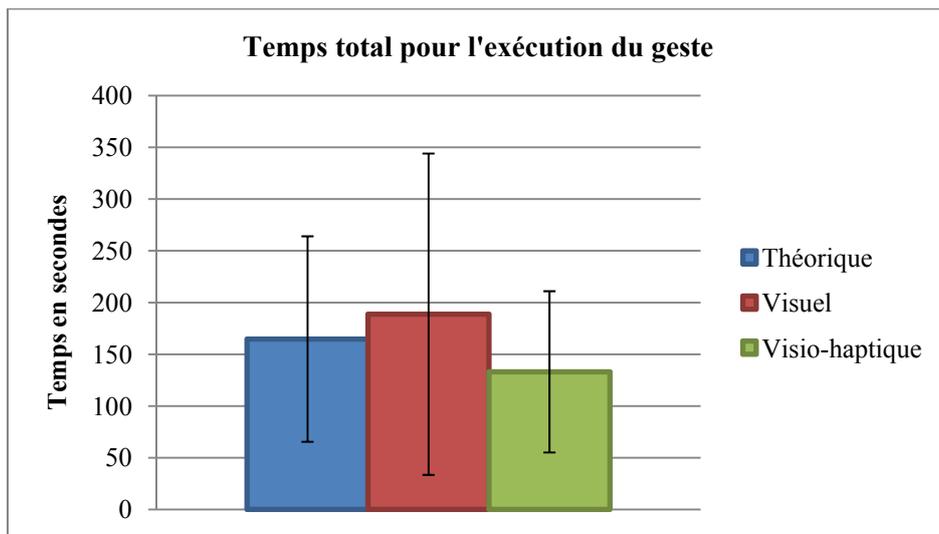


Figure 111 : Durée totale pour l'exécution du geste (session de comanipulation)

- **Contacts avec les organes sensibles** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de contacts avec les organes sensibles ($F(2, 27) = 2.4879$; $p > 0.05$; Figure 112).

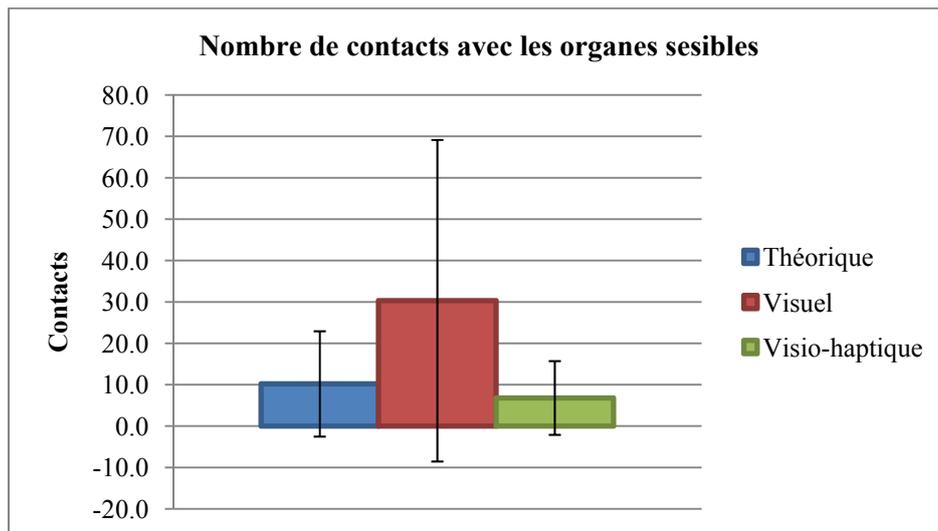


Figure 112 : Nombre de contacts avec les organes sensibles (session de comanipulation)

- **Nombre de gestes d'insertion** : Les résultats montrent qu'il n'existe pas d'effet significatif du type d'apprentissage sur le nombre de gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27) = 0.5403$; $p > 0.05$; Figure 113).

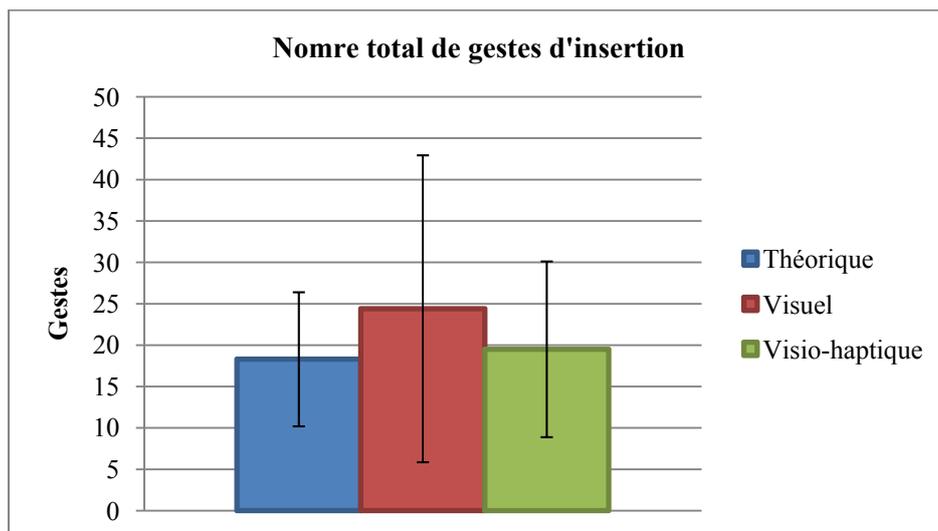


Figure 113 : Nombre total de gestes d'insertion (session de comanipulation)

- **Amplitude moyenne des gestes** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude moyenne des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27) = 0.2553$; $p > 0.05$; Figure 114).

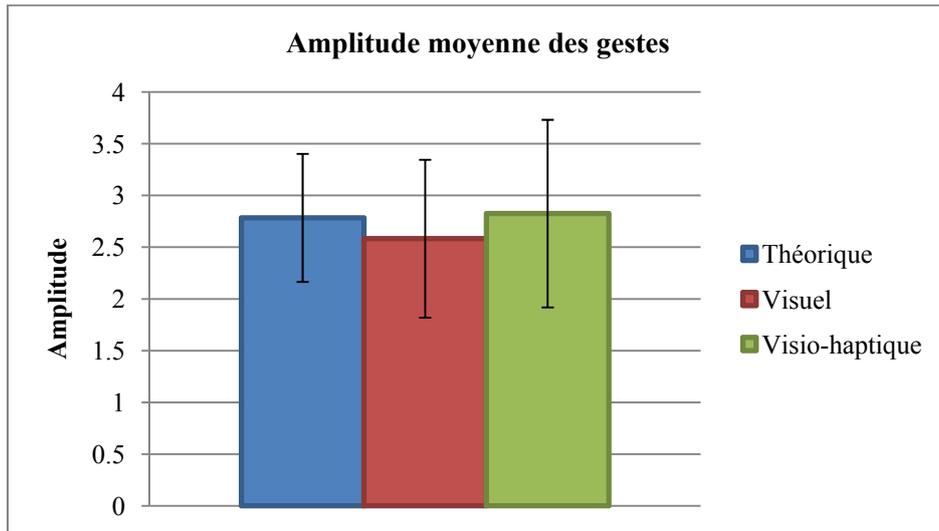


Figure 114 : Amplitude moyenne des gestes d'insertion de l'aiguille (session de comanipulation)

- **Amplitude maximale des gestes** : Les résultats ne montrent aucun effet significatif du type d'apprentissage sur l'amplitude maximale des gestes d'insertion de l'aiguille ($F(2,27)=0.0252$; $p>0.05$; Figure 115).

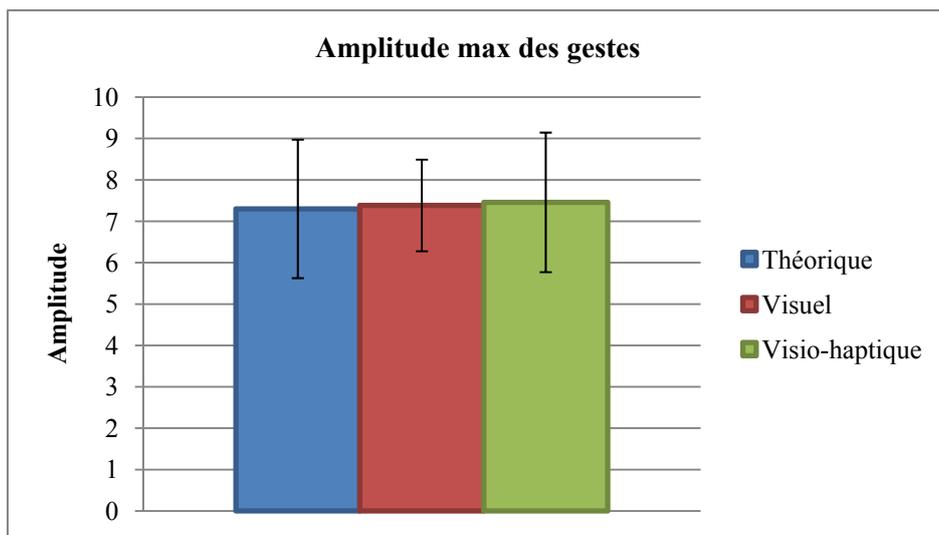


Figure 115 : Amplitude maximale des gestes d'insertion de l'aiguille (session de comanipulation)

2.7.4 *Analyses statistiques des verbalisations*

Utilisation des pronoms

Les participants ont utilisé majoritairement le pronom personnel "je" dans la condition AT et dans la condition AVH (voir le Tableau 18). D'un autre coté, dans la condition AV, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre l'utilisation des pronoms "je" et "on" (voir le Tableau 32).

Conditions	je/tu	je/on	tu/on
<u>AT*</u>	↗ $t(7)=4.58;p<0.05^*$	↗ $t(7)=2.85;p<0.05^*$	$t(7)=0.28;p>0.05$
AV	$t(7)=2.31;p>0.05$	$t(7)=0.25;p>0.05$	$t(7)=1.83;p>0.05$
<u>AVH*</u>	↗ $t(7)=2.94;p<0.05^*$	↗ $t(7)=2.60;p<0.05^*$	$t(7)=0.08;p>0.05$

Tableau 32 : comparaisons statistiques des utilisations des pronoms

Autres verbalisations

- Les connecteurs :
 - *Les connecteurs d'addition* : Les participants ont utilisé davantage les connecteurs d'addition (ensuite, et, ...) dans la condition AV que dans la condition AVH (Tableau 33).

Conditions	AT/AV	AT/AVH	AV/AVH
Comparaisons statistiques	$t(14)=-0.45;p>0.05$	$t(14)=1.74;p>0.05$	↗ $t(14)=-2.20;p<0.05^*$

Tableau 33 : comparaisons statistiques des utilisations des connecteurs d'addition

- Les adjectifs :
 - *Les adjectifs d'objectifs* : Les participants ont utilisé davantage les adjectifs objectifs (transversale, perpendiculaire, jouable, sagittal, droit, direct, dernier, intermédiaire) dans la condition AVH que dans la condition AT (Tableau 34).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Comparaisons statistiques	$t(14)=-1.48;p>0.05$	↘ $t(14)=-2.41;p<0.05^*$	$t(14)=0.58;p>0.05$

Tableau 34 : comparaisons statistiques des utilisations des adjectifs d'objectifs

- Modalisation :
 - *Le lieu* : Les participants ont fait moins de références au lieu (vers là, en haut, jusqu'à ...) dans la condition AVH que dans les deux autres conditions (Tableau 35).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	<u>AV/AVH*</u>
Comparaisons statistiques	$t(14)=-0.96;p>0.05$	↗ $t(14)=1.77;p<0.05^*$	↗ $t(14)=-2.76;p<0.05^*$

Tableau 35 : comparaisons statistiques des références au lieu

- *L'intensité* : Les participants ont davantage fait référence à l'intensité dans la condition AVH (« pas encore », « trop », « plus », « à peu près », « pas assez », « un peu trop »...) que dans la condition AV. On observe aussi une tendance à avoir plus de références dans la condition AVH que dans la condition AT. Cependant, cette tendance n'est pas statistiquement significative (Tableau 36).

Conditions	AT/AV	AT/AVH	<u>AV/AVH*</u>
Comparaisons statistiques	t(14)=1.49; p>0.05	t(14)=-0.57; p>0.05	↘ t(14)=1.92; p<0.05*

Tableau 36 : comparaisons statistiques des références à l'intensité

- Les univers principaux
 - *La perception* : Les participants ont davantage fait référence à la perception (« toucher la veine », « vue », « le rouge ») dans la condition AVH que dans les deux autres conditions (Tableau 37).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	<u>AV/AVH*</u>
Comparaisons statistiques	t(14)=-1.3161; p>0.05	↘ t(14)=2.75; p<0.05*	↘ t(14)=1.75; p<0.05*

Tableau 37 : comparaisons statistiques des références à la perception

- *Les jugements* : Seuls les participants dans la condition AT ont fait référence au jugement (dans ce cas le jugement fait référence à un manque de confiance dans l'autre ; Tableau 38).

Conditions	<u>AT/AV*</u>	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Comparaisons statistiques	↗ t(14)=1.84; p<0.05*	↗ t(14)=1.84; p<0.05*	chacun des deux groupes ayant eu 0 occurrences, la comparaison statistique est impossible

Tableau 38 : comparaisons statistiques des références au jugement

- Références au corps
 - *Les organes* : Les participants ont davantage fait référence aux organes dans la condition AVH que les participants dans la condition AT (Tableau 39).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Comparaisons statistiques	t(14)=-1.29; p>0.05	↘ t(14)=-1.98; p<0.05*	t(14)=0.90; p>0.05

Tableau 39 : comparaisons statistiques des références aux organes

- Localisation/espace
 - *Dimension* : Seuls les participants dans la condition AT ont fait référence aux notions de dimensions (profondeur, longueur, hauteur ; Tableau 40).

Conditions	<u>AT/AV*</u>	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Comparaisons statistiques	↗ $t(14)=2.89; p<0.05^*$	↗ $t(14)=2.89; p<0.05^*$	chacun des deux groupes ayant eu 0 occurrences, la comparaison statistique est impossible

Tableau 40 : comparaisons statistiques des références aux notions de dimensions

- *Droite/gauche* : Les participants dans la condition AV ont fait davantage de références à la droite/gauche que les participants dans la condition AT. On observe aussi une tendance à avoir plus de références gauche/droite dans la condition AVH que dans la condition AT. Cependant, cette tendance n'est pas statistiquement significative (Tableau 41).

Conditions	<u>AT/AV*</u>	AT/AVH	AV/AVH
Comparaisons statistiques	↘ $t(14)=-2.17; p<0.05^*$	$t(14)=-1.56; p>0.05$	$t(14)=-0.63; p>0.05$

Tableau 41 : comparaisons statistiques des références aux directions droite/gauche

- Repères
 - *Aiguille* : Les participants ont fait davantage de références à l'aiguille dans la condition AT que dans les deux autres conditions (Tableau 42).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Comparaisons statistiques	$t(14)=-1.83; p>0.05$	↗ $t(14)=3.10; p<0.05^*$	$t(14)=0.39; p>0.05$

Tableau 42 : comparaisons statistiques des références à l'aiguille

- *Toucher* : Les références au toucher ont uniquement été observées dans la condition AVH. Une différence statistiquement significative est donc observée avec les deux autres conditions (Tableau 43).

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	<u>AV/AVH*</u>
Comparaisons statistiques	aucun des deux groupes n'ayant eu d'occurrence, la comparaison statistique est impossible	↘ $t(14)=2.00; p<0.05^*$	↘ $t(14)=2.00; p<0.05^*$

Tableau 43 : comparaisons statistiques des références au toucher

2.7.5 Analyses statistiques des questionnaires

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	AV/AVH
Présence dans l'EV	t(36)=1.27; p>0.05	t(44)=-1.29; p>0.05	t(38)=0.24; p>0.05
Perception du monde réel	t(36)=0.83; p>0.05	t(44)=-0.12; p>0.05	t(38)=0.93; p>0.05
<u>La qualité perçue de l'EV*</u>	t(36)=-0.56; p>0.05	↘ t(44)=1.82; p<0.05*	t(38)=0.86; p>0.05
Plaisir d'utilisation de l'EV	t(36)=0.82; p>0.05	t(44)=0.21; p>0.05	t(38)=1.15; p>0.05

Tableau 44 : comparaisons statistiques des réponses au questionnaire sur la présence

Conditions	AT/AV	<u>AT/AVH*</u>	<u>AV/AVH*</u>
<u>Compréhension mutuelle*</u>	t(36)=0.69; p>0.05	t(44)=1.52; p>0.05	↘ t(38)=1.85; p<0.05 *
Sentiment de réalisation commune de la tâche	t(36)=0.74; p>0.05	t(44)=1.01; p>0.05	t(38)=1.63; p>0.05
Sentiment d'entre-aide	t(36)=0.63; p>0.05	t(44)=0.58; p>0.05	t(38)=1.18; p>0.05
Le sentiment de plaisir de travailler en Collaboration	t(36)=-0.37; p>0.05	t(44)=0.75; p>0.05	t(38)=0.22; p>0.05
<u>Coprésence*</u>	t(36)=0.57; p>0.05	↘ t(44)=3.13; p<0.05*	↘ t(38)=2.84; p<0.05*

Tableau 45 : comparaisons statistiques des réponses au questionnaire sur la coprésence

2.8 Questionnaires sur la présence et la coprésence

Voici les questionnaires auxquels les participants devaient répondre après les sessions expérimentales :

1^{ère} Partie

1- Les exercices vous ont-ils semblés faciles à réaliser ?

Oui

Oui une fois passée la période d'apprentissage

Non même après la période d'apprentissage

2- Les différents boutons de commande de l'interface vous ont-ils semblés faciles à utiliser ?

Oui

Non

3- Le bras haptique vous a-t-il semblé facile à utiliser ?

Oui

Non

3- Vous était-il facile de vous représenter les actions à effectuer avec le bras haptique en ce qui concerne :

l'orientation de l'aiguille :

Oui

Non

la pression à exercer sur l'aiguille :

Oui

Non

La gestion de la profondeur à laquelle il fallait enfoncer l'aiguille :

Oui

Non

4- L'interface visuelle était-elle facile à comprendre ?

Oui

Non

5- Pouvez-vous imaginer les actions à effectuer :

Facilement ?

Difficilement ?

Si vous avez répondu « Difficilement » précisez ce qui vous a gêné :

6- Pour contrôler l'orientation de l'aiguille vous utilisiez plutôt :

Sa position visuelle à l'écran

L'orientation de votre main pendant que vous teniez le stylo haptique

Les deux

Autres (Précisez)

2^{ème} Partie

7- Durant les exercices aviez-vous la sensation d'enfoncer réellement une aiguille dans un corps ?

Oui

Non

Précisez pourquoi :

8- Durant les exercices aviez-vous la sensation d'être dans une situation proche de la réalité?

Oui

Non

Précisez pourquoi :

Répondez aux questions suivantes sur une échelle de 1 à 5 : 1=nul, 2=faible, 3=moyen, 4= fort, 5=très fort

Pendant que vous faisiez seul les exercices de ponction :

9- comment était votre sensation « d'être là» dans l'environnement virtuel?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

10- comment était votre perception (conscience) de l'environnement réel (bruits, autres personnes présentes, mobilier,...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

11- comment noteriez-vous votre distractibilité par des bruits ou événements survenus dans le monde réel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

12- comment vous apparaissait le réalisme de l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

13- quel niveau de confort avez-vous ressenti dans l' l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

14-quel niveau de plaisir avez-vous ressenti à utiliser l' l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

15- comment noteriez-vous le réalisme de la main virtuelle ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

16- comment noteriez-vous l'utilité de la main virtuelle pour vous représenter les actions à effectuer ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

17- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que la main virtuelle était votre propre main ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

18- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement de la main virtuelle ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

19- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement du bras haptique ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

20- comment était la réactivité de l'environnement virtuel suite à vos actions ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

21- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que vos mouvements dans l'Environnement Virtuel étaient naturels ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

22- Aviez vous conscience des différents outils de contrôle de vos actions dans l'Environnement Virtuel (bras haptique, pad, souris etc...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

23- comment noteriez-vous votre sentiment de désorientation dans l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

3^{ème} Partie

Répondez aux questions suivantes sur une échelle de 1 à 5 : 1=nul, 2=faible, 3=bon, 4= très bon, 5=excellent

Pendant que vous faisiez à deux les exercices de ponction en co-planification :

24- comment était votre sensation « d'être là» dans l'environnement virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

25- comment était votre perception (conscience) de l'environnement réel (bruits, autres personnes présentes, mobilier,...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

26- comment noteriez-vous votre distractibilité par des bruits ou événements survenus dans le monde réel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

27- quel niveau de confort avez-vous ressenti dans l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

28-quel niveau de plaisir avez-vous ressenti à utiliser l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

29- comment noteriez-vous l'utilité de la main virtuelle pour se représenter les actions à effectuer ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

30- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que la main virtuelle était votre propre main ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

31- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement de la main virtuelle ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

32- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement du bras haptique ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

33- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre partenaire était présent avec vous dans le monde réel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

34- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre partenaire était présent avec vous dans l'Environnement Virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

35- comment avez-vous perçue la communication avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

36- comment avez-vous perçue la différence entre vos actions et celles de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

37- comment était le niveau de compréhension entre vous et votre partenaire concernant les actions à effectuer dans l'EV ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

38- comment était votre compréhension des actions de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

39- Comment était la compréhension de votre partenaire concernant vos propres actions ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

40- comment était votre sentiment de contrôle de la situation ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

41- comment était votre sentiment que votre partenaire contrôlait la situation ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

42- comment était votre sentiment de collaborer véritablement avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

43- comment jugeriez-vous le plaisir que vous avez eu à effectuer la tâche avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

44- comment était votre sentiment que vos actions étaient dépendantes de celles de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

45- comment était votre sentiment que votre partenaire essayait de vous aider ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

46- comment était votre sentiment d'aider votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

47- comment était la réactivité de l'environnement virtuel suite à vos actions ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

48- comment noteriez-vous le niveau de conscience que vous aviez des différents outils de contrôle de vos actions dans l'environnement virtuel (bras haptique, pad, souris etc...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

49- comment noteriez-vous votre sentiment de désorientation dans l'EV

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

49-b- Quel plaisir avez-vous ressenti en effectuant les exercices en co-planification par rapport aux exercices individuels (nul=préférence pour les exercices individuels, très fort=préférence pour les exercices en coplanification) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

4^{ème} Partie

Pendant que vous faisiez à deux les exercices de ponction en co-manipulation :

50- comment était votre sensation « d'être là » dans l'environnement virtuel?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

51- comment était votre perception (conscience) de l'environnement réel (bruits, autres personnes présentes, mobilier,...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

52- comment noteriez-vous votre distractibilité par des bruits ou événements survenus dans le monde réel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

53- quel niveau de confort avez-vous ressenti dans l'environnement virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

54-quel niveau de plaisir avez-vous ressenti à utiliser l'environnement virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

55- comment noteriez-vous l'utilité de la main virtuelle pour se représenter les actions à effectuer ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

56- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que la main virtuelle était votre propre main ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

57- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement de la main virtuelle ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

58- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre main se situait spatialement à l'emplacement du bras haptique ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

59- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre partenaire était présent avec vous dans le monde réel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

60- comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que votre partenaire était présent avec vous dans l'environnement virtuel ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

61- comment avez-vous perçu la communication avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

62- comment avez-vous perçu la différence entre vos actions et celles de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

63- comment était le niveau de compréhension entre vous et votre partenaire concernant les actions à effectuer dans l'environnement virtuel?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

64- comment était votre compréhension des actions de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

65- Comment était la compréhension de votre partenaire concernant vos propres actions ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

66- comment était votre sentiment de contrôle de la situation ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

67- comment était votre sentiment que votre partenaire contrôlait la situation ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

68- comment était votre sentiment de collaborer véritablement avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

69- comment jugeriez-vous le plaisir que vous avez eu à effectuer la tâche avec votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

70- comment était votre sentiment que vos actions étaient dépendantes de celles de votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

71- comment était votre sentiment que votre partenaire essayait de vous aider ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

72- comment était votre sentiment d'aider votre partenaire ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

73- comment était la réactivité de l'environnement virtuel suite à vos actions ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

74- comment noteriez-vous le niveau de conscience que vous aviez des différents outils de contrôle de vos actions dans l'environnement virtuel (bras haptique, pad, souris etc...) ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

75- comment noteriez-vous votre sentiment de désorientation dans l'EV

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

76- Quel plaisir avez-vous ressenti en effectuant les exercices en co-manipulation par rapport aux exercices individuels ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

77- Quel plaisir avez-vous ressenti en effectuant les exercices en comanipulation par rapport aux exercices en coplanification ?

Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort

Étude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.

Résumé : Les environnements virtuels collaboratifs sont des espaces 3D permettant à plusieurs utilisateurs de travailler ensemble pour réaliser une tâche commune. Pour concevoir de tels environnements, qui supportent les interactions homme-homme, il est important d'étudier comment les hommes développent un référentiel commun pour collaborer.

Notre travail a consisté à explorer la notion de référentiel commun sur laquelle s'appuie toute activité collaborative. Cette notion favorise la compréhension mutuelle des tâches communes entre partenaires à travers un échange permanent d'informations, explicites et implicites. L'objectif de ce travail a donc été de faciliter et d'enrichir l'activité d'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs en tirant parti des caractéristiques de ces derniers. En effet, la conception des éléments liés au référentiel commun (mode de communication, construction de l'environnement et interactions) est primordiale pour assurer le fonctionnement collaboratif de l'activité. Deux études expérimentales ont été réalisées autour de deux situations concrètes. La première étude montre que l'ajout d'indices visuels permet d'améliorer l'élaboration du référentiel commun dans le cadre d'une tâche de manipulation d'objets. La deuxième étude montre que la communication haptique permet d'améliorer la construction du référentiel commun autour d'une tâche d'apprentissage d'un geste technique.

Ces résultats contribuent à donner des recommandations pour la conception d'environnement virtuel qui supportent la collaboration. Ceci est une première étape dans la définition d'une méthodologie de conception pour ce type de systèmes.

Mots clés : Environnements virtuels, Collaboration homme-homme, Référentiel commun, Communication haptique, Interaction homme machine, TCAO synchrone, Réalité virtuelle.

A study on human-human interactions for common frame of reference development within Collaborative virtual environments.

Abstract : Collaborative virtual environments are 3D spaces that allow multiple users to work together on a common task. To design such environments to support human-human interactions, it is important to study how people develop a common frame of reference during collaboration. The concept of common frame of reference is central to all collaborative activities. It allows partners to understand each other through a continuous exchange of information (explicit and implicit). The ultimate goal of this research is to facilitate and enrich the construction of common frame of reference to accommodate specific collaborative virtual environments characteristics. Indeed, the design elements related to the common frame of reference (i.e. communication modes, environment's construction and interactions) are essential for successful collaborative activity. Two experimental studies were conducted using different collaborative virtual environments conditions. The first study shows that adding fixed landmarks can improve the development of common frame of reference within an objects manipulation task. The second study shows that haptic communication can improve the construction of the common frame of reference in a technical gesture learning task.

These results are used to provide recommendations for collaborative virtual environments design. It represents a first step towards the development of a standardized collaborative virtual environments design methodology.

Key words: Virtual environments, Human-human collaboration, Common frame of reference, haptic communication, Human-computer interaction, CSCW, Virtual reality.