



Faculté de Psychologie et des Sciences de l'éducation

Dissertation présentée par Adélaïde Blavier
En vue de l'obtention du titre de Docteur en Psychologie

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

Soutenue le 22 mai 2006, devant un jury composé de :

Véronique DE KEYSER	Professeur à l'Université de Liège Directeur de Thèse
Anne-Sophie NYSSSEN	Chargée de Cours à l'Université de Liège Directeur de Thèse
Thierry MEULEMANS	Professeur à l'Université de Liège
Guy-Bernard CADIÈRE	Professeur à l'Université libre de Bruxelles
Michel DEGUELDRE	Professeur à l'Université libre de Bruxelles
Jean PAILHOUS	Directeur de recherche CNRS à l'Institut de Neurosciences cognitives de la Méditerranée

Remerciements

Au terme de ce travail, c'est avec beaucoup de plaisir que je peux exprimer de chaleureux remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté aide et soutien au cours de la réalisation de cette thèse.

Tout d'abord, je remercie le professeur Véronique De Keyser pour la confiance qu'elle m'a accordée, en me confiant cette recherche, mais aussi en me témoignant un soutien indéfectible. Elle a toujours su se montrer disponible, malgré un emploi du temps très chargé, et a toujours marqué un intérêt soutenu pour mon travail.

Qu'Anne-Sophie Nyssen soit également chaleureusement remerciée : pour sa guidance avisée au quotidien, pour ses réflexions enrichissantes et ses commentaires structurants. Elle m'a ouvert les portes de l'ergonomie et a porté tous les jours ce travail.

Mes remerciements vont également au professeur Thierry Meulemans, membre de mon comité d'accompagnement de thèse, qui me suit dans mes recherches depuis mon mémoire de licence. Son enthousiasme et son attitude positive et ouverte m'ont encouragée et inspirée à divers égards.

Je remercie aussi les professeurs Guy-Bernard Cadière et Michel Degueldre, qui m'ont permis de réaliser les études et observations au CHU St-Pierre de Bruxelles. Je les remercie également d'avoir accepté d'être lecteurs de ma thèse. Je suis en outre très reconnaissante à Jean Pailhous pour sa présence dans le jury de cette thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements aux personnes qui m'ont aidée dans la mise en place de mes conditions expérimentales au sein du bloc opératoire et particulièrement David Douglas et Olivier Germy. Mes remerciements vont aussi à Quentin Gaudissart pour la réflexion que nous menons ensemble sur la problématique de la chirurgie robotique. Je remercie les étudiants stagiaires du laboratoire d'ergonomie cognitive : Olivier, Marie-Lucienne et Thérèse, qui m'ont accompagnée à Bruxelles pour recueillir les données présentées dans ce travail. Que tous les chirurgiens et étudiants en médecine qui ont participé aux expériences soient remerciés pour leur collaboration active.

Il m'importe également de remercier le Fonds National de la Recherche Scientifique pour la bourse de doctorat qu'il m'a octroyée et qui m'a permis de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions. Je remercie également les firmes médicales qui m'ont généreusement prêté le matériel nécessaire à mes investigations (Ethicon, Storz), ainsi que William Andersen d'Essilor pour l'intérêt porté à notre recherche.

Je remercie de tout cœur mes collègues pour leurs gestes d'encouragement et leur soutien à la fois moral et logistique.

Enfin, je souhaite particulièrement remercier ma famille, mes amis et surtout Alexis, sans qui rien n'aurait été possible.

A notre future fille,
Qui aura vécu de très près la rédaction et la finalisation de ce manuscrit.

TABLE DES MATIERES

PARTIE I : INTRODUCTION GENERALE	6
PARTIE II : REPERES THEORIQUES	10
CHAPITRE I.....	11
LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR.....	11
1 <i>Les indices de profondeur</i>	11
1.1 Indices binoculaires.....	11
1.2 Indices monoculaires.....	14
1.3 Relation entre indices binoculaires et monoculaires.....	18
1.4 Résumé et conclusion.....	22
2 <i>Rôle de l'environnement</i>	22
3 <i>Autres facteurs intervenant dans la perception de la profondeur</i>	25
4 <i>Développement de la perception de la profondeur</i>	26
5 <i>Les différences individuelles dans la perception de la profondeur</i>	27
6 <i>Lien entre les différents sens : la vision et le toucher</i>	27
6.1 Nos sens déterminent-ils la nature de la perception ?.....	28
6.2 Lien vision – toucher.....	29
7 <i>Conclusion</i>	31
CHAPITRE II.....	32
LES DIFFERENTES APPROCHES DE L'ETUDE DE LA PERCEPTION VISUELLE	32
1 <i>L'approche du traitement de l'information : le Modèle de Marr</i>	32
2 <i>L'approche écologique</i>	34
3 <i>L'approche des deux systèmes visuels séparés</i>	36
4 <i>L'approche constructiviste</i>	40
5 <i>Rôle de l'influence des processus ascendants et descendants sur la perception de la profondeur</i>	42
6 <i>Conclusion</i>	42
CHAPITRE III L'UTILISATION DE L'INSTRUMENT ET L'EXPERTISE.....	44
1 <i>La notion d'instrument</i>	44
2 <i>Les caractéristiques de l'expertise</i>	47
2.1 Définition du concept d'expertise.....	47
2.2 Les différences novices – experts	49
2.3 Les métaconnaissances dans le processus d'expertise	50
3 <i>L'acquisition d'habiletés motrices et la mémoire procédurale</i>	51
3.1 Distinction entre connaissances procédurales et connaissances déclaratives	52
3.2 Fonctionnement de la mémoire procédurale et acquisition des habiletés motrices.....	52
3.3 Méthodes d'investigation des connaissances procédurales et des habiletés motrices.....	55
3.4 Rôle du feedback proprioceptif dans l'acquisition des habiletés motrices	57
4 <i>Conclusion</i>	59

CHAPITRE IV	CONTEXTE D'ETUDE : LA CHIRURGIE MINIMALE INVASIVE	60
1	<i>L'évolution technologique : buts et conséquences</i>	60
2	<i>Evolutions technologiques en chirurgie</i>	61
2.1	La chirurgie minimale invasive, une révolution technologique dans les salles d'opération	62
2.2	La chirurgie robotique	69
2.3	Conclusion	75
3	<i>La perception de la profondeur dans les procédures MIS</i>	77
4	<i>Conclusion</i>	79
CHAPITRE V		80
ASPECTS METHODOLOGIQUES		80
1	<i>Méthodes d'investigation de la perception de la profondeur</i>	80
1.1	La vision monoculaire comme perturbation de la fonction visuelle	80
1.2	Paradigmes d'étude de la perception de la profondeur	81
2	<i>La chirurgie minimale invasive : Approche méthodologique</i>	89
2.1	Analogies et apports par rapport aux études classiques de psychologie cognitive	89
2.2	La nécessité de la simulation en chirurgie minimale invasive	90
2.3	La définition de la compétence chirurgicale	94
2.4	La tâche ou activité étudiée	95
2.5	Le type de mesure	96
3	<i>Conclusions</i>	101
PARTIE III	: HYPOTHESES ET ASPECTS METHODOLOGIQUES	102
PARTIE IV	: PARTIE EXPERIMENTALE	109
ÉTUDE EXPLORATOIRE		110
1	<i>Introduction</i>	111
2	<i>Materials and methods</i>	112
3	<i>Results</i>	113
4	<i>Discussion</i>	113
ETUDE 1		115
TACHES DE COMPLEXITE CROISSANTE CHEZ DES SUJETS NOVICES		115
1	<i>Introduction</i>	116
2	<i>Materials and methods</i>	117
3	<i>Procedure</i>	118
4	<i>Tasks</i>	119
5	<i>Statistical analysis</i>	122
6	<i>Results</i>	123
7	<i>Discussion</i>	128
7.1	Discussion of the familiarisation phase	128
7.2	Discussion of the tasks of increasing complexity	129
7.3	Discussion of the technical switch	131
8	<i>General conclusion</i>	132

ETUDE 2	133
TACHES DE COMPLEXITE CROISSANTE CHEZ DES SUJETS EXPERTS.....	133
1 <i>Introduction</i>	134
2 <i>Méthodologie</i>	135
3 <i>Résultats</i>	136
4 <i>Discussion</i>	141
4.1 Phase de familiarisation.....	141
4.2 Tâches de complexité croissante.....	142
5 <i>Conclusions</i>	144
 ETUDE 3	 145
COURBES D'APPRENTISSAGE AVEC DES SUJETS NOVICES	145
1 <i>Introduction</i>	148
2 <i>Methods</i>	149
3 <i>Results</i>	152
4 <i>DISCUSSION</i>	157
4.1 First phase: learning curves.....	157
4.2 Second phase: perceptive switch	158
4.3 Third phase: technical switch	158
5 <i>General conclusion</i>	159
 ETUDE 4	 161
LA QUALITE DU GESTE ET SON EVOLUTION EN FONCTION DES DIMENSIONS PERCEPTIVE ET INSTRUMENTALE.....	161
1 <i>Introduction</i>	162
2 <i>Méthodologie</i>	162
3 <i>Résultats</i>	166
4 <i>Discussion</i>	171
4.1 Evolution des performances	171
4.2 Les deux composantes du mouvement.....	173
4.3 Les erreurs de manipulation	173
4.4 Utilité des erreurs de distance dans la perception de la profondeur	174
5 <i>Conclusion</i>	175
6 <i>ANNEXE : Cas particulier de la laparoscopie classique en vue directe</i>	176
 ETUDE 5	 178
ETUDES DE TERRAIN	178
1 <i>Introduction</i>	179
2 <i>Méthodologie générale</i>	181
3 <i>Première étude de terrain</i>	184
3.1 <i>Méthodologie</i>	184
3.2 <i>Résultats</i>	185
3.3 <i>Discussion</i>	186
4 <i>Seconde étude de terrain : L'expertise en chirurgie robotique</i>	189
4.1 Description du contexte et de la procédure opératoire pour les reperméabilisations tubaires.....	189
4.2 Hypothèses.....	190
4.3 <i>Méthodologie</i>	190
4.4 <i>Résultats</i>	191
4.5 <i>Discussion</i>	193

4.6	Conclusions	195
5	Conclusion.....	197
PARTIE V : DISCUSSION GENERALE		199
1	<i>Rappel du cadre théorique</i>	200
2	<i>Résumé des résultats</i>	202
3	<i>Implications théoriques et pratiques de nos résultats</i>	206
3.1	Le rôle de la complexité des tâches dans les différences entre la vision 2D et 3D.....	206
3.2	Le rôle de la dimension instrumentale	209
3.3	Rôle de l'expertise	213
3.4	Les impressions subjectives des sujets.....	219
3.5	Le robot chirurgical comme outil de formation ?.....	221
4	<i>Résumé et conclusion des implications de nos résultats</i>	224
5	<i>Limites et perspectives de notre étude</i>	225
5.1	Ecologie des tâches	225
5.2	Les facteurs subjectifs et de personnalité	226
5.3	L'influence des troubles perceptifs et les différences individuelles	227
5.4	La dimension collective du travail.....	227
5.5	Généralisation des résultats	228
PARTIE VI : CONCLUSION GENERALE		230
BIBLIOGRAPHIE		233
ANNEXES		259

PARTIE I : INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

a) Nécessité d'étudier les implications ergonomiques et théoriques des nouvelles technologies

L'intrusion de la technologie dans toutes les sphères de l'activité humaine est une dimension sans cesse plus prégnante et qui apparaît comme irréversible. La question actuelle n'est désormais plus de savoir si cette immixtion de la composante technique doit être combattue ou encouragée ; le véritable défi est de ne pas subir cette évolution technologique sans prendre la peine de la mettre en perspective et d'en analyser minutieusement les bénéfices éventuels, ainsi que son incidence sur l'organisation du travail.

Le domaine médical est un de ceux dans lesquels les mutations technologiques sont les plus rapides. Mais, comme dans d'autres sphères d'activités, les pressions commerciales y sont très lourdes et les bénéfices immédiats des instruments modernes pour les patients ont volontiers médiatisé certains aspects ergonomiques essentiels, comme les risques nouveaux que ces techniques pouvaient induire ; de manière moins dramatique, les adaptations qui devaient être apportées au *modus operandi* classiquement appliqué en salle d'opération n'ont tout simplement pas été envisagées. En effet, la vaste littérature qui s'est développée dans le domaine médical sur le thème de la MIS (*minimal invasive surgery*) n'envisage que les seuls aspects cliniques.

Pourtant, ces nouvelles technologies n'ont pas qu'une influence sur l'organisation du travail ; en s'insérant entre l'opérateur et la tâche que celui-ci exécute, ces techniques modifient le processus qui conduit vers l'action. Ces variations sont intéressantes, car elles peuvent être pleines d'enseignements sur ce processus, problème qui est cœur de la psychologie cognitive. Ainsi, ces nouvelles technologies peuvent devenir un support d'investigation théorique particulièrement riche (Huber, Taffinder, Russell & Darzi, 2003 ; Satava & Ellis, 1994).

Depuis 2000, a été introduit dans les salles d'opération un système robotique permettant l'appréhension en vision 3D du champ opératoire, qui couplait à ces avantages perceptifs une facilité de manipulation remarquable. Le robot est de plus en plus couramment utilisé : si une littérature assez abondante interroge les bénéfices qu'il induit pour les patients, on n'a pas envisagé de manière approfondie les modifications que son usage a imposées dans l'organisation du travail en salle d'opération ; on doit encore évaluer son intérêt pour la formation des chirurgiens ; enfin, le robot est un outil

précieux pour mesurer l'importance des dimensions perceptives (3D-2D) sur l'action des chirurgiens. Notre travail se propose de combler partiellement ces manques, en investiguant les dimensions énoncées ci-dessus.

Notre recherche se situe donc à la croisée des chemins de la psychologie cognitive et de la psychologie du travail, dans cette discipline que l'on appelle l'ergonomie cognitive : celle-ci se donne pour mission d'étudier les processus cognitifs mis en œuvre chez l'homme dans des situations naturelles et complexes. Elle s'inscrit dans le paradigme de recherche de la cognition située qui, à travers des études de terrain, a mis l'accent sur les interactions entre la perception et l'action (Nardi, 1996). L'intérêt de ces études en situation réelle est de procurer des feedbacks qui sont le plus proche possible de la réalité complexe, ce qui, dans un second temps, permet de développer des modèles théoriques affinés et moins réducteurs qui ont aussi des applications pratiques (Ericsson, 1995).

Notre objectif est donc double : comprendre la nature des processus moteurs qui sous-tendent le contrôle des instruments en chirurgie, afin d'améliorer notre connaissance des procédures chirurgicales et de leur apprentissage ; mettre en avant l'intérêt théorique que de telles découvertes peuvent induire pour la compréhension du fonctionnement humain (Brydges, Carnahan & Dubrowski, 2005) : les dimensions théoriques et pratiques sont donc intimement liées.

b) Le Robot Da Vinci : avantages présumés et questions théoriques que posent ces « avantages »

La plus ancienne des pratiques utilisées en chirurgie est évidemment la chirurgie ouverte qui permet naturellement une vue en 3D du champ opératoire. Depuis le début de la dernière décennie, une nouvelle technique est apparue dans le domaine chirurgical : la laparoscopie, où le feedback pour le chirurgien est obtenu à partir d'images en 2D visibles sur un écran. La laparoscopie présente de très grands bénéfices qui seront expliqués dans notre travail ; elle comporte toutefois d'importants inconvénients, particulièrement dans le degré de liberté de mouvement offert au chirurgien.

Le système robotique Da Vinci, qui sera l'objet de notre étude, présente deux importantes nouveautés : il combine la vue 3D, habituellement réservée à la chirurgie ouverte, à certains avantages techniques (limitation du tremblement, utilisation d'une caméra qui offre une vue très détaillée de la zone à opérer, etc.).

Ce sont donc ces deux aspects, propres au système robotique, qui serviront de point de départ à notre interrogation :

1° L'augmentation de la qualité visuelle (la 3D) a-t-elle réellement une incidence sur la performance chirurgicale ? Si oui, pourquoi ?

2° Si la dimension perceptive (l'impact de la 3D) a une influence sur l'action chirurgicale, cette influence est-elle identique chez tous les sujets et dans les mêmes circonstances ? N'est-elle pas plutôt variable selon l'influence de certains facteurs contextuels ?

En d'autres termes, nous devons évaluer si la dimension perceptive nouvelle offerte par le robot est réellement avantageuse. Puisque les spécificités du robot sont, d'une part qu'il offre une vision en 3D, d'autre part, qu'il présente une facilité de manipulation remarquable, il importe de savoir dans quelle mesure chacune de ces caractéristiques est susceptible d'améliorer la performance des chirurgiens. En outre, nous étudierons l'influence des facteurs contextuels, que sont l'expertise des sujets et la complexité des tâches, sur les apports que peuvent offrir le système robotique. L'étude de ces facteurs contextuels enrichira considérablement notre travail puisqu'elle nous permettra d'affiner nos conclusions sur les bénéfices du robot.

c) Notre plan

Pour mener à bien cette étude, nous commencerons par rappeler la théorie relative aux facteurs perceptifs. Par rapport à la laparoscopie classique, le robot offre au chirurgien le bénéfice des indices binoculaires (3D) : il était donc indispensable de rappeler au lecteur les théories de la vision et du traitement de l'information. Mais ces facteurs perceptifs n'interviennent pas dans un environnement vierge de toute autre influence : le chirurgien, en particulier, s'est construit une pratique : c'est pourquoi notre intérêt se portera ensuite sur la définition de l'expertise et les modèles qui l'expliquent traditionnellement. Nous développerons également dans cette partie la notion d'instrument ; les modifications technologiques rendent désormais une théorisation de l'instrument indispensable. Enfin, nous décrirons en détail le contexte de notre étude : la chirurgie minimale invasive, où nous détaillerons les caractéristiques du robot et de la laparoscopie classique. La partie théorique sera clôturée par une présentation des aspects méthodologiques adoptés dans notre partie expérimentale.

Après cette large introduction théorique, la seconde partie sera consacrée aux études expérimentales et aux observations de terrain que nous avons réalisées en vue d'apporter des éléments de réponse à l'apport du système robotique en termes de formation et d'application en situation réelle.

Dans la troisième et dernière partie, nous discutons de l'implication des résultats obtenus dans une perspective à la fois théorique et appliquée.

PARTIE II : REPERES THEORIQUES

CHAPITRE I

LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

Dans nos interactions avec le milieu environnant, la perception occupe un statut particulier dans la mesure où elle trie et interprète presque instantanément, sans effort apparent, les informations utiles à l'organisme (Flückiger & Klaue, 1991). Pourtant, c'est par un ensemble de processus complexes et diversifiés que le système visuel intègre continuellement des indices sensoriels multiples pour planifier et contrôler nos tâches motrices quotidiennes. La perception de la profondeur est sans aucun doute une des fonctions perceptives les plus importantes chez l'être vivant, particulièrement dans ses interactions avec l'environnement qui l'entoure. La dernière décennie a connu une période de recherches intenses centrées sur la compréhension et l'identification des mécanismes permettant l'intégration par le cerveau de l'information en trois dimensions à partir de différents indices sensoriels (Ernst & Banks, 2002 ; Hillis, Watt, Landy, & Banks, 2002; Knill & Saunders, 2003 ; Landy, Maloney, Johnston & Young, 1995 ; Saunders & Knill, 2001). L'objectif de ce chapitre est de décrire les indices visuels présents dans l'environnement qui permettent la perception visuelle de la profondeur, ainsi que d'offrir un état de la question sur leur fonctionnement intégré.

1 LES INDICES DE PROFONDEUR

Notre cerveau traite l'information tridimensionnelle qui provient du monde qui nous entoure, malgré le fait que l'image visuelle qui arrive sur la rétine soit en deux dimensions (Bruce, Green & Georgeson, 2003 ; Howard, 2002 ; Rock, 2001). Pour reconstruire la troisième dimension, notre système visuel utilise un large ensemble d'indices monoculaires et binoculaires que nous détaillons au sein de ce chapitre.

1.1 *Indices binoculaires*

La vision binoculaire permet au système nerveux d'extraire une information riche à propos des objets et de leur localisation dans l'environnement (Mon-Williams & Dijkerman, 1999). Deux types d'indices binoculaires sont classiquement identifiés ; leur

acquisition par notre cerveau n'est possible que lorsque les deux yeux sont utilisés et procurent l'information.

a) La vergence

La convergence (ou vergence) est l'angle formé par les deux yeux regardant directement ou fixant un point donné dans l'espace (Rock, 2001 p.59 ; Bruce et al., 2003, 1997). La direction des deux yeux tend normalement à converger sur le même point. L'unicité de la vision dépend de la formation de l'image des mêmes objets sur des points correspondants des deux rétines.

Le signal provenant de l'angle de vergence contribue à la perception des distances aussi bien dans des environnements riches en indices (Tresilian, Mon-Williams & Kelly, 1999) que dans des situations où le nombre d'indices est réduit¹ (Foley, 1980). Le poids accordé à l'information apportée par la vergence diminue toutefois lorsque la divergence avec les autres indices augmente, lorsque son utilité est réduite ou lorsque les autres indices de distance sont disponibles (Tresilian et al., 1999 ; Mon-Williams & Tresilian, 1999).

Sa valeur est inversement proportionnelle à la distance absolue² : si l'objet est proche, cet angle est relativement grand ; si l'objet est loin, l'angle sera plus aigu. Il est cependant important de souligner que la vergence a une utilité restreinte comme indice de distance, en raison des limites physiologiques humaines, pour des distances de fixation très proches (10 cm) et pour « l'infini optique » quand les deux yeux sont parallèles et l'angle nul (distances de fixation supérieures à 6 mètres, Mon-Williams & Dijkerman, 1999). A l'intérieur de ces frontières, la vergence produit une information extrêmement utile pour estimer les distances d'un objet qui se situe dans l'espace de préhension. Ce type d'information concerne la distance absolue d'un objet par rapport au sujet, la convergence étant le seul indice perceptif efficace à donner cette information (Rock, 2001). Mon-Williams & Dijkerman (1999) ont en outre précisé que la vergence jouait un rôle déterminant dans la perception de la distance³ d'un objet plutôt que dans la perception des propriétés de l'objet lui-même (telles que sa taille, sa forme, etc).

b) La disparité rétinienne ou disparité binoculaire

¹ Dans cette dernière situation, l'angle de vergence constitue même un indice majeur (Foley, 1980 ; Foley & Richards, 1972).

² Distance qui sépare l'observateur de l'objet.

³ Le terme distance est souvent réservé dans la littérature scientifique aux jugements égocentriques, c'est-à-dire à l'estimation de la distance qui sépare un observateur de l'objet cible (Mon-Williams, Tresilian, McIntosh & Milner, 2001).

Lorsque nous regardons les objets avec les deux yeux, les images projetées sur chaque rétine sont légèrement différentes ou disparates, parce que les deux yeux, étant séparés d'environ 6 centimètres en moyenne, occupent des positions légèrement différentes par rapport à la scène. La perception de la profondeur à partir de la disparité binoculaire est aussi appelée stéréoscopie (Rock, 2001). La stéréoscopie est considérée par beaucoup comme l'indice physiologique par excellence, probablement innée et présente chez de nombreuses espèces animales, même si plusieurs études ont montré un effet de la pratique sur la stéréoscopie (notamment que l'acuité stéréoscopique pouvait augmenter avec la pratique, Howard & Rogers, 2002).

La disparité binoculaire est traitée par deux systèmes physiologiques différents : le cortex pariétal (qui traite aussi les relations spatiales d'un stimulus ainsi que la profondeur et le mouvement) et le cortex temporal (qui traite aussi la forme, l'identité et la couleur de l'objet, Howard, 2002 ; Howard & Rogers, 1995). Plusieurs études ont montré la supériorité de la disparité binoculaire sur les autres types d'indices (Durgin, Proffitt, Olson & Reinke, 1995). La stéréoscopie serait en effet la source d'information la plus importante et la plus utilisée pour se représenter les relations entre les objets (Rock, 2001). Cependant, cet indice décroît rapidement avec la distance⁴ et est donc particulièrement efficace et précis pour des distances courtes, qui se situent dans le champ d'action du sujet (Rock, 2001 ; Bruce et al., 1997 ; Durgin et al., 1995).

c) Les indices binoculaires : conclusion

L'angle de convergence et la disparité binoculaire peuvent être utilisés pour spécifier l'entière des propriétés perceptives d'une scène visuelle, notamment la distance absolue⁵, donnée nécessaire dans la planification et le contrôle dans nombre de mouvements d'approche typiques (Glennerster, Rogers & Bradshaw, 1998 ; Rogers & Bradshaw, 1993 ; Servos, Goodale & Jakobson, 1992 ; Foley, 1980). Ces deux indices sont particulièrement efficaces dans le champ d'action du sujet, aspect qui nous intéresse spécifiquement, puisque notre étude envisage le lien direct entre la perception de la profondeur et l'action.

⁴ La disparité est en effet proportionnelle à la différence de profondeur des objets divisée par le carré de la distance de vue. La disparité s'accroît donc avec l'augmentation de la profondeur, mais décroît aussi avec la distance des objets (Bruce et al., 1997).

⁵ La distance absolue représente la distance qui sépare un observateur d'un objet.

1.2 *Indices monoculaires*

Nous l'avons souligné, l'information binoculaire est importante pour la perception de la profondeur. Cependant, en l'absence de vision binoculaire, nous sommes capables d'interagir correctement avec notre environnement, même si nos performances souffrent de quelques erreurs. Un autre type d'information visuelle, provenant des indices dits monoculaires, peut donc se révéler efficace. Ainsi, Mazyn, Lenoir, Montagne & Savelsbergh (2004) ont montré que l'information monoculaire permettait d'atteindre un score proche des 70% à leurs épreuves, ce qui est suffisant pour une performance raisonnable mais pas optimale. Plusieurs études ont également montré que les indices monoculaires picturaux disponibles dans l'environnement jouaient un rôle important dans la spécification et le contrôle des mouvements de préhension (Watt & Bradshaw, 2000 ; Watt, Bradshaw & Rushton, 1999 ; Marotta & Goodale, 1998). Comme nous le détaillons ci-dessous, l'ensemble des indices monoculaires constitue en effet une source importante d'informations concernant les propriétés des objets et leur position égocentrique, ce qui nous permet notamment de percevoir de la profondeur dans une image bidimensionnelle et explique aussi la fragilité de notre système perceptif face aux illusions visuelles.

a) Les indices picturaux

Cette catégorie d'indices regroupe la perspective linéaire, le gradient de densité texture, l'occlusion (interposition ou recouvrement d'objets⁶), la taille familière, la taille relative, les ombres et l'élévation dans le champ visuel (ou perspective aérienne)⁷. Ce type d'indices est qualifié de pictural, car chacun est présent dans l'image et dépend plus de la manière dont les objets apparaissent dans la scène et des surfaces sur lesquelles ils reposent que de mécanismes physiologiques, du mouvement de l'observateur ou de l'utilisation des deux yeux (Rock, 2001). C'est notamment sur cet ensemble d'indices que se sont appuyés les grands peintres de la Renaissance afin de créer les images en trompe-l'œil et incorporer l'impression de profondeur dans leurs tableaux.

Ces indices seraient prioritairement utilisés par le système visuo-moteur lorsque les indices binoculaires ne sont pas disponibles (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta, Behrmann & Goodale, 1997). Kruyer, Marotta & Goodale (1997) ont d'ailleurs montré

⁶ L'occlusion ne permettrait pas d'estimer la profondeur en soi, mais constituerait plutôt un indice ordinal de profondeur, dans le sens qu'il indiquerait un « ordre » de profondeur entre plusieurs objets (l'objet qui recouvre les autres étant plus proche de l'observateur que les objets recouverts). Cet indice serait dès lors utilisé de façon plus efficace lorsqu'il est combiné à d'autres pour en diminuer l'ambiguïté que lorsqu'il est pris isolément (Bruce et al., 2003 ; Landy et al., 1995).

⁷ L'ensemble de ces indices est défini en Annexe 1.

TRE I : LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR



Fig.1 : *Illusion de Ponzo*. Sous l'influence de la perspective linéaire, la ligne horizontale du haut paraît plus longue que celle du bas.

que le fait de retirer des indices picturaux affectait la performance des sujets en vision monoculaire. Les indices picturaux produisent une des informations les plus importantes et les plus riches à propos de la nature des objets et de leurs relations dans l'environnement. Certaines situations expérimentales ont par exemple montré que l'interposition et la perspective linéaire, simples indices picturaux, dominent la stéréoscopie en cas de conflit perceptif (Rock, 2001, par exemple, voir fig.1). Seul l'indice de taille familière semble moins puissant et déterminant en cas de conflit perceptif ; il ne serait pas de grande importance lorsque d'autres indices sont disponibles et constituerait en réalité plutôt le résultat d'un jugement intellectuel qu'un véritable indice perceptif de la distance (Rock, 2001, p.84).

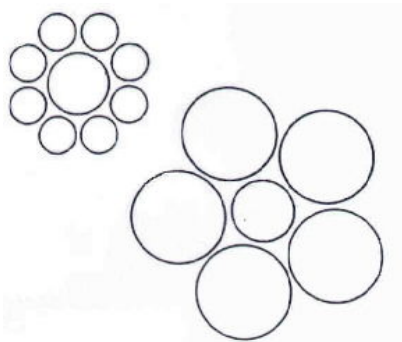


Fig. 2 : *Illusion de Titchener*

Le cercle central de la configuration de gauche paraît plus grand que celui de la configuration de droite.

La plupart de ces indices, notamment la taille familière, dépendent probablement très fortement d'un apprentissage et sont donc des habiletés acquises avec l'expérience (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1997). Ils jouent cependant un rôle plus important dans la perception pure que dans le contrôle d'actions apprises (Marotta et al., 1997). Ainsi, à un niveau purement perceptif, les illusions visuelles affectent le jugement perceptif (par exemple, dans la figure 2, le sujet verra les deux formes de tailles différentes) alors qu'elles n'ont aucun impact sur le système visuo-moteur et donc sur les actions (la taille d'ouverture de la main pour la préhension ne différera pas malgré l'illusion perceptive, voir fig. 2, Brenner & Smeets, 1996 ; Gentilucci, Daprati, Gangitano, Saetti & Toni, 1996 ; Welch & Post, 1996 ; Aglioti, DeSouza & Goodale 1995 ; Vishton & Cutting, 1995). Toutefois, la calibration des réponses motrices n'est pas complètement immunisée contre l'effet des illusions perceptives. En effet, les sujets peuvent utiliser l'information provenant des indices picturaux pour programmer et

contrôler leurs mouvements et donc être influencés par les illusions perceptives dans certaines situations (par exemple, lorsque les indices binoculaires sont absents, Goodale & Haffenden, 1997). Ces indices amèneraient donc une information supplémentaire utilisée en l'absence d'indices binoculaires plutôt que faisant partie intégrante des processus sous-tendant le mouvement de préhension (Marotta et al., 1997).

b) L'accommodation

L'accommodation est le processus par lequel la lentille de l'œil change son épaisseur de manière réflexe pour assurer une bonne mise au point des objets situés à différentes distances (Rock, 2001, p.60). Si l'œil s'accommode à la distance d'un objet, les images des objets qui ne sont pas dans le même plan de profondeur que le plan de fixation seront floues.

L'accommodation (indice monoculaire) et la vergence (indice binoculaire) sont souvent appelées indices oculomoteurs parce qu'ils dépendent des mouvements (ou des mouvements à l'intérieur) des yeux. Ces deux indices et leur fonctionnement sont d'ailleurs étroitement liés, ce qui rend leur étude séparée très délicate et procure des résultats souvent contradictoires (Rock, 2001 ; Mon-Williams & Wann, 1998 ; Mon-Williams, Tresilian, Plooy, Wann & Broerse, 1997).

L'accommodation n'est efficace que pour des petites distances (jusqu'à quelques mètres) et est, en général, considérée comme une source d'information de profondeur assez pauvre (Rock, 2001 ; Bruce et al., 1997).

c) Les indices dynamiques

Le mouvement rétinien

Le mouvement rétinien, indice monoculaire particulièrement efficace, est le mouvement de l'objet sur la rétine, celui-ci étant la plupart du temps provoqué par le mouvement de la tête. Plusieurs études ont montré que les sujets émettent des jugements de profondeur plus précis et corrects lorsque leur tête est libre de tout mouvement (Ferris, 1972 ; Biguer, Jeannerod & Prablanc, 1984). Marotta, Perrot, Nicolle & Goodale (1995) ont montré que des sujets devenus borgnes à la suite d'un accident ou d'une maladie faisaient des mouvements de tête plus larges et plus rapides quand ils exécutaient une tâche de préhension que des sujets utilisant leurs deux yeux. Dans une première étude, Marotta, Perrot, Nicolle, Servos & Goodale (1995) avaient montré que les sujets qui

avaient une vision normale ne semblaient pas utiliser cette stratégie acquise quand ils avaient un œil couvert. Toutefois, une seconde étude plus récente a montré que le fait d'empêcher les sujets de bouger la tête entravait leur performance en vision monoculaire mais pas en vision binoculaire (Marotta, DeSouza, Haffenden & Goodale, 1998).

Le mouvement rétinien (à partir du mouvement de la tête) serait donc une source d'information de profondeur qui peut être utilisée pour programmer et contrôler les mouvements d'approche et de préhension chez les sujets avec une vue normale, mais cela uniquement lorsque les indices binoculaires ne sont pas disponibles (Wickelgren, McConnell & Bingham, 2000 ; Marotta et al., 1998). En outre, le système visuo-moteur semblerait utiliser l'information sur la distance à partir des mouvements rétiniens pour programmer et contrôler le mouvement d'approche mais pas le mouvement de préhension (Marotta et al., 1997, 1998).

La parallaxe de mouvement

La parallaxe de mouvement est le mouvement de l'image d'un objet sur la rétine, provoqué par le déplacement de l'objet et/ou de l'observateur (Bruce et al., 1997). Cet indice dynamique a été étudié de façon intensive et est classiquement réputé comme produisant une information riche et solide à propos de la distance relative ou égocentrique absolue (Durgin et al., 1995 ; Bingham & Stassen, 1994 ; Erisksson, 1974 ; Ferris, 1972 ; Foley, 1977, 1978 ; Foley & Held, 1972 ; Gogel & Tietz, 1973, 1979 ; Johansson, 1973). La parallaxe provoquée par les mouvements de l'observateur procure des informations de profondeur plus efficaces et moins ambiguës que d'autres types d'indices (fournis, par exemple, par la rotation de l'objet, Durgin et al., 1995). Cependant, des études plus récentes ont montré que l'information provenant de la parallaxe de mouvement sous vision monoculaire permettait de recouvrer seulement une faible partie de l'information de profondeur, comparée à la vision binoculaire statique, pour des distances qui entrent dans le rayon typique des manipulations humaines (Rock, 2001 ; Durgin et al., 1995) et que les adultes ne semblaient pas utiliser l'information de la parallaxe de mouvement pour accomplir des mouvements d'approche (Marotta et al., 1995b). La parallaxe de mouvement serait donc un indice fonctionnel pour l'entièreté du champ visuel et cela, particulièrement pour des distances éloignées. En ce sens, la parallaxe de mouvement serait un indice complémentaire et efficace de la disparité binoculaire, cette dernière étant plus utile pour des distances courtes se situant dans le champ d'action.

1.3 *Relation entre indices binoculaires et monoculaires*

Comment les indices monoculaires et binoculaires se combinent-ils ?

Depuis plus d'un siècle, la communauté scientifique a marqué son intérêt pour les indices visuels ; mais celui-ci s'est surtout traduit par l'établissement d'une liste de mécanismes utilisés pour percevoir la profondeur, décrits chacun indépendamment les uns des autres, plutôt que par l'établissement d'un modèle intégré expliquant comment le système perceptif utilisait ces sources variées d'information (Cutting, 1997 ; Landy et al., 1995). La façon dont tous ces indices se combinent afin de nous conduire à une perception correcte de la profondeur dans la vie de tous les jours n'est donc étudiée que depuis peu et n'est pas encore connue (Bruce et al., 2003 ; Rock, 2001). Chaque indice pris isolément constitue un indicateur ambigu de la distance, de la profondeur et de la structure de l'objet (Knill & Saunders, 2003 ; Bruce et al., 2003). Cette ambiguïté peut être réduite en combinant l'information provenant de plusieurs indices qui apportent, chacun, une information qualitativement différente (Bruce et al., 2003 ; Landy et al., 1995).

Il est en effet raisonnable de penser que plus les indices visuels dans l'image sont nombreux, plus la perception de la profondeur sera fiable et précise (Rock, 2001 ; Foley, 1977). En outre, l'habileté à intégrer des indices semblerait plus importante que l'habileté à utiliser individuellement les indices de profondeur (Westerman et Cribbin, 1998).

Le premier élément sur lequel la communauté scientifique marque un certain consensus est que la vision monoculaire n'est pas équivalente à la vision binoculaire : en vision 2D, de l'information est perdue par rapport à la vision 3D (Bruce et al., 2003 ; Bingham & Pagano, 1998). Cependant, la façon dont les indices de profondeur sont combinés reste un sujet de débat continu (Bruce et al., 2003 ; Howard & Rogers, 2002 ; Landy et al., 1995 ; Bruno & Cutting, 1988 ; Cutting & Bruno, 1988 ; Cutting, Bruno, Brady & Moore, 1992). Une variété de combinaisons est possible ; au niveau le plus basique, on peut identifier trois alternatives (Bruno & Cutting, 1988, p.162) : la sélection (utiliser simplement la source disponible la plus efficace et ne pas prendre en compte les autres), l'addition (les sources d'information s'additionnent), et la multiplication (certaines sources sont utilisées pour corriger l'information d'autres sources). Des élaborations plus complexes de ces processus sont possibles (comme, par exemple, une moyenne pondérée des différents indices présents, Knill & Saunders, 2003 ; Landy et al., 1995 ; pour une revue Howard & Rogers, 2002, p.489). Selon Rock (2001), il existerait plutôt une interaction entre tous ces indices : la combinaison de deux d'entre eux occasionnerait un effet (positif ou négatif) que ni l'un, ni l'autre, ni la somme des deux

ne produirait. Landy et al. (1995) insistent en outre sur le caractère dynamique des règles de combinaison des indices de profondeur, en ce sens que celles-ci tiendraient compte du contexte et de la disponibilité des indices visuels dans l'environnement dans le traitement pondéré de ces derniers⁸. Dans le même ordre d'idées, Knill et Saunders (2003) proposent un modèle de l'observateur idéal⁹ qui pondérerait le traitement et l'influence des indices de façon inversement proportionnelle à l'incertitude subjective suscitée par l'ambiguïté de chaque indice pris isolément.

Selon les résultats de l'étude de Westerman et Cribbin (1998), l'habileté à percevoir la profondeur à partir des indices binoculaires ne serait pas associée à celle de percevoir la profondeur à partir d'indices monoculaires : un sujet présentant d'excellentes aptitudes dans la perception de la profondeur à partir des indices binoculaires ne possède pas nécessairement d'excellentes habiletés en vision monoculaire, l'inverse pouvant être également observé. Il est par ailleurs important de noter que la plupart des études sur l'intégration des indices ont traité l'estimation sensorielle comme un processus statique alors que ces indices sont utilisés dans un processus dynamique d'action dans la vie humaine (Greenwald, Knill & Saunders, 2005).

Quelle efficacité les indices binoculaires et monoculaires ont-ils ?

L'efficacité des deux types d'indices est également source de débats. De nombreuses études ont rapporté des distorsions régulières et stables dans la perception monoculaire des distances : le résultat le plus fréquemment observé étant une sous-estimation systématique de la distance en vision monoculaire (Durgin et al., 1995 ; Todd, Tittle & Norman, 1995 ; Todd, Tittle, Perotti & Norman, 1995). Dans le cas d'information binoculaire statique, les distances proches étaient surestimées tandis que les distances plus lointaines étaient sous-estimées (Johnston, 1991). Plus récemment, une large littérature a mis en évidence les avantages de la vision binoculaire par des performances meilleures au niveau de la vitesse d'exécution, de la précision, de la perception des distances (Mazyn et al., 2004 ; Loftus, Servos, Goodale, Mendarozqueta, & Mon-Williams, 2004 ; Servos, 2000 ; Mon-Williams & Dijkerman, 1999 ; Bingham & Pagano, 1998 ; Jackson, Jones, Newport & Pritchard, 1997 ; Marotta et al., 1998, 1997 ; Durgin et al., 1995 ; Servos & Goodale, 1994 ; Servos et al., 1992 ; Previc, 1990) tandis que d'autres études n'ont montré aucune différence entre le 2D et le 3D (Coull, Weir,

⁸ Selon Landy et al. (1995), les indices perceptifs seraient traités individuellement et ensuite combinés, préservant ainsi une certaine modularité entre les traitements (caractéristique soulignée par le nom de leur modèle « weak fusion ») contrairement à d'autres modèles (« strong fusion ») qui proposent qu'un traitement unique et interactif soit appliqué en une fois à tous les indices de profondeur présents.

⁹ L'observateur idéal peut être défini comme un estimateur qui combine l'information provenant d'indices multiples de façon à minimiser une erreur pré-définie en fonction des paramètres de la situation (Knill & Saunders, 2003).

Tremblay, Weeks & Elliott., 2000 ; Servos & Goodale, 1998). Ces divergences sont notamment dues aux différences entre les protocoles expérimentaux utilisés dans les diverses études¹⁰. Cependant, si les diverses méthodologies ont mené à des résultats contradictoires, ces dernières, par leurs diversités, ont également contribué à affiner au fil du temps la compréhension de l'intervention de ces types d'indices dans le traitement de l'information visuelle.

D'autres auteurs (Watt & Bradshaw, 2000) ont montré que les indices binoculaires jouaient un rôle particulièrement important dans la spécification des propriétés intrinsèques des objets (taille, forme...) et donc dans la planification de la composante « préhension » lors de l'approche d'un objet (ouverture de la main...), alors que certaines propriétés extrinsèques des objets telles que l'orientation correcte dans une direction et distance particulières dépendaient nettement moins de l'information binoculaire. Des études ultérieures ont en effet montré que les indices monoculaires produits par la texture et le contour des formes des figures pouvaient être aussi ou même plus efficaces que les indices binoculaires pour l'orientation d'une surface en 3D (Hillis, Watt, Landy & Banks, 2004 ; Knill & Saunders, 2003 ; Saunders & Knill, 2001).

Par ailleurs, Jackson et al. (1997) ont précisé que la vision binoculaire était particulièrement utile lors de tâches de grande précision, comme celles d'approche sélective. Ceci signifie que la différence entre la vision binoculaire et monoculaire se marquait plus nettement lorsque plusieurs objets étaient présents dans l'environnement et qu'une sélection devait être opérée que lorsque l'objet à atteindre était seul dans l'environnement.

Enfin, la perception binoculaire ne permettrait pas seulement une meilleure perception de la profondeur mais augmenterait également l'acuité visuelle de 10% et la sensibilité au contraste de 40%¹¹ (Rabin, 1995).

A quel moment de l'action les indices monoculaires et binoculaires sont-ils traités et utilisés ?

Dans les études les plus anciennes, les auteurs montraient que si la vision binoculaire contribuait au contrôle on-line des mouvements, elle était également très importante dans la phase de planification qui précède le début du mouvement d'approche (Servos

¹⁰ Ainsi par exemple, la plupart des études ont utilisé des tâches de préhension d'objets statiques. Une des seules études (Servos et Goodale, 1998) qui se soit penchée sur le mouvement d'interception d'un objet en mouvement, n'a montré aucune différence entre les visions monoculaire et binoculaire, l'objet en mouvement générant suffisamment d'indices de profondeur monoculaires et réduisant ainsi le rôle joué par les mécanismes binoculaires de disparité rétinienne dans le contrôle des mouvements dirigés vers cet objet.

¹¹ Ces augmentations sont expliquées par un mécanisme de sommation dans lequel les informations de chaque œil sont combinées (Rabin, 1995).

& Goodale, 1994 ; Servos et al., 1992). Selon celles-ci, la vision binoculaire jouerait un rôle critique dans l'acquisition d'informations par rapport au contexte, qui serait utilisée pour planifier les changements à apporter au pattern de mouvements basique (Patla, Niechwiej, Racco & Goodale, 2002). Des études ultérieures ont montré que lorsqu'une stratégie de planification anticipée n'était pas possible, les personnes se basaient davantage sur la vision binoculaire pour contrôler leurs mouvements on-line (Jackson et al., 1997). Les travaux actuels tendent plutôt à mettre l'accent sur l'intérêt de la vision binoculaire dans le contrôle on-line, et à diminuer son importance dans la planification : en 2000, Watt et Bradshaw précisèrent que la vision binoculaire était nécessaire pour le contrôle on-line du mouvement mais uniquement dans des environnements visuels appauvris où seuls l'objet et la main étaient visibles (résultats que Loftus et al. ont également obtenus en 2004). Très récemment, il a été confirmé et précisé que les indices binoculaires contribuaient plus au contrôle on-line de l'action qu'à sa planification (Greenwald et al., 2005).

Selon Landy et al. (1995), le système visuel doit s'adapter au contenu de la scène qui peut être très variable dans les conditions naturelles. Pour cela, le système perceptif se baserait sur les indices perceptifs présents dans l'environnement et accorderait plus de poids à certains en fonction de leur disponibilité, la priorité attribuée au traitement de chaque indice individuel étant malléable en fonction des conditions visuelles de l'environnement (Landy et al., 1995)

Très récemment, certains auteurs ont précisé que le système visuo-moteur ne donnerait pas plus de poids, mais traiterait plus rapidement les indices binoculaires que les indices monoculaires ; cette différence temporelle dans le traitement des indices expliquerait les différences de contribution des deux types d'indices dans la planification et le contrôle on-line de l'action (Greenwald et al., 2005). Les différents indices seraient intégrés à des moments différents dans le temps par le cerveau et interviendraient donc à des moments différents dans le contrôle des actes moteurs. Les indices binoculaires domineraient le contrôle on-line grâce à leur disponibilité immédiate et influenceraient ainsi une large partie du mouvement. Dans le bref laps de temps disponible pour le contrôle on-line, les indices monoculaires seraient traités trop lentement que pour avoir autant d'impact sur le contrôle on-line que sur la planification (Greenwald et al., 2005). Cette affirmation est corroborée par plusieurs études qui montrent qu'en vision monoculaire, les sujets atteignent leur cible plus lentement, avec de plus longues périodes de décélération, et un plus grand nombre d'ajustements on-line dans la trajectoire et dans la taille de la prise (Loftus et al., 2004 ; Dijkerman, Milner & Carey, 1996 ; Jackson et al., 1997 ; Marotta et al., 1995b ; Servos et Goodale, 1992 ; Servos et al., 1992). Un autre argument en faveur de cette hypothèse est notamment que

l'influence relative de l'information binoculaire est plus grande sur des mouvements de courte durée que sur des mouvements de longue durée (Greenwald et al., 2005). En effet, l'influence relative des indices perceptifs dépendrait aussi de la durée du mouvement : si le mouvement est rapide, la vitesse de traitement des indices binoculaires rendrait ces derniers indispensables pour le contrôle on-line de l'action mais si le mouvement est plus lent, les indices monoculaires pourraient également intervenir de façon efficace, ce qui est nettement confirmé dans l'étude de Mazyn et al. (2004) qui montre que la performance chute en 2D particulièrement dans les conditions où une grande vitesse est requise.

Toutes ces constatations récentes vont à l'encontre des théories plus classiques selon lesquelles le traitement de l'information binoculaire serait plus lent (McKee, Levi & Bowne, 1990).

1.4 Résumé et conclusion

Pour résumer et conclure cette partie sur l'utilisation, le traitement cognitif et l'efficacité des différents indices visuels, nous soulignerons le fait que, malgré certaines études qui ne mettent en évidence aucune différence entre la vision monoculaire et binoculaire, la plupart des études montrent que les indices binoculaires sont traités plus rapidement, participent plus au contrôle en temps réel des mouvements de préhension et cela particulièrement dans des tâches qui exigent une grande précision et/ou grande rapidité et/ou dans les environnements complexes contenant plusieurs objets (Jackson et al., 1997). Cette conclusion est toutefois à nuancer à la lumière des études qui montrent que, bien que la vision binoculaire soit spécifiquement utile dans les étapes finales du mouvement d'approche, les adultes sont capables, sous vision monoculaire, d'utiliser des indices monoculaires de profondeur tels que la parallaxe de mouvement ou les indices picturaux (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1997 ; Durgin et al., 1995). Les indices monoculaires sont toutefois moins informatifs que les indices binoculaires pour des objets situés dans l'espace de manipulation et leur utilisation efficace exige une considérable pratique (Jackson et al., 1997).

2 RÔLE DE L'ENVIRONNEMENT

Plusieurs auteurs démontrent l'influence que peut avoir l'environnement dans lequel est réalisée l'expérimentation (Jackson et al., 1997 ; Durgin et al., 1995 ; Wagner, 1985 ;

Foley, 1980). En effet, un environnement simulé par ordinateur ou appauvri tel qu'on le retrouve dans les situations de laboratoire ne reproduit pas toute la richesse de l'environnement réel dans lequel l'être humain évolue. Ainsi, dans un environnement réduit, la perception des distances est moins correcte, sous-estimée, même pour des objets proches (Bingham & Pagano, 1998 ; Foley, 1980) tandis que dans un environnement structuré et bien illuminé, les performances en vision monoculaire sont améliorées, même si elles ne rejoignent pas celles obtenues en vision binoculaire (Durgin et al., 1995). Loftus et al. (2004) montrent aussi que c'est particulièrement lorsque la vue du stimulus est limitée que la vision binoculaire procure une nette amélioration dans la localisation d'un stimulus.

Watt & Bradshaw (2000) relativisent ainsi l'importance de l'information binoculaire dans les mouvements de préhension sous vision normale en soulignant l'apport significatif des indices picturaux contenus dans l'environnement. En effet, l'information visuelle en provenance de l'entièreté du champ visuel, incluant l'information à propos de la position relative des parties du corps, joue un rôle dans le contrôle de la préhension (Watt et al., 1999 ; Jeannerod, 1984).

Cependant, il reste encore à spécifier les indices environnementaux utilisés et leur interaction avec les autres indices (Watt & Bradshaw, 2000)¹². L'influence des indices binoculaires sur la performance dépend des indices présents dans l'environnement et donc des conditions expérimentales (Loftus et al., 2004 ; Watt & Bradshaw, 2000). Pour obtenir une théorie la plus représentative de la perception humaine, il est nécessaire de procéder à des études écologiques dans des environnements structurés qui reproduisent ou tiennent compte de la richesse de l'environnement réel. Les études dans des environnements appauvris ou à partir de stimuli simulés par ordinateur ne sont certainement pas invalides mais gagnent à être complétées par des données obtenues dans des environnements réels (Durgin et al., 1995).

Dans les caractéristiques définissant l'environnement, Cutting (1997) a proposé une division de l'espace égocentrique¹³ en trois régions au sein desquelles les indices monoculaires et binoculaires ont une influence variable (voir figure 3 et graphique 1) :

- *L'espace personnel* qui va de 0 à 2 mètres et qui constitue l'espace d'action directe (et donc celui qui nous concerne particulièrement pour l'étude des relations entre la perception et l'action). Au sein de cet espace (appelé aussi péri-personnel), la disparité binoculaire est l'indice qui joue un rôle dominant dans la perception de la profondeur (Carey, Dijkerman & Milner, 1998 ;

¹² Loftus et al. (2004) montrent par exemple que le fait de retirer la vision binoculaire affecte le mouvement de préhension si la main du sujet est visible mais n'a que peu d'effet si le sujet ne voit pas sa main.

¹³ L'espace égocentrique représente l'espace qui est perçu à partir de la position de l'observateur et dépend donc de celle-ci.

Shikata, Tanaka, Nakamura, Taira & Sataka, 1995) et donc, dans le contrôle des mouvements fins et précis (Ellis & Menges, 1998).

- *L'espace d'action* qui s'étend de 2 à 50 mètres et dans lequel les indices tels que la hauteur dans le champ visuel, la parallaxe de mouvements et la disparité binoculaire occupent une place centrale dans le traitement visuel de la profondeur.
- *L'espace perceptif* qui s'étend au-delà de 50 mètres et dans lequel la perspective aérienne constitue l'élément central pour la perception de la profondeur.

Certains indices tels que l'occlusion d'objets, la taille relative et la densité relative gardent une efficacité constante indépendamment de la distance.

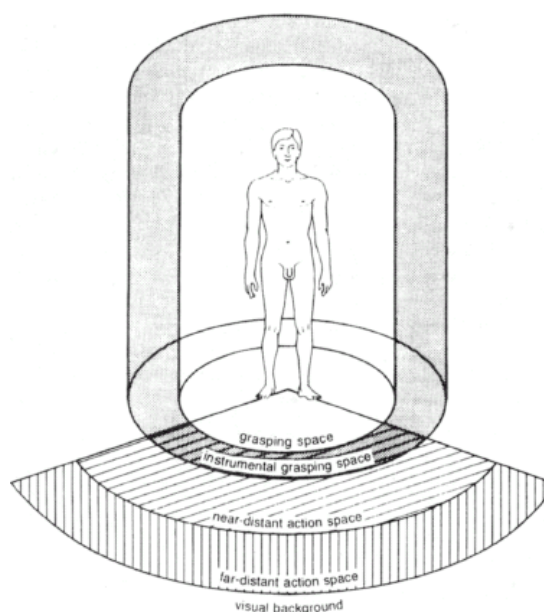
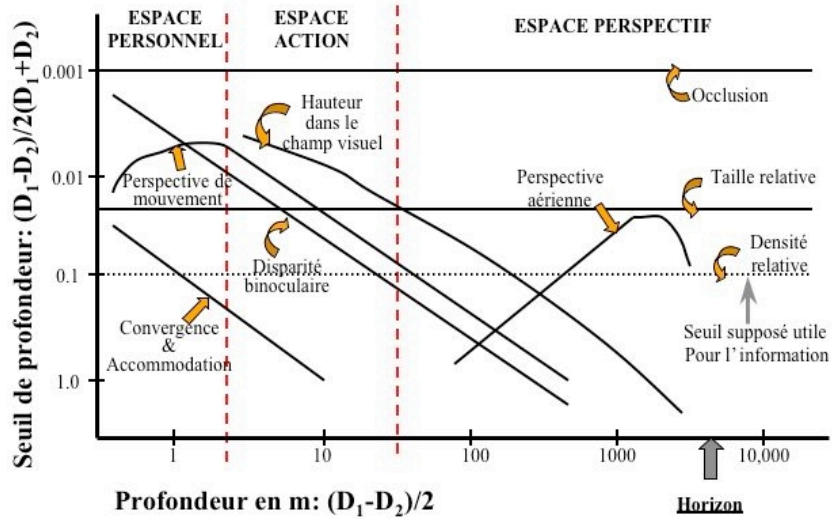


Fig. 3 : Modèle de l'espace extrapersonnel selon Grusser (1983). Les composants clés de cet espace comprennent l'espace de préhension, les espaces d'action proche et éloigné et l'horizon visuel.



Graphique 1 : Représentation de l'efficacité des indices monoculaires et binoculaires en fonction de la distance qui sépare l'objet de l'observateur.

3 AUTRES FACTEURS INTERVENANT DANS LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

La perception de la profondeur n'est pas seulement déterminée par le stimulus qui est projeté sur la rétine, elle est également influencée par un ensemble de règles qui relèvent de l'organisation perceptive (Koffka, 1935) et de la familiarité (Gregory, 1970). Très récemment, Pizlo, Li & Francis (2005) ont montré que la perception binoculaire d'une forme tridimensionnelle n'est pas uniquement basée sur les disparités binoculaires mais qu'elle dépend aussi des processus de regroupement perceptif classiques, tels que décrits par les psychologues gestaltistes. Ces derniers ont en effet introduit la notion d'organisation perceptive pour expliquer la tendance de l'être humain à intégrer des éléments perceptifs individuels en des configurations significatives (Bruce et al., 1997, 2003). Parmi les nombreux principes régissant cette organisation, les majeurs sont : la distinction figure-fond, le principe de proximité, le principe de similitude, le principe du destin commun, le principe de bonne continuité, le principe de fermeture, le principe de la taille relative, le principe d'orientation et de symétrie, le principe de prégnance et le principe de simplicité¹⁴. La plupart de ces principes se basent sur les informations qui proviennent des indices monoculaires. Leur influence n'est pas constante et ils interagissent de telle façon qu'ils entrent parfois en conflit les uns avec les autres (comme nous l'avons également mis en évidence au niveau des indices visuels de profondeur, Bruce et al., 1997). L'ensemble de ces principes joue un

¹⁴ Pour une description détaillée de ces indices, voir Annexe 2.

rôle dans la perception de la profondeur ; celui-ci est toutefois plus important dans les processus de jugement cognitif (par exemple, l'estimation verbale des distances) que dans l'interaction directe avec l'environnement (Servos, 2000).

4 DÉVELOPPEMENT DE LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

Son acquisition et son développement sont source de débat. En ce qui concerne les indices binoculaires, si la stéréoscopie semble être un indice inné (Rock, 2001), la vergence ne deviendrait un indice précis et constant qu'à partir de trois-quatre mois (Aslin & Jackson, 1979).

La plupart des indices monoculaires picturaux et les règles de la perception de la profondeur sont souvent considérées comme étant acquises à travers l'expérience visuelle (Renier, Collignon, Tranduy, Vanlierde & De Volder, 2003 ; Julesz, 1971 ; Arditi, Holtzham & Kosslyn, 1988 ; Grégory et Wallace, 1963), même si ces expériences et l'acquisition ont lieu très tôt dans la vie (Gordon & Yonas, 1976 ; Campos, Langer & Kowitz, 1970 ; Gibson et Walk, 1960). Plusieurs études ainsi ont montré que l'enfant n'acquiert la perception de la profondeur qu'à partir du moment où il peut se déplacer et bouger dans l'espace, procurant ainsi des éléments en faveur de l'existence d'un lien robuste entre l'action et la perception.

Les facteurs « expérientiels » et l'action jouent donc un rôle critique dans le développement de la capacité à percevoir la profondeur : par exemple, la perception de la profondeur à partir des indices picturaux (Marotta & Goodale, 1998 ; Seddon, Adeola, el Farra & Oyediji, 1984) et la performance à des tâches d'hyperacuité (Fahle & Henke-Fahle, 1996) sont sensibles à l'apprentissage et à l'entraînement. Plusieurs études ont aussi montré que la perspective visuelle n'était pas une habileté innée et nécessitait une stimulation visuelle spécifique pour être développée. Les personnes aveugles de naissance, par exemple, n'ont que des connaissances théoriques et très fragmentées de la perception de la profondeur.

D'un autre côté, Mazyn et al. (2004) montrent qu'en vision monoculaire, des sujets avec une faible acuité stéréoscopique ne sont pas meilleurs que les sujets qui ont une bonne acuité stéréoscopique. Ceci suggère que les premiers, qui ont pourtant une longue expérience de vie sans certains indices binoculaires de profondeur, n'ont pas développé de mécanismes de compensation qui leur permettraient d'utiliser de façon plus efficiente les autres indices (vergence et indices monoculaires).

5 LES DIFFÉRENCES INDIVIDUELLES DANS LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

Les différences individuelles dans la perception de la profondeur constituent un facteur dont il convient de tenir également compte lorsque que l'on étudie l'utilisation des indices monoculaires et binoculaires dans le fonctionnement humain. Il existe, par exemple, de larges différences individuelles dans l'habileté à utiliser l'information de stéréoscopie pour évaluer la profondeur (Knill & Saunders, 2003). En effet, une assez large proportion de la population, 15 à 20%¹⁵, n'a pas de vision stéréoscopique et ne fonctionne qu'à partir des indices monoculaires (Bingham & Pagano, 1998). Komachi et al. (1996) montrent à partir d'une analyse qualitative (avec seulement 8 sujets) que les 4 sujets atteints de strabisme sont meilleurs quand seuls les indices monoculaires de profondeur sont présents. Certaines études ont montré des différences individuelles dans la stéréoscopie, avec certains individus incapables d'utiliser les indices binoculaires et d'autres ayant des déficiences dans leur habileté à utiliser l'information de profondeur (Julesz, 1971 ; Richards, 1970). Comme décrit dans le paragraphe précédent, Mazyn et al. (2004) comparent la performance de sujets ayant une très bonne acuité stéréoscopique avec celle de sujets ayant une très faible acuité stéréoscopique. Leurs données montrent que ces derniers ne s'appuient pas plus que les autres sur les indices monoculaires afin de compenser leur faible acuité stéréoscopique.

6 LIEN ENTRE LES DIFFÉRENTS SENS : LA VISION ET LE TOUCHER

Avant de conclure ce chapitre, il nous semble nécessaire de rappeler que la vision n'est pas un sens isolé mais qu'elle interagit étroitement avec les autres modalités sensorielles que sont le toucher, l'ouïe, l'odorat et le goût. Toute notre activité est en relation avec notre environnement, à travers l'ensemble de ces récepteurs sensoriels. Notre expérience du monde est contrainte par nos sens et construite comme une représentation interne du monde (Rock, 2001). Nos cinq sens nous procurent des informations de natures différentes ; toutefois, malgré cette diversité, nous parvenons à avoir une perception unifiée du monde qui nous entoure. Une question qui préoccupe un grand nombre de scientifiques dans le domaine de la perception concerne la façon dont les informations provenant des différents sens sont combinées ou associées. Dans ce dernier point, nous exposons la façon dont la vision et le toucher interagissent, se combinent et s'influencent mutuellement. Dans un souci de concision, nous nous

¹⁵ Ce pourcentage inclut les personnes hypermétropes, amblyopes, anisométriques, souffrant de strabismes ainsi que les personnes borgnes.

limiterons à l'étude de l'interaction de ces deux modalités sensorielles, qui constituent les sources d'information centrales de tout acte chirurgical¹⁶.

6.1 *Nos sens déterminent-ils la nature de la perception ?*

La question générale qui domine l'ensemble des études dans ce domaine concerne l'identification et le fonctionnement des facteurs qui déterminent la nature de la perception. Est-ce le canal sensoriel utilisé (modalité visuelle, auditive, tactile...) ou le type de traitement cognitif et/ou cérébral mis en œuvre qui détermine la nature de la perception ?

Depuis plusieurs années déjà, différents auteurs tentent de répondre à cette question. En 1993, Vermersch a suggéré une certaine indépendance entre la modalité sensorielle (ou organe sensoriel) qui procure l'information et le traitement qui y est appliqué : selon lui, il n'existe pas de relation directe et nécessaire entre la modalité sensorielle par laquelle s'effectue la perception et la modalité sensorielle par laquelle celle-ci peut être évoquée. Plus récemment, une série d'auteurs (Renier, 2005 ; Bach-y-Rita, Tyler & Kaczmarek, 2003 ; O'Regan & Noe, 2001) a produit des éléments en faveur de l'hypothèse selon laquelle la perception se créerait dans le cerveau de façon relativement indépendante de la modalité sensorielle qui a procuré cette information. Ainsi, selon O'Regan et Noe (2001), la nature des perceptions est principalement déterminée par la relation entre les actions motrices et leurs conséquences sensorielles, appelées contingences sensori-motrices. Dans sa thèse de doctorat consacrée à la substitution sensorielle, Renier (2005) conclut que la nature et les caractéristiques de la perception sont principalement déterminées par le type de traitement réalisé par le cerveau, plutôt que par l'organe sensoriel qui a acheminé l'information depuis l'environnement¹⁷. En outre, de nombreuses études physiologiques et neuropsychologiques ont mis en évidence des mécanismes, tels que la réorganisation du cortex visuel (plasticité, Rauschecker, 1995) et l'émergence de mécanismes compensatoires, qui permettent l'utilisation d'autres sens que ceux utilisés habituellement quand ces derniers ne sont pas disponibles (soit que la situation ne permet pas leur utilisation¹⁸ ou qu'ils présentent des déficits importants, comme, par exemple, dans le cas des personnes aveugles qui développent des mécanismes de compensation importants, Lessard, Pare, Lepore & Lassonde, 1998). L'ensemble de ces données plaide en faveur d'une relative indépendance générale entre

¹⁶ Dont une, le toucher, disparaît en chirurgie minimale invasive, notre contexte de recherche.

¹⁷ Dans ses études, Renier (2005) parvient ainsi à créer des illusions visuelles à partir d'autres modalités sensorielles, ce qui constitue un argument en faveur du fait que la nature de la perception ne serait pas exclusivement déterminée par la modalité sensorielle.

¹⁸ Ce qui est le cas, par exemple, de la chirurgie minimale invasive, qui comme nous le verrons par la suite, fait disparaître le sens du toucher.

les sens et la nature de la perception, celle-ci étant plus fonction du type de traitement appliqué que déterminée par la modalité sensorielle qui procure l'information.

6.2 *Lien vision – toucher*

Dans un premier temps, beaucoup d'auteurs ont plaidé pour une indépendance de ces deux modalités (Lobb, 1965, 1970). Il est en effet généralement admis que la vision est une modalité distincte et que, comme les autres modalités, elle possède ses propres organes sensoriels et système de réception (Schwartz, 2004). En outre, elle impliquerait même des sensations et expériences subjectives qui seraient qualitativement différentes des sensations produites par les organes sensoriels des autres modalités (Schwartz, 2004 ; Rock, 2001).

Les différences entre les modalités sensorielles que sont la vision et le toucher sont importantes et concernent aussi bien la représentation des propriétés géométriques de l'objet que les processus impliqués dans leur traitement (Berhmann & Ewell, 2003). L'information visuelle serait par exemple capturée et traitée en parallèle par un ensemble de récepteurs en une seule fixation tandis que l'information tactile serait encodée de façon sérielle (Hamilton & Pascual-Leone, 1998) et exigerait une stratégie d'exploration des contours plus séquentielle (Lederman & Klatzky, 1987). Les modalités et processus de reconnaissance tactiles et visuels exploiteraient également des informations de l'environnement différentes : pour le toucher, les propriétés de substances (telles que la rugosité d'une surface, sa souplesse, sa température...) sont des éléments critiques alors que pour la vision, les caractéristiques liées à la structure (telles que la taille, la forme...) sont des composants plus adéquats et pertinents à traiter (Klatzky, Lederman & Reed, 1987 ; Lederman, Thorne & Jones, 1986).

Cependant, derrière cette indépendance apparente, il semblerait que ces deux modalités soient contraintes par des principes similaires (Berhmann & Ewell, 2003 ; Eimer, 2001 ; Easton, Greene & Srinivas, 1997). La vue et le toucher seraient en effet les deux sens les plus intimement impliqués dans la perception de l'espace (Schwartz, 2004) et il existerait beaucoup de connexions qui les lieraient de façon transversale à travers divers domaines. Ainsi, la perception de la profondeur qui dépend habituellement de la vision peut être aussi accessible à travers d'autres modalités sensorielles telles que l'audition ou le toucher. La vision serait toutefois plus proche du toucher que de l'audition.

Le lien entre la vision et le toucher constitue cependant une relation complexe et teintée de certaines asymétries (Picard, 2006 ; Berhmann & Ewell, 2003). Il n'y aurait pas une seule représentation partagée pour ces deux modalités mais elles ne seraient pas totalement indépendantes l'une de l'autre pour autant. Certains auteurs montrent par

exemple une dominance de la perception visuelle sur le toucher. Ainsi, lorsqu'il existe un conflit sensoriel dans l'information de la forme d'un objet, la vision domine et « capture » le toucher (Rock, 2001 ; Pavani, Spence & Driver, 1999). Et en plus d'être dominée par la vision, la sensation tactile est conforme à la sensation visuelle. D'autres auteurs nuancent cependant la position dominante de la vision sur le toucher (Heller, 1983) ; Ernst et Banks (2002) ont ainsi proposé un modèle statistique qui reflète les processus d'intégration complexes entre la vision et le toucher¹⁹.

Un élément commun aux deux modalités serait l'expertise qui se manifesterait de façon assez similaire pour les deux types d'informations sensorielles : les facteurs qui affectent la reconnaissance experte dans la modalité visuelle (tout/partie, figure inversée, Gauthier & Tarr, 2002) auraient la même influence sur l'expertise en modalité tactile (Berhmann & Ewell, 2003). Cependant, le transfert d'expertise entre les deux modalités serait asymétrique : Berhmann & Ewell (2003) ont en effet montré que l'expertise en modalité visuelle pouvait être exploitée dans la modalité tactile, tandis que l'information acquise par le toucher n'était pas transférée à l'identification visuelle²⁰. Toutefois l'étude de Berhmann & Ewell (2003) utilisait des objets en 2 dimensions alors que la plupart des autres études qui ont montré un transfert symétrique entre la vue et le toucher (Norman, Norman, Clayton, Lianekhammy & Zielke, 2004 ; Atkins, Jacobs & Knill, 2003 ; Easton et al., 1997) ont utilisé des objets en 3D, fournissant ainsi des informations supplémentaires à propos de la structure de l'objet, des relations spatiales et des caractéristiques de surface. Dans ces circonstances, le système tactile activerait des mécanismes du système visuel, ce qui expliquerait le transfert en modalité visuelle (James et al., 2002). Plusieurs études vont dans le sens de cette hypothèse et montrent que l'exploration tactile d'objets en 3D activent non seulement les aires somato-sensorielles du cerveau mais également les aires du cortex occipital, qui sont classiquement associées au traitement visuel des objets (James et al., 2002 ; Amedi, Malach, Hendler, Peled & Zohary,., 2001 ; Deibert, Kraut, Kremen & Hart, 1999).

Au niveau des processus attentionnels, plusieurs auteurs ont également mis en évidence des liens entre la vision et le toucher (Eimer, 2001 ; Macaluso & Driver, 2001; Spence et al., 2000). De nouveau, certains auteurs plaident pour une relation symétrique (où les deux modalités s'influencent de la même façon, Spence et al., 2000) tandis que d'autres

¹⁹ Le système de jugement se basant préférentiellement sur le type d'information (visuelle ou tactile) qui présente le moins de variance (et qui contient donc l'information la plus sûre).

²⁰ Ainsi lorsque le sujet est entraîné à partir de la vision à reconnaître des patterns, il devient expert dans l'identification des patterns aussi bien à partir de la vision que du toucher. Si les sujets sont entraînés par la modalité tactile, cet apprentissage ne se transfère pas automatiquement à la modalité visuelle (Berhmann & Ewell, 2003).

mettent en évidence des liens asymétriques (où le traitement visuel serait affecté par l'attention tactilo-spatiale mais où le contraire ne serait pas vrai, Eimer, 2001). Il semblerait toutefois que ces différences soient de nouveau expliquées par des divergences méthodologiques entre les diverses études.

Enfin, le lien qui lie la vision et le toucher influencerait les étapes perceptives précoces des traitements visuel et somato-sensoriel, ayant peu d'effet sur les étapes post-perceptives plus tardives²¹ (Macaluso & Driver, 2005 ; Eimer, 2001).

En résumé, il existerait un lien robuste entre la vision et le toucher. La façon dont les deux modalités s'influencent mutuellement (symétrie ou au contraire asymétrie entre les modalités visuelles et tactiles) dépendrait du stimulus présenté (notamment, la vision en 2D ou 3D) ou de la tâche à exécuter et ne constituerait donc pas une caractéristique fondamentale, nécessaire ou fixe du système visuo-tactile.

7 CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence que la perception de la profondeur est permise par un ensemble d'indices binoculaires et monoculaires qui interagissent étroitement ensemble. Tous ne remplissent pas la même fonction et ils se complètent mutuellement afin de diminuer l'ambiguïté perceptive de l'environnement. Ainsi, les indices binoculaires sont très efficaces dans le champ d'action du sujet, ils sont traités plus rapidement et participent plus au contrôle on-line du mouvement que les indices monoculaires qui, eux, dépendent plus d'un processus d'apprentissage et se montrent plus utiles pour des distances qui dépassent le champ d'action du sujet. Le mode d'interaction des différents indices n'est pas encore précisément connu. Cependant, leur influence individuelle semble modulée par l'intervention de facteurs divers tels que l'environnement, l'apprentissage, l'intervention des autres sens, etc.

L'objectif du chapitre suivant est de présenter la façon dont les théories qui expliquent le fonctionnement de la perception visuelle intègrent et exploitent ces indices perceptifs.

²¹ Ces données récentes sont en contradiction avec les modèles plus classiques selon lesquels le traitement sensoriel et perceptif est basé sur des unités séparées spécifiques aux modalités sensorielles, qui opèrent en parallèle dans des réseaux strictement indépendants.

CHAPITRE II

LES DIFFERENTES APPROCHES DE L'ETUDE DE LA PERCEPTION VISUELLE

De nombreuses théories rendent compte du phénomène de la perception. La plupart de celles-ci sont anciennes, en particulier les deux premières dont nous allons rendre compte. Initialement, leurs conceptions s'opposaient ; mais elles ont sensiblement évolué et gardent une importance significative qui détermine encore les discussions et débats actuels autour de la vision (Schwartz, 2004 ; Bruce et al., 2003). Cette pertinence de deux modèles pourtant élaborés depuis de nombreuses années, tient en partie aux approches plus récentes, décrites ensuite, qui permettent d'entrevoir et d'exploiter des liens entre ces deux théories antérieures qui s'excluaient précédemment.

1 L'APPROCHE DU TRAITEMENT DE L'INFORMATION : LE MODÈLE DE MARR

Selon la perspective traditionnelle du traitement de l'information, la perception est un processus de reconstruction fragmenté en plusieurs étapes (Bruce et al., 1997 ; Edelman & Weinshall, 1991). La perception de la profondeur est permise par des processus cognitifs qui transforment l'image rétinienne en 2D en une image en 3D. Pour cela, le cerveau doit extraire et interpréter de façon adéquate des indices spécifiques monoculaires ou binoculaires²².

Dans la philosophie de ce courant, Marr a développé un modèle computationnel visant à expliquer la vision, publié en 1982. Sa théorie constitue sans doute l'essai le plus sophistiqué à ce jour pour décrire les opérations de traitement de l'information impliquées dans la vision au sein d'un cadre théorique qui réunit à la fois des éléments de physiologie, de psychologie et d'intelligence artificielle (Bruce et al., 1997). Les références continues et encore fréquentes à sa théorie, maintenant âgée de 24 ans, témoignent de son importance majeure et toujours actuelle²³ (Schwartz, 2004 ; Bruce et al., 2003).

²² Ces indices ont fait l'objet d'une description détaillée au chapitre 1.

²³ L' « European Congress on Visual Perception » a d'ailleurs organisé son congrès en 2002 autour de la théorie de Marr, célébrant ainsi ses 20 ans d'existence.

Dans sa théorie de la reconnaissance des objets, Marr (1982) propose trois grandes étapes de traitement de l'information visuelle :

- Elaboration de l'ébauche primitive (représentation en 2D construite à partir des changements d'intensité présents dans l'image et par l'application de règles de regroupement),
- Construction de l'ébauche en 2,5D (point culminant du traitement visuel précoce, élaborée à partir des structures assemblées dans l'ébauche primitive et de l'analyse de la profondeur, du mouvement et des ombres),
- Formation de la représentation en modèle 3D (qui établit un contact avec un registre de descriptions d'objets stockées en mémoire et qui permet ainsi la reconnaissance des objets).

Dans notre étude, nous nous intéresserons essentiellement aux processus intermédiaires qui sont impliqués dans la construction de l'ébauche en 2,5D, étape nécessaire pour guider toute action.

L'ébauche en 2,5D est construite à partir de l'information disponible dans l'image rétinienne et serait centrée sur l'observateur plutôt que sur l'objet²⁴. Les représentations centrées sur l'observateur sont indispensables pour que ce dernier puisse interagir avec son environnement sans se référer à des connaissances stockées en mémoire : la structure spatiale des formes n'impliquerait à ce stade que les parties visibles de l'objet et n'atteindrait pas encore la structure en 3D stockée en mémoire. Des données neuropsychologiques démontrent en effet que l'information visuelle centrée sur l'observateur est utilisée pour contrôler bon nombre d'actions (spécifiquement, les actions de préhension) et ne requiert pas l'identification de l'objet (par exemple, dans certains cas d'agnosie visuelle, Riddoch, Edwards & Humphreys, 1998 ; Goodale, Jacobson & Keillor, 1994 ; Milner et al., 1991). C'est également lors de cette étape qu'aurait lieu l'intégration des différents indices monoculaires et binoculaires afin de percevoir correctement la profondeur, composante essentielle pour une interaction adéquate avec les objets environnants (Marr, 1982).

En ce qui concerne la reconnaissance d'un objet (troisième et dernière étape), Marr (1982) la considère comme accomplie lorsqu'une des descriptions dérivées de l'image ressemble fortement à la description, précédemment stockée en mémoire, d'une classe particulière et connue d'objets. A cette étape, la description dérivée doit être nécessairement basée sur l'objet, en tant que représentation prototypique encodée en

²⁴ L'expression « information centrée sur l'observateur » signifie que la perception de l'objet dépend de la position spatiale de l'observateur et varie donc en fonction de celle-ci. L'information centrée sur l'objet au contraire, est utilisée pour décrire une représentation stable de l'objet encodée en mémoire, qui est indépendante des conditions et de l'environnement dans lequel l'objet est perçu.

mémoire (Schacter & Cooper, 1993 ; Schacter, Cooper & Delaney, 1990). Deux types de processus semblent impliqués dans la reconnaissance d'un objet : des processus *bottom-up* (qui partent de l'image perçue) et des processus *top-down* (qui partent des connaissances stockées en mémoire). Selon Marr (1982), une bonne partie du traitement des images peut être réalisée sans le recours à une connaissance spécifique du monde et les processus *top-down* n'interviennent que dans les situations ambiguës. D'autres auteurs, par contre, proposent que les deux stratégies participent au processus de reconnaissance quelle que soit l'ambiguïté de l'image (Sanocki, 1998).

2 L'APPROCHE ÉCOLOGIQUE

L'approche écologique peut être décrite comme une théorie complémentaire, opérant à un niveau d'analyse plus global, par rapport au modèle de Marr (Bruce et al., 1997). Cependant, beaucoup d'auteurs se revendiquant de l'approche écologique ont donné à leurs travaux une orientation théorique explicitement à l'antithèse des théories classiques du traitement de l'information telles que celles de Marr (1982). C'est J.J. Gibson qui a développé cette approche pendant une trentaine d'années (de 1950 à 1979) et qui est le représentant dont se réclament les chercheurs de ce courant. Selon la théorie de la perception de Gibson, le point de départ du traitement visuel ne serait pas une image sur la rétine traitée de façon passive mais un flux optique structuré de lumière provenant de l'environnement sur lequel le sujet agit activement. Dans la perspective écologique, l'observateur a un rôle actif d'exploration de son environnement et sa performance perceptive consiste à capter de manière directe l'information invariante²⁵ inhérente à la lumière structurée qui provient de l'environnement (Müsseler, Van der Heijden & Kerzel, 2004 ; Bruce et al., 2003, 1997).

Selon Gibson et ses disciples, la perception et l'action sont intimement liées et se contraignent mutuellement. Le mécanisme par lequel la perception agit sur les actions est expliqué par l'utilisation d'affordances, c'est-à-dire par les possibilités d'action offertes par l'environnement et spécifiées dans la structure de lumière entourant l'observateur²⁶. Les affordances produites par un objet dépendent aussi bien de

²⁵ Un « invariant » représente les propriétés spécifiques d'un pattern de lumière reflété par un objet, événement ou scène qui restent constants alors que les autres mesures du pattern varient en fonction du contexte (Bruce et al., 2003).

²⁶ Plusieurs auteurs ont mis en évidence la présence d'éléments clés dans des objets familiers qui provoquent les affordances ou des « potentiels d'actions » (par exemple, l'anse d'une tasse, Pavese & Buxbaum, 2002 ; Riddoch et al., 2000, 1998 ; Tucker & Ellis, 2001, 1998, Craighero, Fatiga, Rizzolatti & Umiltà, 1999). Ces affordances dépendent de certains facteurs tels que la position des objets par rapport à l'observateur (ce qui s'apparente à l'ébauche en 2,5D de Marr qui est centrée sur l'observateur, Tipper,

l'observateur que des caractéristiques de l'objet et ne sont activées qu'à partir de la structure en trois dimensions des objets réels²⁷ (Gibson 1979).

Gibson conçoit le lien entre la perception et l'action comme étant tellement étroit qu'il propose une théorie de la perception directe selon laquelle l'information provenant de l'environnement serait directement captée plutôt que « traitée ». En effet, pour ce dernier, le produit final de la perception n'est pas une représentation visuelle interne de l'environnement (un percept dont la personne serait consciente) mais plutôt la détection des affordances ; ainsi, la mémoire n'interviendrait pas dans les processus de perception, les percepts entrant n'étant pas comparés à des traces mnésiques précédemment encodées, mais le système visuel « résonnerait » plutôt à l'information provenant de certains invariants de l'environnement (Gibson, 1979). Toutefois, il faut reconnaître que le concept de « résonance » est toujours resté vague dans les écrits de Gibson (Bruce et al., 2003, 1997) et que la notion de perception directe qui supprime toute conception de traitement de l'information et même de représentation est un des points les plus controversés de sa théorie²⁸.

Malgré les nombreuses critiques suscitées par cette théorie, certains des concepts développés par Gibson et ses disciples ont permis d'envisager des liens pour combler l'écart, constamment établi implicitement ou explicitement dans les théories cognitives classiques, entre la perception et l'action. Dans la théorie des affordances par exemple, la perception est une invitation à agir, et l'action est une composante essentielle de la perception (Bruce et al., 1997).

En outre, un des apports considérable de la théorie de Gibson a été la remise en question des études menées en laboratoire dans lesquelles les sujets sont soumis à des stimuli appauvris, dénués de contexte et de tout sens (Pavese & Buxbaum, 2002 ; Bruce et al., 1997 ; Marr, 1982). Selon Gibson, ce type d'études ne procure aucun renseignement sur la perception telle qu'elle se déroule dans des environnements réels qui sont beaucoup plus riches que les stimuli présentés en laboratoire, et ne peut donc être le point de départ d'une psychologie de la perception.

La théorie de Gibson est donc assez radicale dans ses prises de position et se tient à l'écart des autres théories de la perception. La rupture entre la perspective écologique et les théories traditionnelles ne se situe pas uniquement au niveau psychologique mais aussi à un niveau presque philosophique (Bruce et al., 2003, 1997, p.266). Plusieurs

Howard & Jackson, 1997), leur orientation (Humphreys & Riddoch, 2001 ; Riddoch et al., 1998) et le but de l'action (Riddoch et al., 1998).

²⁷ Selon ce principe, les affordances ne pourraient donc être mises en évidence lorsque les sujets interagissent dans des environnements virtuels qui présentent des stimuli en deux dimensions.

²⁸ Parmi les multiples critiques apportées à l'encontre de l'absence de représentations internes dans la théorie écologique, Fodor et Pylyshyn (1981) distinguent deux processus qui sont « voir » et « voir comme », ce dernier décrivant le sens que l'être humain donne à ce qu'il voit, fonction pour laquelle la connaissance (et donc les représentations) joue un rôle indispensable. « *what you see when you see a thing depends upon what the thing you see is. But what you see the thing as depends upon what you know about what you are seeing* » (Fodor & Pylyshyn, 1981).

idées et notions développées par Gibson se rapprochent de la perspective gestaltiste, notamment par leur approche phénoménologique de la vision (Bruce et al., 1997). L'approche écologique diffère cependant de celle des gestaltistes qui étaient nativistes, tandis que Gibson attribuait une grande importance aux processus d'apprentissage (Bruce et al., 1997).

Enfin, la perspective écologique a inspiré plusieurs nouveaux champs de recherche, dont le contrôle de l'action humaine qui constitue une extension importante de ce courant et qui a permis le développement d'outils pour mieux comprendre le couplage mutuel qui existe entre la perception et l'action ainsi que les changements dans l'action amenés par l'environnement (Bruce et al., 2003).

3 L'APPROCHE DES DEUX SYSTÈMES VISUELS SÉPARÉS

Nous venons de présenter les deux grandes théories classiques qui proposent des modèles de fonctionnement de la perception visuelle fondamentalement opposés de prime abord. Une troisième approche, qui différencie deux voies de traitement de l'information visuelle, permet d'expliquer et de résoudre certaines contradictions qui apparaissaient entre ces deux conceptions antérieures.

Historiquement, le système visuel a été classifié et décrit en deux sous-systèmes, sous-tendus par des structures neuronales différentes : la voie ventrale (temporo-occipitale ou inféro-temporale) pour la reconnaissance des formes (traitement visuel pour une perception visuelle consciente utilisée dans la catégorisation et l'identification des objets) et la voie dorsale (pariéto-occipitale ou occipito-pariétale en proche connexion avec le cortex prémoteur et préfrontal) pour la localisation spatiale et le traitement visuel des actions orientées vers une cible (pour guider et contrôler visuellement le comportement, Goodale et Milner, 1992 ; Milner et Goodale, 1993, 1995 ; Jeannerod et Rossetti, 1993 ; Schneider, 1969).

On a longtemps résumé les fonctionnalités différentes de ces structures en affirmant que la voie ventrale avait pour fonction de répondre à la question « what » (perception des caractéristiques de l'objet et son identification) et que la voie dorsale répondait au « where » (localisation spatiale de l'objet, Schneider, 1969). Goodale et Milner (1992) ont révisé cette distinction en redéfinissant les deux voies, afin qu'elles reflètent de façon plus adéquate la dichotomie *fonctionnelle* sous-tendue par les substrats anatomiques différents : le « what » qui traiterait les représentations cognitives conscientes de la perception visuelle et le « how » qui traiterait les représentations sensori-motrices de l'espace visuel. Cette utilisation dichotomique de la vision, avec

d'un côté les estimations perceptives et de l'autre le contrôle visuo-moteur, a été confirmée à de nombreuses reprises par des données comportementales, neuropsychologiques et électrophysiologiques à partir de populations saines ou atteintes de pathologies (Servos, 2000 ; Pisella et al., 2000 ; Castiello, Bonfiglioli & Bennett, 1998 ; Goodale et Servos, 1996 ; Goodale et al., 1994, 1991, 1986 ; Bridgeman, Lewis, Heit & Nagle 1979). Les computations transformant l'information visuelle en réponse motrice et gérant les paramètres pour l'action seraient donc réalisées indépendamment des autres traitements de la perception visuelle et ne seraient pas accessibles aux jugements perceptifs et cognitifs concernant l'objet et donc à la conscience (Servos, 2000).

Il semble également que voie dorsale et ventrale aient des fonctionnalités différentes en matière de perception de la profondeur. Des études menées auprès de patients agnosiques (Mon-Williams et al., 2001 ; Carey et al., 1998 ; Marotta, Berhmann et Goodale, 1997 ; Sataka et al., 1997 ; Dijkerman et al., 1996) suggèrent que l'information binoculaire de profondeur est en majorité traitée par la voie dorsale, tandis que la voie ventrale est plus spécialisée dans le traitement des indices de profondeur monoculaires. En effet, les patients qui utilisent leur voie dorsale pour guider l'action ont de bonnes performances spatiales dans un espace tridimensionnel. A l'inverse, les performances de ces patients, dont la voie ventrale est déficitaire, chutent drastiquement quand ils sont en vision monoculaire. Servos (2000) confirme ces conclusions avec des sujets sains.

Enfin, notre meilleure connaissance des fonctionnalités différentes des voies ventrales et dorsales permet de donner une assise physiologique et de valider certaines conclusions des deux grandes théories de la perception qui étaient antagonistes dans leur version originale et qui péchaient par leur caractère très théorique et abstrait (Goodale & Humphrey, 2004 ; 1998).

Dans le modèle de Marr (1982), la voie dorsale interviendrait particulièrement dans l'élaboration de l'ébauche en 2,5D et traiterait les informations visuelles en fonction de la position spatiale de l'observateur (la voie dorsale serait donc centrée sur l'observateur). La voie ventrale serait quant à elle plus impliquée dans la dernière étape de la reconnaissance de l'objet et traiterait les informations basées sur l'objet, quelle que soit sa localisation dans l'espace.

Dans l'approche écologique de Gibson, la perception était envisagée comme étant directe, sans médiation par des représentations, postulat extrêmement controversé. Or il semble que la voie dorsale pourrait être le vecteur de cette perception directe vers l'action. En effet, les mécanismes visuo-moteurs de la voie dorsale présentent quelques similitudes avec la perception directe : ils opèrent en temps réel et n'ont pas la

possibilité de stocker de l'information plus de quelques centaines de millisecondes (Goodale et al., 1994 ; Goodale & Milner, 1992).

Cette absence de représentation stable au sein de la voie dorsale implique en outre que les mouvements de préhension *mémorisés* ne dépendraient pas de la voie dorsale mais plutôt du système ventral (Goodale et al., 1994), hypothèse qui s'est notamment vue confirmée par l'étude de Jackson et al. (1997). Toutes les réponses motrices ne sont donc pas sous le contrôle exclusif de la voie dorsale ; la voie ventrale est, par exemple, aussi spécifiquement utilisée lorsque les actions sont déterminées par la couleur des stimuli (Pisella et al., 2000).

La voie ventrale serait donc également activée dans les réponses motrices, particulièrement pour traiter les indices visuels disponibles en vision monoculaire (la couleur, le gradient texture, la perspective, les ombres et l'illumination) et plus accessibles à la conscience que les indices binoculaires (tels que la disparité rétinienne ou la convergence).

En résumé, les deux fonctions essentielles de la perception visuelle classiquement distinguées sont : procurer la connaissance et la conscience du monde qui nous entoure et guider nos activités dans notre environnement direct (Jeannerod & Jacob, 2005 ; Bruce et al., 2003). La théorie de Milner et Goodale (1995) suggère que cette conception de la perception visuelle reflète la façon dont le cerveau traite l'information visuelle. Il existerait donc deux types de représentation de l'espace visuel : une pour la perception visuelle consciente, qui serait aussi spécialisée dans le traitement de l'information monoculaire, et une autre pour l'action, qui traiterai spécifiquement les indices visuels binoculaires. Ces deux grandes classes de représentations dépendraient de structures corticales différentes. Autant la perspective écologique insistait sur l'unité de la perception et de l'action, autant cette approche prône plutôt une diversité et une dissociation des processus engagés dans la perception et l'action (Müsseler et al., 2004). Si la conscience est traitée exclusivement par la voie ventrale et le contrôle visuo-moteur par la voie dorsale, il est alors possible de considérer ces deux aspects de la perception visuelle séparément. Cependant, de plus en plus de données montrent que ces deux voies interagissent ensemble de façon étroite et que chacune serait elle-même divisée en de multiples sous-systèmes (Bruce et al., 2003). De la même manière, Humphreys, Riddoch, Forti & Ackroyd (2004) insistent sur la nature interactive de la perception et de l'action, suggérant ainsi qu'une dichotomie stricte entre l'action, qui serait sous le contrôle de la voie dorsale, et les mécanismes perceptifs qui relèveraient de la voie ventrale, ne pourrait réaliser correctement ni expliquer de nombreux aspects de la performance visuo-motrice. Il semble donc prématuré de procéder à une distinction fondamentale entre ces deux fonctions de la vision à partir des évidences neurologiques actuelles (Jeannerod & Jacob, 2005 ; Bruce et al., 2003).

En outre, d'autres divisions du traitement de l'information visuelle sont proposées dans la littérature. Ainsi, il pourrait exister un troisième système de traitement visuel qui impliquerait le lobe pariétal inférieur chez l'humain (une structure qui n'aurait pas son homologue dans le cerveau des singes, Milner et Goodale, 1995). Ce système pourrait combiner des fonctions attentionnelles et spatiales et traiterait les informations spatiales et temporelles nécessaires lors de l'exécution d'habiletés acquises dans un espace tridimensionnel (Philips et al., 2002).

Pylyshyn (1999) propose l'existence d'un processus distinct et autonome appelé la vision précoce sur lequel la connaissance consciente, les croyances, les attentes ou autres états mentaux du sujet n'ont aucune influence²⁹. Cette vision précoce serait par contre déterminée par les contraintes naturelles de l'environnement, c'est-à-dire un certain type de connaissances, souvent implicites et donc qui échappent à tout contrôle conscient, sur les régularités de l'environnement (par exemple, dans le traitement des ombres, notre connaissance implicite et pourtant extrêmement robuste que la lumière vient du haut, voir fig. 4). Ce type de connaissances serait spécifique à la vision précoce et inaccessible aux autres processus cognitifs. La représentation issue de ce traitement précoce serait traitée dans un second temps par les processus cognitifs plus tardifs et accessibles à la conscience. Cette représentation, par ses caractéristiques, s'apparenterait à l'ébauche en 2,5 décrite par Marr (1982) tandis que les processus cognitifs précoces qui contribuent à sa formation relèveraient des mécanismes automatiques observés dans la voie dorsale décrite ci-dessus ou dans la perception directe telle que formulée par Gibson (1979).

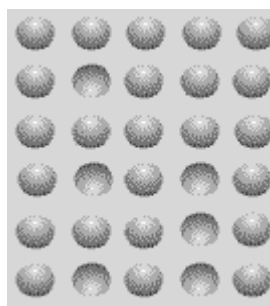


Fig. 4 : Exemple d'ombres en fonction de la provenance de la lumière (en haut ou en bas).

Enfin, d'autres facteurs que les substrats anatomiques interviennent également et peuvent expliquer ces deux phénomènes décrits dans la littérature, que sont les dissociations et les interactions entre la perception et l'action. Rossetti et Coello (2000)

²⁹ Pour insister sur l'absence d'influence des connaissances conscientes sur ce traitement visuel précoce, Pylyshyn (1999) qualifie cette étape comme étant « cognitively impenetrable ».

affirment par exemple que la durée de l'action est une donnée cruciale, les actions de préhension rapides seraient basées sur la voie dorsale alors que les actions plus lentes seraient gouvernées par la voie ventrale. Ces données sur l'influence des contraintes temporelles rejoignent les conclusions des études très récentes de Greenwald et al. (2005) et de Mazyn et al. (2004) selon lesquelles l'information binoculaire est traitée plus rapidement que l'information monoculaire, ce qui s'accorde avec la description et les qualités fonctionnelles des deux voies, l'information visuelle binoculaire dépendant de la voie dorsale qui est plus rapide et les indices monoculaires étant traités par la voie ventrale évaluée plus lente.

4 L'APPROCHE CONSTRUCTIVISTE

Cette dernière approche très récente intègre les théories précédentes, mais insiste particulièrement sur l'importance de l'interaction entre la perception/cognition et l'action. En effet, pour les auteurs de ce courant, la perception et l'action ne constituent pas des domaines cognitifs séparés et déconnectés l'un de l'autre (comme le suggère l'approche précédemment décrite) : exceptés quelques rares exemples de diversité et de dissociation, la situation la plus normale et fréquente est plutôt l'unité et l'association de la perception et de l'action.

La vision n'est pas une fin en soi ; en effet, le système visuel, comme les autres systèmes perceptifs, a évolué au sein de l'ensemble des espèces animales avec l'objectif primordial de guider et de contrôler l'action (Allport, 1987). En plus du rôle de la perception pour l'action, cette approche souligne l'importance de l'action pour la perception (Hömmel & Schneider, 2002 ; Wühr & Müsseler, 2002 ; Hommel, Musseler, Aschersleben & Prinz, 2001 ; Dominguez, 2001). Le modèle proposé n'est ainsi plus linéaire (perception puis action) mais intègre une boucle de rétroaction où l'information perceptive serait utilisée pour orienter l'action ; l'action serait elle-même utilisée pour construire et améliorer la représentation du monde (Dominguez, 2001 ; Wexler, Panerai, Lamouret & Droulez, 2001 ; Nardi, 1996). Elle jouerait par exemple un rôle majeur dans le processus d'interprétation de l'image optique qui conduit à la perception visuelle (Humphreys et al., 2004 ; Wexler et al., 2001). La perception et l'action n'opéreraient donc pas de façon isolée, indépendamment l'une de l'autre mais dépendraient plutôt d'un set commun de processus et/ou représentations (Grosjean & Prinz, 2005).

L'existence de ce lien a des implications dans la recherche aussi bien au niveau théorique que méthodologique. En effet, si la perception n'est pas indépendante de

l'action, ces deux éléments, la perception et l'action, doivent être considérés ensemble plutôt que séparément, ce qui contraste avec les perspectives plus classiques où la perception est étudiée indépendamment de la réponse (Ward, 2002). Cependant, certaines études apportent des résultats contradictoires, ce qui laisse penser que les effets de l'action sur la perception sont faibles ou spécifiquement liés aux paramètres de certaines tâches (voir notamment les issues spéciales de *Visual Cognition*, 2002, 2004). Tous ces résultats contradictoires laissent en suspens la question de l'influence précise de l'action sur la perception (Müsseler et al., 2004 ; Ward, 2002) : Comment l'action influence-t-elle les processus perceptifs en cours ? Cette influence est-elle constante ou dépend-elle des caractéristiques de la tâche, du contexte, des qualités du sujet (expertise, acuité visuelle..) ? En résumé, les effets de l'action sur la perception reflètent-ils une propriété fondamentale et critique de l'architecture visuo-motrice ou au contraire, ne sont-ils qu'occasionnels et liés à des situations précises ?

La relation entre les processus perceptifs et sensori-moteurs est un sujet de débat depuis plus d'un siècle. S'il est indiscutable que la plupart des actions sont planifiées, préparées et guidées par et à partir de l'information visuelle, on ne connaît encore que très peu l'influence des processus moteurs sur l'analyse perceptive des stimuli visuels (Waszak et Gorea, 2004).

Nous avons vu au chapitre précédent que différents types d'indices visuels se combinaient pour reconstruire une image du monde qui nous entoure. Parmi les indices qui participent à ce processus de reconstruction, certains résultent tout spécialement des actions exécutées dans l'environnement, l'action ayant ainsi un effet rétroactif sur la perception. Ainsi, par ses mouvements, par exemple, un observateur crée un indice de profondeur particulièrement puissant qui est la parallaxe de mouvement³⁰. Les indices perceptifs ne proviennent donc pas uniquement d'un traitement cognitif « passif » sur lequel le sujet n'a pas d'influence mais sont aussi créés à partir des mouvements et des changements provoqués dans l'environnement par l'observateur. Cette conception rejoint notamment celle de Gibson (1979) qui mettait en avant le mouvement et les changements dans l'environnement comme constituant des composantes essentielles de la perception. Le mouvement de l'observateur, de son corps, sa tête ou ses yeux constitue en effet un des moyens les plus riches d'obtenir des informations variées sur l'environnement. Une autre façon d'obtenir des variations dans l'environnement est de provoquer des changements (que Gibson qualifiait d'*événements*) qui permettent d'estimer plus correctement la profondeur.

³⁰ Indice monoculaire dynamique décrit au chapitre 1.

5 RÔLE DE L'INFLUENCE DES PROCESSUS ASCENDANTS ET DESCENDANTS SUR LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

Deux types de processus sont classiquement différenciés lors du traitement de l'information, particulièrement dans la modalité visuelle³¹ : un processus ascendant (*bottom-up*) où le traitement est réalisé majoritairement et directement à partir de l'information provenant de l'environnement et un processus descendant (*top-down*) où l'information stockée en mémoire influence le traitement en cours. Cette distinction illustre à nouveau la dichotomie qui est proposée entre les processus perceptifs purs (qui dépendent du système ventral) et le système visuo-moteur (qui dépend principalement de la voie dorsale). Les premiers seraient traités par des mécanismes *top-down* sur lesquels les connaissances stockées en mémoire influent implicitement ou explicitement, tandis que le système visuo-moteur serait sous le contrôle de mécanismes *bottom-up*, les connaissances stockées ayant peu d'influence sur son fonctionnement. Cette distinction est notamment corroborée par les données obtenues à partir du traitement des illusions visuelles cognitives. Celles-ci renvoient à un phénomène perceptif dans lequel l'information sensorielle est mal interprétée par le cerveau en perception pure tandis qu'aucun effet d'illusion n'est mis en évidence lorsque le sujet doit agir sur ou à partir de ces stimuli. Ces phénomènes sont habituellement considérés comme des modèles de l'influence *top-down* dans le domaine de la vision pure parce qu'ils résultent de l'influence inconsciente des processus cognitifs sous-jacents (Grégory, 1963 ; Rock, 1975). Cependant, cette dichotomie est une fois encore à nuancer, les connaissances pouvant parfois influencer le système visuo-moteur (notamment dans le mouvement d'approche et de préhension, Riddoch et al., 1998 ; Jeannerod, Decety & Michel, 1994).

6 CONCLUSION

Le constructivisme, nouvelle approche théorique qui est tout autant prometteuse qu'ambitieuse et qui permet de rapprocher les concepts développés dans les autres théories, est celle qui va nous servir de cadre de référence tout au long de notre étude avec des renvois constants aux autres théories développées ci-dessus. Toute perception implique une véritable activité de construction de la part du sujet en interaction avec le milieu, celui-ci étant le principal acteur dans l'élaboration de son savoir sur

³¹ Et spécifiquement dans le domaine de l'attention visuelle.

l'environnement (Flückiger & Klaue, 1991). C'est ce rôle de l'action que nous allons investiguer dans le chapitre suivant à travers la notion d'instrument et d'expertise.

CHAPITRE III

L'UTILISATION DE L'INSTRUMENT ET L'EXPERTISE

La relation des hommes aux objets et systèmes anthropotechniques³² constitue un des thèmes majeurs de la psychologie ergonomique contemporaine (Rabardel, 1995). L'instrument et les nouvelles technologies transforment l'action mais aussi les informations qui sont fournies au sujet pour cette action (Rabardel, 1995, p.47). Si les nouvelles technologies amènent certaines limitations et contraintes, elles participent également à l'émergence de nouveaux types et formes d'action. L'objectif de ce chapitre est d'étudier plus en détail comment s'établit la relation perception-action à travers le processus d'instrumentation, d'expertise et d'acquisition des habiletés.

1 LA NOTION D'INSTRUMENT

Selon la théorie de l'activité, toute action est dirigée vers un objet, un but et est médiatisée par un artefact (instrument, signe, langage, machine...) créé par l'homme pour contrôler et réguler son comportement (Decortis, Noirfalise & Saudelli, 2000 ; Kaptelinin, Nardi & Macaulay, 1999 ; Nardi, 1996). L'action comprend des composantes opérationnelles qui déterminent la façon dont elle va être conduite. Ces opérations deviennent routinières et inconscientes avec la pratique ; elles dépendent cependant des conditions dans lesquelles l'action est réalisée et donc, de l'outil (Nardi, 1996 ; Leontiev, 1974).

L'instrument médiatise nos actions et notre engagement vers le monde extérieur (Baber, 2006 ; Rabardel, 1995, 1993 ; Weill-Fassina, Rabardel & Dubois, 1993). Dans le cas d'utilisation de nouvelles technologies, bien souvent, le sujet n'a plus d'accès direct à l'objet mais doit agir sur lui de façon indirecte, l'instrument se situant ainsi à une position à la fois intermédiaire et médiatrice entre le sujet et l'objet. Dans ce cadre, les nouvelles technologies ne peuvent pas être étudiées en tant qu'objet isolé mais en tant qu'outils et instruments (Bannon, 1997 ; Bannon & Bodker, 1991). L'objet acquiert la

³² Rabardel (1995, p.9) parle de systèmes anthropotechniques (par opposition au terme « technique », notion qui ne comporte aucune référence humaine) pour souligner l'omniprésence de l'homme dans les cycles de vie de ces objets depuis leur origine (conception où ils sont pensés, conçus en fonction d'un environnement humain) jusqu'à leur mise au rebut, en passant par les phases essentielles du fonctionnement et de l'utilisation. Le développement de conceptualisations à caractère anthropocentrique apparaît dans de nombreux domaines comme une nécessité, sinon une urgence (Rabardel, 1995, p.20).

fonction d'outil à partir du moment où il est utilisé pour réaliser une action. L'outil est destiné et utilisé dans le but d'agir sur le monde afin de produire un changement (Rabardel, 1995, 1993 ; Weill-Fassin et al., 1993).

Il permet d'augmenter et d'étendre les capacités des actions humaines et doit procurer une certaine flexibilité de manipulation dans l'action afin que le sujet puisse contrôler et définir les effets du changement désiré (Baber, 2006). Enfin, l'outil possède un statut particulier en mémoire, qui le différencie d'un objet vague et indéfini. De plus en plus d'études neuropsychologiques suggèrent même l'existence d'une ou plusieurs aires corticales associées aux représentations d'objets qui peuvent être manipulés (Baber, 2006 ; Humphreys et al., 2004 ; Johnson-Frey, 2003).

Le terme d'instrument est classiquement utilisé pour désigner l'outil en situation, c'est-à-dire que le sujet s'est approprié celui-ci dans un usage bien spécifique : l'instrument est devenu un moyen de l'action (Rabardel, 1995). Trois pôles sont engagés dans les situations d'utilisation d'un instrument (voir figure 5) :

- le sujet (utilisateur, opérateur, travailleur, agent...)
- l'instrument (l'outil, la machine, le système, l'ustensile, le produit...)
- l'objet vers lequel l'action à l'aide de l'instrument est dirigée.

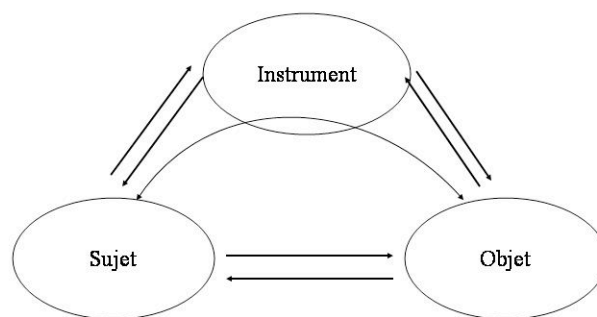


Fig. 5 : Triade caractéristique des situations d'activités instrumentées

Cette modélisation triadique enrichit considérablement les modélisations bipolaires habituelles de situations d'interaction sujet-objet (Rabardel, 1995, p.76). De plus, chacun des pôles est en interaction avec l'environnement que le sujet doit prendre en compte dans son activité finalisée. L'instrument médiatise la relation sujet-objet dans les deux sens : de l'objet vers le sujet (dans cette relation, l'instrument est un moyen qui permet la connaissance de l'objet) et du sujet vers l'objet (dans cette relation, l'instrument est un moyen d'action de transformation, incluant le contrôle et la régulation, dirigée vers l'objet). La plupart des activités prenant place dans une dimension collective, viennent s'ajouter au modèle les interactions du sujet avec les

autres sujets, les collaborations et coopérations. Le modèle tripolaire devient alors un modèle quadripolaire.

Un instrument n'est jamais achevé : en effet, l'usage que l'on peut en faire dépasse le plus souvent et de loin, les anticipations de ses concepteurs. Autrement dit, l'élaboration et la production des usages se poursuivent au-delà de la conception initiale. L'instrument, le système, au départ nanti d'un projet d'utilisation spécifique, s'insère en fait dans des pratiques souvent en décalage, aussi bien du point de vue du contexte que des finalités d'emploi³³ (Perriault, 1990).

Cette approche soutient non seulement que les personnes modifient les artefacts et les ajustent en fonction de leurs conditions et besoins spécifiques, mais également qu'ils deviennent compétents dans la manière de faire fonctionner l'outil (logique de fonctionnement), dans la connaissance des tâches qui peuvent être accomplies avec l'outil (logique de transformation des choses) et des méthodes qui peuvent être appliquées pour mener à bien ces tâches de façon efficace et adaptée (logique de l'activité et de l'utilisation). Par un mécanisme d'assimilation-accommodation³⁴, l'individu, au travers de ses interactions avec l'environnement, va progressivement s'approprier les caractéristiques de fonctionnement de l'outil et va développer un ensemble de connaissances procédurales et déclaratives associées à ce dernier, qui prend alors la fonction d'instrument. Les modèles internes ainsi créés sont notamment fonctionnels, avec l'objectif majeur de guider l'individu dans l'utilisation adéquate de l'objet et de lui permettre d'anticiper le résultat de ses actions et des mécanismes qu'il contrôle (Norman, 1983). Les composants de l'action ne semblent cependant pas fixés, mais ils changent et évoluent de façon dynamique avec les modifications de l'environnement et les spécificités de l'instrument (Kaptelinin et al., 1999 ; Leontiev, 1974).

Il nous semble donc évident que l'utilisation répétée d'un outil crée une véritable expertise qui fait accéder celui-ci au stade d'instrument. D'où l'intérêt de réintroduire cette dimension instrumentale dans les modèles classiques de la psychologie cognitive qui expliquent l'expertise en ne prenant en compte qu'un schéma de perception-action sans médiatisation. En effet, s'il existe une littérature pléthorique sur l'utilisation des outils dans le domaine de l'ergonomie, la notion et l'influence des outils sont des

³³ Ce phénomène est classiquement défini sous le terme de catachrèse (Rabardel, 1995).

³⁴ Les processus d'assimilation et d'accommodation définissent deux mécanismes complémentaires par lesquels l'être humain acquiert des nouvelles informations et transforme ses représentations : dans le premier, le sujet intègre la nouvelle information à celles qu'il possède déjà sans modifier ces dernières, tandis que le second mécanisme demande une transformation des connaissances préalables pour permettre l'intégration des nouvelles connaissances (par exemple, lorsque ces dernières sont en conflit avec les précédentes et qu'elles modifient la représentation des éléments que le sujet avait antérieurement).

thèmes très peu mentionnés et exploités dans le domaine de la psychologie cognitive, malgré un très large intérêt accordé à l'expertise et aux habiletés motrices par cette discipline³⁵ (Baber, 2006). Nous proposons ici d'adopter une démarche originale en réintroduisant la dimension instrumentale dans les modèles qui expliquent classiquement l'acquisition d'une expertise dans l'accomplissement d'une tâche. Cette volonté d'investiguer le champ de « l'expertise instrumentale » est motivée par la complexification technique intervenue dans le domaine de la chirurgie depuis quelques années. De plus en plus, on peut se poser la question de savoir si cette complexification n'induit pas des apprentissages supplémentaires pour maîtriser l'outil, apprentissages qui s'ajoutent au développement de l'expertise classiquement définie dans le domaine chirurgical.

Dans ce cadre, il est fécond d'étudier la performance de sujets experts et les processus d'acquisition d'habiletés en les mettant en relation avec l'utilisation d'un outil et son évolution. Cette approche s'avère particulièrement riche pour comprendre les processus qui lient la perception et l'action dans le contexte de la théorie constructiviste (correction de l'utilisation de l'outil en fonction des résultats de l'action)³⁶.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les théories classiques relatives à l'expertise et à l'acquisition d'habiletés avant de conclure sur les liens qui peuvent être établis entre la performance experte et l'utilisation d'instrument au sein de la boucle perception-action.

2 LES CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPERTISE

2.1 *Définition du concept d'expertise*

Malgré un très grand nombre d'études consacrées à l'expertise, il n'existe toujours pas de définition consensuelle et opérationnelle de ce concept (Farrington-Darby & Wilson, 2006 ; Shanteau, 1992).

Tout d'abord, l'étude de l'expertise recouvre des domaines très variés, que ce soit au niveau du contenu ou de l'angle d'approche et de la méthodologie utilisée, ce qui rend difficile l'établissement d'une vision unitaire de l'expertise :

- Les tâches étudiées font intervenir des processus très différents (mnésiques, moteurs, de raisonnement, de résolution de problèmes, de diagnostic, etc.),

³⁵ Baber (2006) reproche principalement à la recherche contemporaine en sciences cognitives sur les habiletés motrices de ne s'intéresser qu'à des activités très basiques. Déjà en 1995, Rabardel insistait sur le caractère urgent d'étudier les formes supérieures des activités avec instruments dans l'originalité de leurs formes, leur complexité, diversité et singularité.

³⁶ Détaillée au chapitre précédent.

- Les contextes d'étude sont très divers (laboratoire, milieux naturels) ainsi que la méthodologie appliquée (questionnaires, analyses de l'activité, mesures de performance qui peuvent porter sur des aspects très divers,...)
- Le domaine et le contenu de l'expertise varient également (que ce soit en rapport avec un milieu de travail (médecine, aviation...), le sport ou les jeux (échecs particulièrement) et les loisirs, ou encore, des tâches artificielles créées en laboratoire).

Ensuite, l'expertise constitue une large entité qui possède de nombreux synonymes qui, s'ils recouvrent un même champ conceptuel, peuvent être étudiés de façon fort différente et mener à des conclusions divergentes. La notion d'expertise peut en effet décrire des habiletés, des savoir-faire, des compétences, des capacités ou encore des connaissances que le sujet considéré comme expert possède. Le terme habileté (*skill* en anglais) est surtout réservé au domaine sensori-moteur tandis que les autres termes sont utilisés dans des contextes plus généraux. Ainsi, De Montmollin (1984) proposait une définition assez large des compétences comme étant « des ensembles stabilisés de savoirs et de savoir-faire, de conduites types, de procédures-standard, de types de raisonnement, que l'on peut mettre en œuvre sans apprentissage nouveau. Elles permettent l'anticipation des phénomènes, l'implicite dans les instructions et la variabilité dans les tâches » (p.122). Cette définition, malgré son caractère très général, reprend déjà un certain nombre de traits qui caractérisent la performance experte. Parmi les multiples propriétés qui définissent l'expertise (compétences finalisées, opératives et fonctionnelles, Leplat, 1991), nous retiendrons particulièrement les deux suivantes :

1. L'expertise est spécifique à un domaine. Cette caractéristique est probablement celle pour laquelle le consensus est le plus grand : on n'est pas expert dans tout mais dans un domaine bien particulier et délimité (Leplat, 1991). Plusieurs auteurs ont par exemple montré que des médecins experts dans une spécialité éprouvaient des difficultés voire étaient incapables de répondre à des questions portant sur une autre spécialité (Rikers, Winkel, Loyens & Schmidt, 2003 ; Gilhooly, 1991). Cependant, si l'expertise est finalisée, elle possède également un caractère généralisable à deux niveaux : elle peut être facilement transférable et étendue à des situations nouvelles (Gauthier et al., 1998). Tout d'abord, les compétences ou connaissances de l'expert peuvent s'exprimer ou être transférées dans d'autres domaines connexes avec une plus grande rapidité et facilité que pour des sujets novices. Ensuite, l'expert dispose d'un éventail de savoirs et de savoir-faire qui lui permettent de se repérer dans des situations floues, incertaines, rares. Il sait résoudre les problèmes de son domaine même s'ils ne sont pas clairement posés ou s'ils se présentent pour la première fois. Il

prend des décisions sans disposer toujours de toute l'information mais en combinant divers types de connaissances (Tanaka, Curran & Sheinberg, 2005 ; De Terssac et Soubie, 1988).

2. L'expertise est apprise et stable. L'expertise est une compétence acquise par la pratique et non un talent inné comme il a été longtemps considéré (Ericsson & Lehmann, 1996 ; Ericsson, Krampe & Tesch-Römer, 1993). La plupart des auteurs insistent sur l'importance de la pratique directe et répétée plutôt qu'un apprentissage théorique pour devenir expert, et s'accordent sur une durée moyenne de 10 ans de pratique pour atteindre le niveau d'expert (Ericsson, 1994 ; Chase & Simon, 1973). Par ces critères, l'expertise constitue un domaine particulièrement difficile à investiguer de manière parfaitement écologique car les sujets experts doivent posséder des caractéristiques exigeantes qui se rencontrent rarement et qui ne sont appréhendables que dans des domaines bien spécifiques (ces domaines sont d'ailleurs intensivement exploités, que ce soit les échecs ou le diagnostic médical, par exemple).

Si l'expertise est caractérisée par une certaine stabilité dans son acquisition, il est important de souligner que l'expertise n'est certainement pas une compétence statique, acquise une fois pour toute, qui n'évolue pas au cours du temps. Au contraire, l'expertise se développe continuellement à partir des expériences auxquelles la personne est exposée. Confronté à une nouvelle tâche, à un nouveau dispositif technique ou à une nouvelle utilisation de ce dispositif, le sujet tente d'exploiter ses connaissances antérieures pour les adapter, les orienter dans ce nouveau cadre d'activité (Poyet, 1993).

Outre ces deux grandes caractéristiques majeures, la description et la définition opérationnelle des qualités des experts et des novices varient largement selon les études. Par exemple, la littérature ne montre pas d'accord sur la flexibilité de l'expert : certaines études mettent en évidence une plus grande rigidité au niveau des stratégies chez l'expert alors que d'autres montrent au contraire plus de flexibilité et d'adaptation (Cellier, Eyrolle & Mariné, 1997 ; Amalberti, 1996).

2.2 Les différences novices – experts

L'étude de la différence entre la performance experte et novice a intéressé un grand nombre de chercheurs dans des domaines très divers. S'il est logique de penser que la performance experte est meilleure que celle d'un novice, il est important de souligner que cette supériorité n'est pas toujours mise en évidence et que la différence novice-

expert n'apparaît pas toujours de façon claire. La différence entre les experts et les novices dépendrait notamment des caractéristiques de la tâche (Shanteau, 1992 ; Sellen, Kurtenbach & Buxton, 1990).

Il existe toutefois certaines particularités comportementales pour lesquelles les experts et les novices diffèrent systématiquement. Ainsi, les experts possèdent de manière générale plus d'habiletés à produire des inférences, à anticiper les événements et ont une vue plus globale et fonctionnelle de la situation (Didierjean & Marmèche, 2005 ; Cellier et al., 1997). Les experts diffèrent également des novices dans leur façon de percevoir et d'appréhender l'environnement de leur domaine d'expertise. Chez les joueurs d'échecs par exemple, les experts sont capables de rappeler des patterns plus complexes (Chase & Simon, 1973) et ont un empan visuel plus grand que les novices (Reingold, Charness, Pomplun & Stampe, 2001). Cette différence est expliquée par la capacité des experts à constituer des « chunks³⁷ » qui contiennent un plus grand nombre d'informations que les novices. Cependant, les avantages liés à l'expertise disparaissent ou sont fortement réduits lorsque les pièces d'échec sont présentées dans un ordre ou une configuration inhabituels (Gobet & Simon, 1998), confirmant ainsi le caractère spécifique de l'expertise. En outre, les experts possèdent plus d'informations en mémoire à long terme et leur stratégie diffère de celle des novices dans la structure des connaissances activées et dans l'encodage des habiletés et des indices de récupération (Ericsson & Kintsch, 1995³⁸). Enfin, les experts ne traitent pas seulement les caractéristiques individuelles des situations mais aussi la relation entre elles (Gauthier & Tarr, 2002 ; Maurer, Legrand & Mondloch, 2002) et ce traitement est réalisé en parallèle chez les experts alors qu'il est opéré en série chez les novices (Reingold, Charness, Schultetus & Stampe, 2001).

2.3 *Les métaconnaissances dans le processus d'expertise*

Dans le contrôle de processus rapides et complexes, les opérateurs intègrent la représentation qu'ils se font de leurs propres ressources cognitives (connaissances, habiletés, limites...), afin d'établir un compromis entre le coût cognitif qu'ils doivent investir dans l'action et les ressources disponibles dans l'environnement. Valot, Grau & Amalberti (1993) définissent la notion de ressources cognitives comme étant la résultante dynamique de l'ajustement de trois composantes :

³⁷ Ensemble d'informations regroupées en un pattern cohérent qui a un sens pour le sujet. La mémoire de travail a une capacité de traitement limitée à 7 ± 2 chunks. Les experts et les novices ont donc des capacités en mémoire de travail limitées (par un nombre de chunks identique) mais les experts sont capables de regrouper une plus grande quantité d'informations avec des patterns plus complexes au sein de chaque chunk.

³⁸ Ces auteurs (Ericsson & Kintsch, 1995) ont notamment développé une théorie de la mémoire de travail à long terme pour rendre compte de la spécificité de la performance experte.

- Un ensemble de mécanismes cognitifs propres à l'individu (mémoire, attention, représentations mentales de toutes sortes, style cognitif...)
- Les effets des contraintes de l'environnement (types de traitements imposés, délais disponibles, complexité du système, effets mentaux et psychologiques du stress...). Si ces contraintes limitent les ressources utilisées ainsi que leur fiabilité et leur efficacité, l'environnement permet toutefois aussi d'améliorer les ressources et leur utilisation.
- Les effets de l'apprentissage qui inversement accroissent et optimisent l'exploitation des ressources.

La gestion de ces ressources consiste à définir des stratégies d'action compatibles avec les ressources disponibles, compte tenu d'un contexte donné pour atteindre le but souhaité ou le but le plus proche accessible. Les individus optimisent donc leurs actions en fonction de la connaissance qu'ils ont des caractéristiques de leur propre fonctionnement cognitif et de l'environnement (par exemple, l'efficacité des technologies disponibles).

Les métaconnaissances (savoir que l'individu possède sur ses propres connaissances, compétences et savoir-faire) jouent donc un rôle important dans la régulation de l'activité, dans la planification des actions et dans la prise de risque³⁹ (Amalberti, 1996 ; Valot et al., 1993). Selon Valot et al. (1993) Kruger et Dunning (1999, 2002), les experts posséderaient plus de métaconnaissances et ces dernières seraient plus correctes que celles de sujets novices, leur permettant ainsi une meilleure évaluation et régulation de la situation.

3 L'ACQUISITION D'HABILETÉS MOTRICES ET LA MÉMOIRE PROCÉDURALE

L'acquisition des habiletés motrices constitue un champ particulier dans le domaine de l'expertise et dépend d'ailleurs d'un système mnésique qui lui est spécifique : la mémoire procédurale (Tulving, 1995⁴⁰). Ce système est impliqué dans l'apprentissage d'habiletés motrices, perceptives (habiletés perceptivo-motrices) et cognitives

³⁹ Par exemple, un chirurgien peut continuer à opérer à partir d'écran flou jusqu'à ce qu'il l'estime possible en regard de ses ressources et de celles de son environnement avant de demander que la caméra soit nettoyée. Cependant, l'intervention ou remarque d'une tierce personne (assistant...) peut également anticiper la demande et diminuer ainsi la prise de risque.

⁴⁰ **Tulving** (1995) propose l'existence de cinq systèmes de mémoire :

- mémoire de travail (mémoire à court terme)
- mémoire à long terme qui comprendrait quatre systèmes indépendants
- mémoire sémantique
- mémoire épisodique
- mémoire procédurale
- systèmes de représentation perceptive (PRS)

implicites⁴¹ ainsi que dans le conditionnement. Ce système serait indépendant des autres types de mémoire et présenterait des modalités de fonctionnement spécifiques. Les informations (connaissances procédurales) traitées par ce système ne sont par exemple pas accessibles à la conscience. En outre, la mémoire procédurale n'est pas affectée de la même manière que les autres composantes mnésiques lors d'atteintes neurologiques ou dans certaines psychopathologies⁴².

3.1 Distinction entre connaissances procédurales et connaissances déclaratives

Les connaissances procédurales sont classiquement opposées aux connaissances dites déclaratives. Ces deux types de connaissance sont sous-tendus par des mécanismes différents et appartiennent à des systèmes mnésiques distincts. Les connaissances déclaratives sont caractérisées par une activation consciente, intentionnelle et contrôlée (coûteuse en termes de ressources attentionnelles) d'un souvenir mémorisé antérieurement. Elles sont modulaires, génériques et pas particulières à une situation. Elles sont également faciles d'accès, d'inspection et de modification (Rumelhart & Norman, 1983). Les connaissances procédurales sont activées quant à elles sur un mode automatique n'impliquant pas la conscience et ni le rappel de l'épisode au cours duquel l'information a été apprise. Elles servent à guider les actions et à agir sur le monde mais elles sont toujours spécifiques à une situation, ce qui leur confère à la fois une grande efficacité mais aussi une grande rigidité. Enfin, si les connaissances déclaratives peuvent être aisément verbalisées, les connaissances procédurales ne s'expriment et ne peuvent être étudiées qu'indirectement à travers l'action. Les modes d'investigation des deux types de connaissances sont donc différents et spécifiques à leurs caractéristiques.

3.2 Fonctionnement de la mémoire procédurale et acquisition des habiletés motrices

L'apprentissage de nouvelles habiletés motrices est une particularité essentielle du fonctionnement de la mémoire procédurale (Willingham, 1998). Opérant une distinction entre les connaissances procédurales et les connaissances déclaratives, Anderson (1983,

⁴¹ Les connaissances dépendant de la mémoire implicite s'expriment par une facilitation de la performance suite à l'acquisition antérieure d'informations (provenant d'une expérience antérieure) sans que le sujet ne doive récupérer consciemment l'expérience ou information antérieure. La mémoire implicite s'oppose à la mémoire explicite qui elle nécessite le rappel conscient d'un épisode spécifique d'apprentissage (Van der Linden & Grailet, 1998 ; Schacter, Chiu & Oschner, 1993).

⁴² Elle est, par exemple, spécifiquement préservée dans des maladies dégénératives du type Alzheimer (Willingham, Greenberg & Thomas, 1997 ; Gabrieli, Corkin, Mickel & Growdon, 1993), dans les cas d'amnésie (Squire, Konwlton & Musen, 1993) ainsi que dans certaines psychopathologies (par exemple, la schizophrénie, Takano et al., 2002).

1982) est le premier auteur à avoir proposé un modèle d'acquisition des habiletés. Ce dernier se divise en trois étapes selon un modèle d'apprentissage *top-down*⁴³ :

1) *Stade cognitif*

Dans cette première phase, l'acquisition des habiletés s'effectue à partir des connaissances déclaratives qui sont transmises au sujet. A ce stade, l'individu en apprentissage manipule explicitement les informations relatives à la tâche, aucun processus d'automatisation n'est perceptible et la maîtrise des habiletés motrices n'est pas satisfaisante : l'exécution des mouvements, simples ou en séquence, est lente, mal coordonnée et imprécise. La majorité des erreurs consiste en des erreurs de connaissances. En outre, les ressources attentionnelles du sujet sont très massivement mobilisées dans l'accomplissement de l'action, rendant difficile voire impossible la réalisation d'une autre tâche simultanée (situation de double tâche).

2) *Stade associatif*

Ce stade est caractérisé par le passage d'une représentation déclarative à une représentation procédurale. Cette transformation est notamment mise en évidence par un comportement qui devient de plus en plus fluide ainsi que par la disparition progressive des erreurs. Au cours de la répétition de la pratique, les mouvements sont graduellement accomplis plus rapidement et avec moins d'effort, d'une manière plus coordonnée et précise.

3) *Stade autonome*

Arrivé à cette étape, l'automatisation de l'habileté est accomplie : l'individu n'est plus capable de verbaliser la connaissance acquise, celle-ci relevant à présent de la mémoire procédurale, et il ne doit plus faire appel à la phase d'apprentissage pour réaliser correctement l'action. Les erreurs de connaissances observées au premier stade sont remplacées par des erreurs de routine. En outre, les demandes en ressources attentionnelles sont devenues faibles et la réalisation d'une autre activité simultanée est possible. Enfin, une fois ce stade atteint, l'habileté motrice sur-apprise peut être très rapidement retrouvée avec une performance raisonnable malgré de longues périodes sans pratique (Doyon, Penhume & Ungerleider, 2003). L'activation du comportement automatisé échappe alors au contrôle conscient, les actions sur-apprises prenant ainsi parfois le pas sur les actions attendues ou demandées qui sont moins automatisées alors que le sujet est tout à fait capable de rappeler verbalement la consigne expérimentale ou l'intention initiale (par exemple, dans le cas des ratés tels que décrits par Reason, 1993, 1990, ou dans les

⁴³ Le qualificatif *top down* étant utilisé ici pour décrire un processus qui part des connaissances vers l'action.

persévérations comportementales mises en évidence chez les patients qui ont subi des dommages au niveau des lobes frontaux, Humphreys, Forde et Francis, 2000). Ces données confirment la dissociation établie entre les connaissances déclaratives, qui sont explicites et contrôlées et qui peuvent être exprimées verbalement, et les connaissances procédurales, automatisées, qui échappent au contrôle conscient et qui ne peuvent être exprimées par la modalité verbale.

Comme la plupart des modèles ultérieurs qui proposent une distinction entre les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales et qui adoptent une approche *top-down* (Jones et VanLehn, 1994 ; Rosenbloom et al., 1993), ce modèle n'est pas entièrement satisfaisant et ne peut rendre compte de tous les apprentissages⁴⁴. En effet, ce type d'approche ne permet pas d'expliquer l'apprentissage d'habiletés indépendamment ou en l'absence de connaissances préexistantes et explicites du domaine comme c'est le cas, par exemple, dans l'apprentissage implicite ou dans le conditionnement instrumental (Sun, Merrill & Peterson, 2001).

De nombreuses recherches montrent pourtant que les individus peuvent apprendre à réaliser des habiletés complexes sans avoir acquis auparavant une grande quantité de connaissances déclaratives explicites (notamment, Posner et al., 1997 ; Schraagen, 1993 ; Lewicki et al., 1992 ; Willingham, Nissen & Bullemer, 1989 ; Stanley et al., 1989 ; Berry and Broadbent, 1988 ; Reber, 1989 ; Karmiloff-Smith, 1986 ; Schacter, 1987). Berry et Broadbent (1988) ont montré que les sujets étaient capables de réaliser leur tâche sans avoir acquis auparavant de connaissances déclaratives et sans être capables de verbaliser les règles qu'ils utilisaient pour réaliser la tâche. Nissen et Bullemer (1987) et Willingham et al. (1989) démontrent aussi que les connaissances procédurales ne doivent pas être toujours précédées par des connaissances déclaratives dans l'apprentissage humain et que les deux types de connaissances ne sont pas nécessairement corrélés. Il existe même des indications selon lesquelles les connaissances explicites pourraient provenir des habiletés procédurales dans certaines circonstances (Stanley et al., 1989 ; Reber et Lewis, 1977 ; Rabinowitz et Goldberg, 1995 qui montrent que le développement et l'apprentissage des connaissances déclaratives et procédurales peuvent s'opérer en parallèle, séparément). En résumé, plusieurs données et théories indiquent que l'apprentissage peut s'opérer des connaissances procédurales vers les connaissances déclaratives (l'inverse étant également possible) et donc, que l'étude de l'apprentissage *bottom-up* des habiletés peut se trouver justifiée aussi bien au niveau théorique qu'empirique (Sun et al., 2001).

⁴⁴ Ainsi, la première phase n'existe pas toujours (par exemple, dans les cas d'apprentissage implicite).

De plus, les connaissances procédurales sont habituellement très efficaces et utiles une fois qu'elles ont été développées et qu'elles peuvent travailler indépendamment sans impliquer les connaissances déclaratives (Anderson, 1982, 1983, 1993). Cependant, les connaissances déclaratives restent utiles dans beaucoup de situations : elles peuvent accélérer le processus d'apprentissage lorsqu'elles sont construites en même temps (*on line*) que l'apprentissage des habiletés motrices (Sun, Peterson & Merrill, 1996), elles peuvent faciliter le transfert des habiletés en accélérant l'apprentissage de nouveaux exercices (Sun & Peterson, 1997, 1998 ; Willingham et al., 1989) et elles peuvent être utiles lors de la communication des connaissances et des habiletés à autrui (Sun et al., 2001). En outre, Ericsson et Lehman (1996) montrent que la performance experte n'est pas basée sur l'utilisation exclusive des connaissances procédurales, les experts ayant également recours à des raisonnements de haut niveau impliquant les connaissances déclaratives.

Enfin, les habiletés ne sont pas nécessairement classées dans une catégorie rigide et fermée (procédurale, automatique versus déclarative, contrôlée). En effet, les habiletés peuvent être plus ou moins automatisées (sur une échelle progressive plutôt qu'en tout ou rien), certaines composantes étant quasi impossibles à verbaliser, d'autres pouvant être décrites de manière approximative par la personne qui les réalise.

Suite à toutes ces différences mises en évidence entre les connaissances déclaratives et procédurales en ce qui concerne la représentation et l'apprentissage, Sun et al. (2001) proposent une architecture à deux niveaux ; le niveau *top* encode les connaissances déclaratives explicites qui sont accessibles à la conscience et le niveau *bottom* encode les connaissances procédurales implicites. Il y aurait des différences au niveau des représentations (les deux niveaux emploieraient deux types différents de représentations qui auraient des degrés d'accessibilité différents) et au niveau des processus d'apprentissage (qui ne seraient pas exclusivement *top-down*). Pour permettre à un individu d'apprendre continuellement à partir de l'expérience en cours dans le monde, les deux types de connaissances déclaratives et procédurales devraient être acquises de façon progressive, en temps réel et de façon simultanée (Sun et al., 2001).

3.3 Méthodes d'investigation des connaissances procédurales et des habiletés motrices

A l'opposé des autres formes de mémoire, les changements dans la performance motrice sont connus pour évoluer lentement, exigeant de nombreuses répétitions au cours de plusieurs séances d'entraînement (Doyon et al., 2003 ; Karni, 1996). Cependant, des

études psychophysiques récentes ont affiné cette description et ont démontré que l'acquisition d'une habileté motrice suivait deux étapes distinctes détaillées comme suit : tout d'abord, une phase d'apprentissage précoce et rapide durant laquelle une amélioration considérable de la performance peut être obtenue au cours d'une seule session d'entraînement ; et ensuite, une étape plus tardive et lente dans laquelle davantage de gains peuvent être observés au fil de plusieurs sessions (et même semaines) de pratique (Doyon et al., 2003 ; Brashers-Krug, Shadmehr & Bizzi, 1996). En plus de ces deux étapes, une phase intermédiaire correspondant à une période de consolidation de la routine motrice a récemment été proposée suite aux gains de performance rapportés après une période de latence de plus de 6 heures après la première session d'entraînement et cela, sans pratique supplémentaire (Doyon et al., 2003 ; Karni et Sagi, 1993). En outre, il n'existerait peu ou pas de risque d'interférence avec une tâche compétitive si cette dernière est administrée après une période critique de 4 à 6 heures (Brashers-Krug et al., 1996). Enfin, avec la pratique, les habiletés comportementales deviendraient de plus en plus résistantes à la fois aux interférences et au passage du temps (Penhune & Doyon, 2002).

La connaissance procédurale n'est pas accessible à la conscience et ne peut être démontrée qu'indirectement sous la forme d'actions. Deux paradigmes sont habituellement différenciés dans l'étude de l'apprentissage moteur (Doyon et al., 2003) : l'apprentissage d'une séquence motrice, dans lequel le sujet apprend une succession de plusieurs mouvements qui forment graduellement une entité comportementale intégrée, et l'adaptation motrice au cours de laquelle la capacité du sujet à compenser des changements de l'environnement est évaluée.

Dans la plupart des études sur l'acquisition des habiletés motrices, les sujets doivent réaliser une séquence de mouvements qu'ils ont appris ou connaissent au préalable, découvrir une séquence particulière par essai et erreur ou suivre un ensemble de stimuli visuels qui apparaissent en séquence sur un écran (Doyon et al., 2003 ; Willingham, 1998). Les tests classiquement utilisés dans les recherches sur les habiletés perceptivo-motrices sont les suivants⁴⁵ : poursuites visuo-manuelles, lecture de mots en miroir, dessin en miroir, résolution de puzzle (épreuve d'assemblage de puzzle), manipulation d'un ordinateur (dactylographie), sortir au plus vite d'un labyrinthe, poursuite d'un objet en rotation, et adaptation de la performance avec des lunettes contenant des prismes ou des lentilles qui déforment ou déplacent l'environnement (Martin et al., 1996 ; Welch et al., 1993). Certains auteurs appartenant au courant ergonomique

⁴⁵ Des tests ont également été construits afin d'investiguer les habiletés cognitives de plus haut niveau, tels que l'acquisition de stratégies dans l'ordre des actions (par exemple, la tour de Hanoï), la catégorisation (par exemple, le Wisconsin Card Sorting Test), l'apprentissage implicite de grammaires artificielles (Meulemans & Van der Linden, 2003), etc.

reprochent aux recherches contemporaines sur les habiletés motrices de ne porter leur intérêt que sur des activités très basiques qui ne reflètent pas la complexité et la variété des tâches à réaliser dans le monde réel (Baber, 2006).

L'apprentissage des habiletés motrices est habituellement mesuré par une diminution du temps de réaction et du nombre d'erreurs, et/ou par un changement dans la synergie et la cinématique des mouvements (Doyon et al., 2003).

3.4 Rôle du feedback proprioceptif dans l'acquisition des habiletés motrices

Le feedback, ou retour sur l'action, qui permet d'évaluer l'adéquation d'un comportement ou d'un mouvement, est nécessaire dans tout processus d'apprentissage ainsi que dans nos interactions avec l'environnement. Le feedback peut prendre des formes multiples : de l'évaluation subjective de l'individu à une réponse objective de l'environnement.

Parmi les retours sur l'action les plus basiques, le rôle de l'information proprioceptive dans l'acquisition des habiletés est toujours sujet à débat, certains auteurs montrant son caractère indispensable alors que d'autres nuancent la nécessité de sa présence (Willingham, 1998).

Il existe en effet de multiples façons d'acquérir des habiletés motrices, qui s'appuient sur des feedbacks qui peuvent être très divers. L'homme étant un être social et son activité trouvant son origine et prenant souvent place en présence d'autres individus, les travaux sur la cognition située ont apporté des éléments intéressants sur l'acquisition des habiletés, qui intègrent la dimension sociale (Hutchins, 1995). Une des composantes essentielles et constamment utilisée dans les apprentissages au sein d'un contexte comprenant plusieurs acteurs, est l'observation et l'imitation de personnes expertes (Ericsson, 1994). Plusieurs études ont ainsi mis en évidence la capacité d'apprendre des nouvelles habiletés motrices sans pratique, et ont de la sorte remis en question la nécessité des informations proprioceptives dans le processus d'acquisition d'habiletés motrices (voir notamment l'apprentissage vicariant, Blandin, Proteau & Alain, 1994).

Selon Willingham (1998), une explication de cette contradiction, mise en évidence par diverses études, entre la nécessité du feedback proprioceptif lors de l'acquisition des habiletés motrices et la possibilité d'apprentissage en l'absence d'un tel feedback (dans l'apprentissage vicariant, par exemple) tient au fait que l'apprentissage réalisé sans l'intervention des processus conscients nécessiterait des feedbacks proprioceptifs tandis qu'un apprentissage contrôlé par des mécanismes conscients pourrait s'opérer sans le recours à l'information proprioceptive. L'apprentissage par imitation impliquerait des

mécanismes plus conscients, les feedbacks proprioceptifs n'étant pas disponibles dans ces conditions (Willingham, 1998).

Enfin, l'imitation n'est pas une pratique réservée aux enfants dans leur développement. Cette stratégie comportementale et d'apprentissage est très répandue dans de nombreux domaines et est souvent utilisée de façon efficace (que ce soit dans des situations de la vie quotidienne, dans le sport ou sur le lieu de travail). Elle constitue d'ailleurs un élément fondamental dans le processus d'apprentissage de la chirurgie, domaine qui nous intéresse spécifiquement, car c'est sur le terrain, dans la salle d'opération, par l'observation attentive des gestes et manipulations du chirurgien que l'assistant apprend dans un premier temps à reproduire ces gestes, qu'il effectue ensuite lui-même sous la direction de l'expert.

4 CONCLUSION

Au début de ce chapitre, nous avons mis en évidence que toute action était médiatisée par l'utilisation d'un instrument. A partir de ce postulat, la théorie de l'activité tente de répondre notamment à la question suivante : comment l'introduction d'un nouvel instrument modifie-t-elle les relations sujet-objet en fonction de l'expertise et des schèmes d'actions développés auparavant ?

La revue de la littérature concernant l'expertise et l'acquisition des habiletés a fait émerger deux autres interrogations sous-jacentes, en rapport avec l'utilisation et l'appropriation d'un outil, liées aux caractéristiques qui définissent classiquement l'expertise :

Si le concept d'expertise s'applique à un domaine, est-il valide pour un instrument ? En d'autres termes, peut-on affirmer que le chirurgien développera une véritable expertise instrumentale à côté de son expertise classiquement rattachée à son domaine ?

Si l'expertise est apprise et stable, comment est-elle transférée d'une technologie à l'autre, bref d'un instrument à l'autre ? Quelles sont les modalités d'apprentissage mises en œuvre lors du transfert d'une technologie à une autre ?

Peut-on opérer une scission entre l'instrument et la tâche qu'il sert à réaliser ? Reconnaît-on l'expertise et les habiletés acquises à la réalisation d'une tâche ou à l'utilisation de l'outil ? Dans les théories classiques sur l'expertise et l'acquisition des habiletés, ces deux processus sont étudiés indépendamment de l'utilisation d'un instrument. Un des objectifs de notre travail sera de comprendre si cette utilisation de l'outil est partie intégrante de l'expertise, prise dans sa globalité.

Par ailleurs, si l'expertise et l'acquisition des habiletés font intervenir des mécanismes *top-down* pour diriger et contrôler les actions (la plupart des activités humaines étant finalisées, motivées, orientées par des objectifs, Amalberti, 1996), nous avons vu que l'expression de l'expertise et des habiletés acquises pouvait aussi dépendre de l'intervention de processus *bottom-up* et être fonction du contexte dans lequel l'action prend place.

Une étude dans le contexte d'une situation réelle nous permettra d'analyser ces phénomènes chez de vrais experts au travers d'activités finalisées, ayant un sens pour les sujets, et nous assurera ainsi de la validité écologique de nos observations. Pour cela, nous avons choisi le domaine particulier qu'est la chirurgie minimale invasive, où la dimension instrumentale occupe une place de plus en plus importante.

CHAPITRE IV

CONTEXTE D'ETUDE : LA CHIRURGIE MINIMALE INVASIVE

1 L'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE : BUTS ET CONSÉQUENCES

L'introduction de nouvelles technologies dans un environnement vise à trois buts essentiels qui sont : l'éloignement progressif de l'opérateur, la recherche d'une performance toujours supérieure et la recherche d'une sécurité renforcée (Amalberti, 1996). Comme nous le développons au sein de ce chapitre, ces trois composantes caractérisent également l'évolution de la technologie en médecine, notamment dans le domaine qui nous intéresse, la chirurgie.

1° L'éloignement de l'opérateur. Les nouvelles technologies éloignent de plus en plus l'opérateur de l'objet sur lequel il agit ; il n'est plus en contact direct avec l'objet, et bien souvent, il ne peut plus en avoir qu'une image, sans contact tactile, sans possibilité de le manipuler directement, rompant ainsi le lien naturel qui lie la perception à l'action. Dès lors, le feedback des actions n'est plus que visuel puisque tout autre moyen d'obtenir des informations sur les actions entreprises a disparu. Cette situation est évidemment celle des environnements virtuels dans lesquels la plupart des feedbacks (tactile, retour de force...) ont disparu pour laisser seule l'image, mais elle caractérise également des environnements réels tels que la chirurgie. Ces changements et éloignements par rapport à l'objet d'action ne sont pas sans conséquences pour l'acteur. Ils demandent la reconstruction et une restructuration des connaissances, savoirs et savoir-faire. Cette élaboration est individuelle et finalisée en fonction des interactions avec le milieu pour agir sur celui-ci, l'utiliser ou le transformer (Weill-Fassina et al., 1993).

2° La recherche d'une performance supérieure. La technologie a notamment pour but de dépasser certaines limites de l'activité humaine, en remplaçant ou en augmentant les ressources disponibles pour la supporter. Deux types de nouvelles technologies sont classiquement différenciées : les outils-prothèses qui pallient les déficiences humaines et les outils-instruments qui permettent à l'opérateur compétent de réaliser des tâches (Leplat, 1991). Plus récemment, une distinction a été opérée entre la réalité augmentée et la réalité virtuelle : la première a pour fonction d'augmenter, plutôt que de remplacer, les capacités perceptives et motrices de l'être humain dans et sur le monde réel ; la

seconde a pour but de remplacer la perception du monde réel par celle du monde artificiel (Ronald, 1997 ; Sharma & Molineros, 1997 ; Rolland et al., 1995).Le paradigme de la réalité augmentée a pour objectif de favoriser l'interaction de l'utilisateur avec le monde réel et virtuel. La réalité augmentée vise à permettre à l'utilisateur de rester au contact de l'environnement réel sur lequel il travaille, en associant des capacités de traitement complémentaires, directement à son environnement et aux objets réels impliqués dans la tâche (Dubois, 2001). Contrairement à la réalité virtuelle, en réalité augmentée, le sujet continue à traiter avec des objets de l'environnement réel et ses actions ont un impact réel sur l'environnement physique qui l'entoure. La réalité augmentée privilégie donc les moyens d'interaction naturels de l'utilisateur.

3° La recherche d'une sécurité renforcée. Au-delà de la volonté d'une performance accrue, les nouvelles technologies ont également l'objectif de renforcer la sécurité et de réduire le nombre d'incidents/accidents, que ce soit en fournissant des systèmes d'alarme perfectionnés ou des systèmes de protection très élevée, etc. Malgré ce souhait, plusieurs auteurs ont mis en évidence la complexité du travail, accrue par le développement des nouvelles technologies, comme facteur contribuant à des accidents multiples (Nyssen, 2004, 1997 ; Reason, 1990, 1993 ; Leplat, 1991). Si les innovations technologiques améliorent sans aucun doute la qualité et la sécurité des opérations, l'introduction d'une nouvelle technologie dans un domaine de travail provoque un changement et crée de nouvelles demandes à l'opérateur qui peuvent conduire à de nouvelles formes d'erreurs (Nyssen, 1997 ; De Keyser & Nyssen, 1993). A ce sujet, nous reprendrons à Amalberti (1996, p.28) sa réflexion qui illustre le caractère paradoxal de l'évolution technologique : « les systèmes technologiques sont devenus beaucoup plus performants en étant objectivement bien plus fiables que leurs lointains prédécesseurs, mais les risques résiduels, très faibles, sont devenus plus intolérables qu'auparavant ».

2 EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES EN CHIRURGIE

La chirurgie, comme toute situation de travail complexe et à risque, a connu de profonds et surtout rapides changements avec l'introduction des nouvelles technologies et des nouvelles procédures (Chitwood & Krummel, 2004). Celles-ci ont à chaque fois constitué une révolution, aussi bien dans l'acquisition de nouvelles habiletés que dans les processus d'acceptation psychologique des nouveaux outils. L'introduction d'un nouvel élément dans un environnement oblige les individus à changer leurs habitudes

et/ou procédures bien établies : c'est particulièrement vrai pour une nouvelle technique qui suscite toujours à la fois fascination et curiosité mais également peur, incompréhension ou énervement.

En chirurgie, la perception et l'action sont intimement liées (reconnaissance des organes, prise de décisions, diagnostic, gestes invasifs, orientation dans l'espace, changements rapides de l'environnement...). La chirurgie constitue donc un terrain de recherche naturel idéal pour examiner les liens entre la perception et l'action (Dominguez, 2001). Elle présente un intérêt considérable pour l'étude de notre propos et cela, à deux niveaux particulièrement. Tout d'abord, l'utilisation des nouvelles technologies en chirurgie a rompu le lien naturel qui existe entre la perception et l'action et a créé une mise à distance entre le chirurgien et le patient, par l'introduction d'interfaces utilisant des images en 2D (laparoscopie classique) ou en 3D (chirurgie robotique) et des instruments au maniement complexe. Ensuite, ce terrain constitue une garantie pour la validité écologique de nos données, qui concerneront des sujets réellement experts ou novices impliqués dans des activités authentiques et complexes à caractère finalisé et pourvues de sens pour les sujets. Ce chapitre a pour objectif de présenter de façon détaillée les deux techniques de chirurgie minimale invasive que nous avons utilisées dans nos études.

2.1 La chirurgie minimale invasive, une révolution technologique dans les salles d'opération

L'introduction de la laparoscopie (par opposition à la laparotomie) ou coelioscopie, procédure qui est actuellement généralisée, a constitué la grande révolution technologique des années 90 dans les procédures chirurgicales (Satava, 1993). En 1991, plus de 200 000 chirurgies minimales invasives ont été pratiquées aux Etats-Unis et ce nombre fut estimé à 5 millions en 1995 (Grimbergen, 1997).

La chirurgie minimale invasive a, comme son nom l'indique, pour but de réduire le plus possible les intrusions au sein du corps du patient. Elle est caractérisée par la mise en place de trocarts⁴⁶ (fig. 6) dans le corps du patient au travers desquels la caméra (appelée endoscope⁴⁷) et les instruments sont introduits pour atteindre les organes à opérer. Cette technique, qui procède par très petites incisions, a significativement réduit

⁴⁶ Les trocarts doivent avoir le diamètre le plus petit possible (les risques de blesser les vaisseaux connexes sont réduits si on utilise des trocarts de 5 mm au lieu de 10 mm, Cadière & Leroy, 1999). De plus, la miniaturisation continue des instruments permet l'emploi de trocarts de plus en plus fins.

⁴⁷ Un endoscope est précisément un appareil optique muni d'un dispositif d'éclairage, destiné à être introduit dans une cavité du corps humain pour l'examiner.

le dommage aux tissus sains qui, en chirurgie ouverte classique, sont incisés afin d'atteindre le site à opérer.

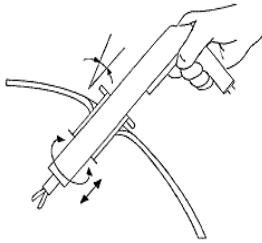


Fig. 6 : Degrés de liberté des instruments de laparoscopie classique

Depuis son introduction dans les salles d'opération au début des années 90, la chirurgie minimale invasive a rapidement montré ses avantages sur la chirurgie conventionnelle ouverte (Z'Graggen et al., 1998 ; Shea et al., 1996 ; Mac-Mahon, Sheahan, Malone & Coakley, 1994). Ses nombreux atouts en ont fait la technique « *gold standard* » utilisée pour la majorité des opérations digestives, urologiques et gynécologiques (Saeian & Reddy, 1999).

L'intérêt de l'utilisation généralisée de cette pratique s'explique à plusieurs niveaux. Dans l'optique de la conception des nouvelles technologies dans les soins de santé, la priorité et les bénéfices les plus considérables se situent tout d'abord au niveau clinique, pour le patient. Dans les procédures par laparoscopie, les très petites incisions nécessaires pour introduire les trocarts réduisent drastiquement la taille des cicatrices par rapport à celles que les patients gardaient à l'issue d'une chirurgie conventionnelle ouverte. Outre l'avantage de préserver les tissus connexes sains, la taille très réduite des cicatrices diminue considérablement les douleurs post-opératoires ainsi que les risques d'infections et de complications qui peuvent survenir dans les suites d'une intervention chirurgicale⁴⁸. Cela permet également un rétablissement plus rapide du patient, ce qui améliore le bien-être de celui-ci et diminue la durée d'hospitalisation et du délai de reprise du travail, et de cette façon, le coût financier post-opératoire (Hunter, 2001 ; Boccasanta et al., 1999 ; Donini et al., 1999 ; Shea et al., 1996).

Cette procédure comporte également des avantages pour le chirurgien et son équipe (voir Fig. 7). L'image reproduite par la caméra sur l'écran est très fortement agrandie, permettant une vision bidimensionnelle des organes dans une taille supérieure à leur

⁴⁸ C'est une des raisons pour lesquelles généraliser les procédures par coelioscopie dans les pays en voie de développement ne constitue pas un luxe inutile mais se révèle être d'un intérêt réel dans ces régions où les décès ou complications post-opératoires sont principalement dus à des infections (Andreu, Cadière & Germa, 1999 ; Cadière, Himpens & Bruyns, 1996 ; Cadière & Fernandez, 1995).

taille réelle et cela, sans obstruction par des organes qui entravent la vue en chirurgie conventionnelle ouverte (Grimbergen, 1997).

L'image projetée sur l'écran permet également à l'équipe entière d'être impliquée dans la procédure et dans l'action du chirurgien en suivant ses mouvements sur l'écran. Cette configuration de la salle d'opération a un impact sur l'organisation de l'équipe : l'infirmière instrumentiste peut, par exemple, préparer à l'avance certains instruments ou produits, l'assistant peut anticiper certains mouvements, tous ayant un même référent visuel de l'action.

Enfin, cette technique par l'image comporte aussi un avantage sur le plan pédagogique : elle permet d'enseigner plus facilement et directement la chirurgie et l'anatomie aux étudiants et assistants, qui peuvent observer précisément les organes et les manipulations que le chirurgien effectue (Faul, 1993).



Fig. 7 : Configuration de la salle d'opération lors d'une laparoscopie classique

Cependant, comme le soulignent Dion & Gaillard (1997), la chirurgie minimale invasive accroît la complexité de l'acte chirurgical. En chirurgie ouverte, le chirurgien voit directement le site dans sa globalité, il peut toucher les organes, évaluer leur taille, sentir la texture, la normalité ou l'anormalité dans la force, dans la consistance des tissus, pour évaluer leur condition et s'orienter dans le corps. La laparoscopie transforme cette approche directe et procure un certain nombre de désavantages, particulièrement pour le chirurgien : elle crée un environnement non naturel (artificiel) où le chirurgien a perdu un grand nombre d'indices à partir desquels il contrôlait et dirigeait son action, ses prises de décision et ses diagnostics en chirurgie ouverte conventionnelle. Une nouvelle interface chirurgien/patient est créée et consiste en des caméras de fibres-optiques, en moniteurs de TV, de minuscules incisions et d'instruments ayant la forme de longues tiges. Cette interface ajoute une barrière entre le chirurgien et son environnement de travail et rompt le lien naturel entre la perception

et l'action. Les conséquences essentielles de cette rupture et de cette mise à distance sont l'information perceptive qui est difficile à établir et les habiletés motrices qui sont techniquement très exigeantes (Cuschieri, 1995 ; Satava & Ellis, 1994). Les inconvénients majeurs de la chirurgie laparoscopique peuvent être décrits à un niveau perceptif, instrumental et plus généralement ergonomique.

a) niveau perceptif

Plusieurs inconvénients se posent au niveau de la perception (notamment visuelle et tactile) du site à opérer. En chirurgie, la perception visuelle et la perception tactile sont hautement couplées avec l'action. Cependant, l'introduction de la technique laparoscopique provoque une interruption du lien perception-action (Dominguez, 2001). Le chirurgien perd le contact direct, visuel et tactile avec le site opéré (Grimbergen, 1997).

Avec la distance qui est créée entre le chirurgien et l'organe qu'il manipule, le contact tactile et la palpation 'atraumatique'⁴⁹ disparaissent et avec eux, tous les feedbacks et les moyens de diagnostic qui sont basés sur ces informations.

L'image vidéo devient la seule source d'information dont dispose le chirurgien. Sa qualité joue donc un rôle crucial (Huber et al., 2003 ; Dawson & Kaufman, 1998) puisque c'est sur base de cette seule image que le chirurgien identifie les organes, dirige et évalue l'ensemble de ses actions (Berber & Siperstein, 2001). Même si le champ de vision est large, le chirurgien opère à partir d'une image en deux dimensions et perd ainsi les indices visuels binoculaires naturels de profondeur. Il doit donc principalement se baser sur les indices visuels monoculaires pour diriger ses gestes et contrôler ses actions⁵⁰, ce qui nécessite une excellente coordination oculomotrice (Tendick et al., 1993) et l'application de manipulations différentes (Birkett, Josephs & Este-McDonald, 1994). Comme nous l'avons détaillé au sein du premier chapitre, le traitement de l'image en 2D est lent, conscient et coûteux en termes de ressources cognitives. Les principales conséquences de ce type de traitement sont une durée d'apprentissage considérable pour pallier le manque de profondeur binoculaire (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1997), une diminution de l'attention aux autres événements et une fatigue visuelle qui peut survenir rapidement (Geis, 1996). Ces différents composants représentent certains des facteurs de risques classiquement identifiés dans la littérature sur l'erreur humaine (Amalberti, 1996 ; Reason, 1993, 1990).

⁴⁹ On parle de doigt ou de palpation 'atraumatique' pour désigner le toucher qui, par sa composante proprioceptive, présente moins de risque d'altérer les tissus par opposition aux instruments rigides et potentiellement traumatiques qui peuvent endommager les tissus ou organes.

⁵⁰ Stratégie qui demande, comme nous l'avons vu au chapitre, un long apprentissage (Marotta et al., 1997).

Dans le cas de la laparoscopie, les études ont montré que les informations monoculaires de l'image vidéo, limitées et ambiguës, obligent les chirurgiens à adopter une manière de fonctionner différente qu'en chirurgie classique, en agissant avec un plus grand degré d'incertitude et en utilisant des points de repère⁵¹ (Cao & Milgram, 2000). Le chirurgien doit par exemple évaluer la position des instruments en touchant l'organe qui doit être manipulé et ainsi déterminer leur position avant de les utiliser (Dion & Gaillard, 1997 ; Birkett et al., 1994).

Enfin, la vue en laparoscopie est indirecte et limitée : le champ de vision du site est partiel et ne reprend que ce qui est montré par la caméra. Cette vue partielle pose des problèmes d'orientation. Elle oblige également le chirurgien à se représenter mentalement les organes qu'il ne perçoit pas dans son champ visuel et requiert une nouvelle structuration de la connaissance anatomique, induisant de cette manière une nouvelle stratégie et technique de dissection (Cadière et Leroy, 1999 ; Cadière et al., 1998).

b) niveau instrumental

L'acquisition et la pratique des habiletés en laparoscopie constituent un exemple caractéristique de tâche de mémoire procédurale tel que décrit dans le chapitre précédent. La laparoscopie est par excellence une tâche qui demande une forte intégration perceptivo-motrice⁵², comme la plupart des épreuves utilisées dans ce contexte théorique. Elle exige l'apprentissage d'une nouvelle correspondance entre les actions et leurs feedbacks, qui se réalise en général de manière implicite sans recours à une connaissance ou à des mécanismes de correction conscients. Trois éléments centraux sont à commenter dans les difficultés que posent l'apprentissage et la pratique de la laparoscopie à un niveau instrumental : l'effet levier, la rupture de l'axe œil-main (regard-geste) et les caractéristiques intrinsèques des instruments utilisés.

- L'effet levier. Les instruments sont introduits à travers des trocarts placés à des points d'entrée fixes produisant ainsi un effet levier (voir fig.6), les mains du chirurgien et le bout des instruments laparoscopiques se dirigeant dans des

⁵¹ Ainsi, les problèmes d'identification d'organes dus à l'ambiguïté de l'image sont à la source de nombreuses complications et même de décès suite à un dommage occasionné à un organe ou tissu mal identifié (Lo & Yuen, 1999). L'amélioration de la qualité des images permet cependant une identification de plus en plus précise des organes, ouvrant ainsi la voie vers la télé-médecine, les vidéo-conférences et les consultations opératoires en temps réel par connexion internet (Broderick, Harnett, Doarn, Rodas & Merrell, 2001).

⁵² Selon Willingham (1998), toutes les tâches pour lesquelles le site d'action d'un objet ne correspond pas à celui de la localisation de l'objet (ce qui est le cas dès qu'un outil est utilisé comme intermédiaire entre le sujet et l'objet) exigent l'apprentissage d'une intégration perceptivo-motrice.

directions opposées (Satava & Ellis, 1994). Habituellement, le mouvement de préhension, qui est basé sur une représentation spatiale égocentrique, est assez naturel car il suit la même direction que celle où est localisé le stimulus. Cependant, en laparoscopie classique, avec l'effet levier, cette concordance n'est pas automatique. En outre, les mouvements de contrôle de l'endoscope et des instruments sont effectués en miroir par rapport au feedback du mouvement tel qu'il est présenté sur le moniteur (Breedveld & Wentink, 2001). L'effet levier et le feedback en miroir créés en laparoscopie présentent d'importantes analogies avec les tâches perceptivo-motrices utilisées dans les expérimentations classiques de mémoire procédurale telles que celle du dessin en miroir.

- La rupture de l'axe naturel œil-main. Les inconvénients produits par l'effet levier et le feedback en miroir sont accentués par la rupture de l'axe naturel dans lequel le regard suit le mouvement de la main pour contrôler son action (Verwey, Stroomer, Lammens, Schulz & Ehrenstein, 2005; Previc, 1998). En laparoscopie, le regard n'est plus dirigé vers la main mais dans une direction (l'écran) qui ne correspond pas à l'endroit où est réellement exécuté le mouvement. Cette disposition est notamment à l'origine des problèmes de position des instruments et de la caméra ainsi que des erreurs d'orientation, obstacles qui diminuent la performance et qui demandent une période d'entraînement longue et intensive pour être dépassés (Breedveld & Wentink, 2001 ; Cao & Milgram, 2000 ; Wentink, 2000 ; Satava & Ellis, 1994). Très récemment, Verwey et al. (2005) ont étudié de manière plus approfondie l'impact de cette rupture de l'axe regard-action sur les performances en laparoscopie. Ces auteurs ont montré que l'effet néfaste de l'information de feedback en miroir peut être modéré par l'angle entre les positions du stimulus et de la réponse. Dans leur étude, l'angle idéal pour réduire les inconvénients de l'effet miroir est de 45°. A 90° (position très fréquente en MIS⁵³), la performance est significativement moins bonne, même si elle s'améliore avec l'apprentissage pour certaines tâches (mais, toutefois, pas pour toutes). Si l'angle est de 0°, la performance est aussi déficitaire mais, de plus, elle ne montre aucune amélioration avec l'apprentissage. Il semblerait que dans ce cas, le sujet regardant dans la même direction que celle où il agit, serait incapable d'ignorer l'information conflictuelle provoquée conjointement par l'effet miroir et l'effet levier (Verwey et al., 2005).

⁵³ Position que nous avons également adoptée dans nos études en raison de son caractère écologique par rapport aux situations de chirurgie minimale invasive réelles.

- Les caractéristiques intrinsèques des instruments utilisés. En chirurgie laparoscopique, le mouvement de préhension n'est plus directement réalisé avec le doigt 'atraumatique' mais par des instruments longs, rigides et effilés dont les degrés de liberté de mouvement sont limités (seulement 4 degrés de liberté, voir figure 6, Shah, Mackay, Rockall, Vale & Darzi 2001 ; Grimbergen, 1997 ; Crosthwaite, Chung, Dunkley, Shimi & Cuschieri, 1995 ; Cuschieri, 1991) et avec lesquels il est risqué d'exercer une traction appuyée sur les organes sans les blesser (Cadière & Leroy, 1999). En outre, leur longueur et rigidité amplifient considérablement le tremblement physiologique naturel. Pour compenser ce tremblement, les gestes doivent être plus lents, augmentant ainsi le temps opératoire. Par ailleurs, plusieurs auteurs critiquent le choix plus restreint et le développement des instruments laparoscopiques ; ce dernier est principalement dicté par les avancées technologiques, alors que le confort physique, cognitif et émotionnel des utilisateurs sont très peu pris en compte par les concepteurs (Stone & McCloy, 2004 ; Van Veelen, Goossens, Jakimowicz, Snijders, Jacobs & Meijer, 2001⁵⁴ ; Breedveld & Wentink, 2001 ; Grimbergen, 1997 ; Satava & Ellis, 1994). Enfin, l'apprentissage des mouvements dans lesquels un instrument est inséré entre le sujet et l'objet est parfois long⁵⁵, particulièrement lorsque le mouvement à acquérir est fin et se développe dans un environnement complexe (Willingham & Koroshetz, 1993).

Enfin, à un niveau plus général, les procédures sont souvent longues, la position du chirurgien n'est absolument pas confortable, une fatigue musculaire importante peut survenir au bout de plusieurs heures de manipulation des instruments de coelioscopie. La caméra est sous le contrôle d'un tiers, le plus souvent l'assistant qui est assez limité dans les actions qu'il peut entreprendre. De l'autre main, l'assistant écarte les organes voisins afin de présenter la meilleure exposition possible au chirurgien qui opère à deux mains (Cadière & Leroy, 1999). Les pinces utilisées pour améliorer l'exposition sont potentiellement traumatiques et sortent souvent du champ de vision, présentant un risque de lésion des organes connexes.

⁵⁴ Van Veelen et al. (2001) pointent également le manque de standardisation dans la conception des instruments laparoscopiques ainsi que leur caractère multifonctionnel, les instruments n'étant pas spécifiquement conçus pour leur fonction principale et menant ainsi à des situations d'inconfort ou même à des problèmes plus sérieux dans la réalisation des gestes (par exemple, les ciseaux sont utilisés à la fois pour disséquer, attraper, couper ou suturer). Cette remarque illustre le caractère non achevé des instruments qui sont souvent dévolus à d'autres tâches que leur fonction première (Perriault, 1990).

⁵⁵ Un individu n'aura par exemple aucune difficulté à diriger correctement son doigt sur un clou tandis qu'il éprouvera plus de difficultés et commettra plus de « ratés » pour l'atteindre avec un marteau.

2.2 *La chirurgie robotique*

Le robot en industrie et le robot en chirurgie

Quand on parle de robot, l'image évoquée est celle d'un système qui exécute de façon relativement autonome et répétitive des tâches préprogrammées sous une supervision humaine plus ou moins présente. Au vu de cette définition, il est clair que la nature et la complexité des procédures chirurgicales exclut d'emblée l'utilisation de ces robots autonomes (Cadeddu, Stoianovici & Kavoussi, 1997). Au contraire, dans le domaine de la chirurgie, c'est la perception et le jugement humain qui dictent à chaque instant le mouvement que doit réaliser le robot (Shah et al., 2001). En effet, un ensemble de caractéristiques différencie nettement le milieu industriel dans lequel on utilise classiquement des robots, du milieu chirurgical où l'homme reste constamment au premier plan (Nyssen, 2001, 2000) :

- 1° *Les tâches non génériques* : en chirurgie, les tâches ne sont pas répétitives à l'identique comme elles peuvent l'être dans l'industrie classique ; la singularité de chaque patient, avec ses particularités anatomiques et pathologiques, conduit chaque opération, voire chaque geste, à être unique. Cette absence de répétition en chirurgie alimente l'incertitude présente dans toute opération et rend inconcevable une pré-programmation de tâches répétitives dans un ordre donné et de manière autonome, comme c'est le cas dans le secteur industriel. Elle implique en outre la nécessité d'une autonomie complète du chirurgien ainsi que la possibilité d'un découplage du système à tout moment afin de reprendre une gestion manuelle en toutes circonstances.
- 2° *La présence humaine* : dans les systèmes industriels, les robots sont souvent isolés et enfermés dans des enceintes dans lesquelles l'homme ne pénètre pas. En chirurgie, ce ne peut évidemment être le cas, la proximité du patient, du personnel et du patient étant extrêmement étroite.
- 3° *Les conséquences humaines* : dans le domaine médical, tout problème ou incident peut provoquer des conséquences immédiates pour le patient qui est en contact direct avec le système.

A ce sujet, il est également indispensable de rappeler la différence proposée par Satava et Ellis (1994) entre le robot et la téléprésence : le premier relève plutôt du domaine de l'intelligence artificielle (IA) puisqu'il est conçu pour avoir son autonomie et remplacer l'homme dans certaines tâches ; la téléprésence (ou télé-opération) est par contre basée sur l'amplification de l'intelligence (AI) avec l'objectif d'augmenter les capacités humaines. Selon cette dichotomie, les robots utilisés en industrie relèveraient plutôt de

la première catégorie tandis que le robot chirurgical s'apparenterait plus à la seconde catégorie, qui correspond à ce que l'on qualifie actuellement la réalité augmentée (Dubois, 2001 ; Sharma & Molineros, 1997 ; Rolland et al., 1995).

En résumé, si les nouveautés technologiques insèrent une distance entre le chirurgien et son patient similaire sur plusieurs points à celle introduite dans les environnements industriels, la chirurgie robotique possède des spécificités très marquées par rapport aux robots rencontrés dans le milieu industriel : la situation reste entièrement sous le contrôle du chirurgien et aucune automatisation ou répétition préprogrammée n'est encore actuellement possible.

Description du système robotique « da VinciTM Surgical System »

Dans le contexte de la réalité augmentée que nous avons décrit au début de ce chapitre, la conception du système robotique visait à pallier plusieurs inconvénients importants rencontrés en chirurgie laparoscopique classique, les deux principaux étant l'absence de vision binoculaire de la profondeur⁵⁶ et le manque de degré de liberté de mouvements des instruments.

Le système « da Vinci » de chirurgie minimale invasive est composé de deux éléments distincts : la console, partie maître (à laquelle le chirurgien est assis) et les bras du robot, la partie esclave (placés près du patient, voir fig. 8). Le chirurgien est assis face à la console qui comprend l'interface de commande et de contrôle et manipule des manettes semblables à des « joy-sticks » (voir fig. 9) sous le contrôle d'une authentique vue tridimensionnelle via un dispositif binoculaire. Les manipulations des manettes sont transmises à l'ordinateur. Celui-ci supprime le tremblement physiologique naturel et réduit l'amplitude des mouvements dans un rapport réglable de 5 :1 à 2 :1, ce qui procure plus de stabilité et de confort aux mouvements du chirurgien et réduit sa fatigue musculaire (Marescaux et al., 2002 ; Cadière et al., 2000). L'ordinateur délivre ensuite un influx qui, transmis à distance par un câble de dix mètres, actionne les trois bras articulés de la partie esclave du robot, qui reproduit en temps réel les mouvements du chirurgien assis à la console. Deux de ces bras soutiennent et actionnent les instruments chirurgicaux. Ceux-ci comportent une articulation distale et sont placés à la partie terminale des bras puis introduits dans le corps du patient au travers de trocars

⁵⁶ Un robot antérieur au *da Vinci* a été développé : le *Zeus* (Computer Zeus Surgical Robotic System, Inc., Goleta, CA., USA) mais ce dernier ne bénéficiait pas de la vision 3D. Pour une comparaison des systèmes *Zeus* et *da Vinci*, voir notamment Sung & Gill (2001).

solidarisés aux bras. Le troisième bras supporte une caméra (scope, fig.10) à double optique restituant à chaque œil son image.

Un troisième composant comprend le moniteur de contrôle en 2D (qui reprend au choix la vision de l'œil droit ou celle de l'œil gauche) pour le chirurgien assistant (et le reste de l'équipe), ainsi que les deux sources de lumière froide pour chaque scope du robot.



Fig. 8 : Configuration de la salle d'opération avec le système robotique. Le chirurgien est assis à la console et les bras du robot se trouvent près du patient.



Fig. 9 : manettes de manipulation et instruments.



Fig.10: caméra à double optique

Ce système robotique présente de grandes avancées technologiques que ce soit pour la qualité des interventions, pour le type de patient traité ou pour les interventions chirurgicales à distance. En ce qui concerne la qualité des opérations, plusieurs études ont montré un réel avantage du système robotique *da Vinci* sur la laparoscopie classique quant à la précision et aux résultats de l'intervention (par exemple, pour les prostatectomies, Pasticier et al., 2001). Le système robotique a également ouvert la voie aux opérations à cœur battant, diminuant ainsi considérablement le risque provoqué par l'arrêt temporaire du cœur et permettant un rétablissement rapide du patient (Carpentier et al., 1999). En outre, le système robotique permet d'atteindre des sites très difficiles d'accès par d'autres techniques (par exemple, atteindre le cœur sans sternotomie) et de réaliser des opérations exigeant une très grande précision, qui étaient effectuées auparavant à l'aide d'un microscope (par exemple, les reperméabilisations tubaires). Ce système permet également de pallier les problèmes rencontrés chez certains patients (par exemple, les patients obèses présentant une paroi abdominale épaisse qui diminue la mobilité des trocarts et des instruments de laparoscopie classique⁵⁷, Cadière et al., 2000). Enfin, le système robotique permet les interventions à distance, le chirurgien et la partie maître du robot (la console de commande et de contrôle) ne se trouvant plus dans la même pièce. Ainsi, une opération assistée par robot a été conduite en 2001 depuis New York sur une patiente se trouvant à Strasbourg (Marescaux et al., 2002, 2001).

Très peu de complications sérieuses ont été rapportées lors de l'utilisation du système robotique *da Vinci*, que ce soit en chirurgie digestive (Cadière et al., 2001), gynécologique (Marchal et al., 2005 ; Degueldre, Vandromme, Huong & Cadière, 2000 ; Falcone et al., 2000), urologique (Pasticier et al., 2001) ou cardiaque (LaPietra et al., 2000 ; Carpentier et al., 1999). Ce système ne pallie toutefois pas tous les inconvénients de la laparoscopie classique et présente toujours des risques (certains accidents ou incidents observés en laparoscopie classique surviennent aussi avec le système robotique, les problèmes d'identification de tissus ou d'organes étant par exemple toujours présents⁵⁸).

⁵⁷ En outre, les dimensions extérieures de l'abdomen obèse accentuent la difficulté pour l'opérateur à trouver une position ergonomique satisfaisante au-dessus du patient en laparoscopie classique. En opérant à distance avec le robot, cet inconvénient disparaît (Cadière et al., 2000). L'utilisation du robot diminue également le temps opératoire pour les personnes obèses par rapport à la laparoscopie (Brunaud et al., 2003).

⁵⁸ Un cas de décès a été relaté en octobre 2002 suite au dommage important infligé à deux vaisseaux (dont l'aorte) sectionnés accidentellement lors d'une ablation de rein. Presque deux heures se sont écoulées avant que les médecins ne découvrent l'erreur et ne tentent de réparer le dommage, sans succès.

Des études antérieures ont montré que le système robotique induisait de nouvelles demandes et contraintes cognitives, aussi bien pour le chirurgien que pour l'ensemble du staff. Le chirurgien assis à la console doit adapter ses habiletés sensori-motrices et ses procédures aux caractéristiques et limites techniques du système *da Vinci*. Une des principales est l'absence de rétroaction au toucher (perte de la palpation et absence complète de retour de force)⁵⁹. Sans rétroaction tactile, le contrôle des actions (par exemple, la tension du fil lors de sutures, la force de préhension d'un organe...) est difficile à réaliser⁶⁰. Cette limite semble être compensée par le chirurgien par un contrôle visuel plus précis (Nyssen, 2001, 2000). Enfin, l'axe œil-main, qui était rompu en laparoscopie classique, est rétabli avec le robot chirurgical, supprimant aussi les biais de l'effet levier et du feedback en miroir (Moorthy et al., 2004).

La notion de transparence fonctionnelle dans la chirurgie robotique

Selon Gaillard (1993), la transparence fonctionnelle définit les systèmes de téléopération qui constituent un prolongement direct des fonctions élémentaires (telles que déplacer la main, manipuler des objets, se déplacer...). Dans ce cas, c'est le lien perception – action qui détermine la qualité de l'environnement virtuel (ou augmenté) et c'est donc bien l'aspect fonctionnel plus que les apparences qui est à l'origine de la réalité de l'expérience (Flach & Holden, 1998). Quatre critères principaux caractérisent la transparence fonctionnelle (Gaillard, 1993) :

- Critère d'isomorphisme qui détermine la correspondance articulaire entre le bras de l'opérateur et le bras du système esclave,
- Critère d'orientation spatiale, selon lequel les repères de l'opérateur correspondent à ceux du bras esclave,
- Critère géométrique qui définit la transformation angulaire entre la commande motrice de l'opérateur et l'exécution du télé-manipulateur,
- Critère dynamique qui établit la correspondance temporelle entre les variables de commande et les variables commandées.

Pour Gaillard (1993), le système idéalement transparent est un système pour lequel il n'y aurait pas de transformation du signal de commande émis par l'opérateur. Le système se comporterait ainsi effectivement en simple prolongement des fonctions motrices de l'opérateur. Le robot chirurgical *da Vinci*, où les mains du chirurgien

⁵⁹ La conception de gants tactiles est actuellement à l'étude.

⁶⁰ Plusieurs études ont montré que les instruments de laparoscopie classique, malgré leur longueur, permettent un retour de force ainsi qu'une évaluation de la texture des surfaces aussi bonne qu'à partir de l'index (Brydges et al., 2005), ce qui devient impossible avec le robot *da Vinci*.

deviennent réellement les instruments, se rapproche fortement de cette conception de la transparence fonctionnelle établie selon les quatre critères identifiés par Gaillard (1993). La correspondance articulaire est garantie par l'utilisation du pouce et de l'index de la part du chirurgien, doigts dont l'ouverture et la fermeture sont reproduits à l'identique par l'extrémité des pinces. L'orientation spatiale et la dynamique temporelle sont identiques pour le système maître et le système esclave. Seul le critère de correspondance géométrique directe est légèrement entravé par mesure de sécurité et de précision, le système robotique supprimant le tremblement physiologique naturel et modifiant l'amplitude des mouvements du chirurgien vers le système esclave (entre 2:1 et 5:1).

Si pour Gaillard (1993), la transparence d'un instrument est d'autant plus grande que la motricité de l'opérateur et celle de la machine sont proches, Rogalski et Samurçay (1993) définissent au contraire la transparence en termes de proximité de représentations et parlent plutôt de transparence cognitive qui détermine les exigences cognitives pour les opérateurs. La transparence cognitive définit pour chaque opérateur singulier le degré d'accessibilité aux connaissances, procédures et modèles sous-jacents au fonctionnement de l'outil, compte tenu des tâches à accomplir. Dans cette optique, plus un outil est proche des représentations initiales des opérateurs, plus il devrait être transparent pour ces derniers.

Se situant entre la conception plus comportementale de Gaillard (1993) et celle plus cognitive de Rogalski et Samurçay (1993), Retaux (2003) et Rabardel (1995) parlent de transparence opérationnelle et qualifient le système de transparent lorsque celui-ci n'est plus totalement accessible à la conscience, menant notamment à des comportements automatiques. Satava et Ellis (1994) insistent quant à eux sur l'aspect intuitif que doit revêtir l'interface, le plus important n'étant pas que tous les sens soient nécessairement reproduits mais que les informations sensorielles soient présentes dans leur configuration la plus naturelle possible (par exemple, la vue en trois dimensions du robot reproduit toute la richesse des indices visuels de profondeur naturels).

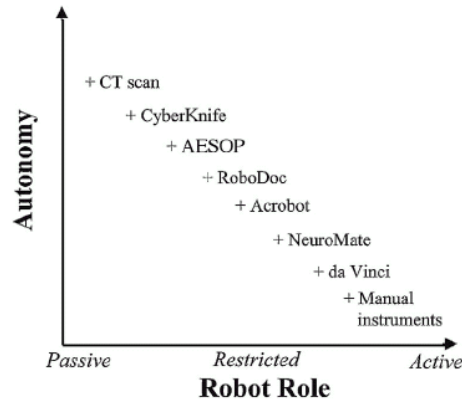
Dans la même philosophie générale, Rasmussen & Vicente (1989) ont défini précédemment le concept d'interface écologique, insistant sur la nécessité de concevoir l'interface de façon à ce qu'elle ne force pas l'opérateur à fonctionner avec un niveau de contrôle plus élevé que ne le requiert effectivement la situation.

Enfin, selon une taxonomie décrivant les rôles que peuvent prendre les robots dans le domaine médical en fonction de leur degré d'autonomie, Camarillo, Krummel & Salisbury (2004) séparent trois types de catégorie (voir graphique 2) :

- Rôle passif : le rôle du robot est limité et son utilisation présente peu de risques

- Rôle restreint : le robot a un rôle important pour les tâches les plus invasives présentant un haut risque, mais son rôle est réduit aux procédures essentielles
- Rôle actif : le robot est impliqué dans toute la procédure et comporte un haut degré de responsabilité et de risque.

Selon ce schéma, le robot de Vinci que nous étudions démontre un rôle très actif, puisqu'il est utilisé dans l'entièreté (ou presque) de la procédure chirurgicale, tout en étant très peu autonome et sous le contrôle complet du chirurgien.



Graphique 2 : Rôle du robot en fonction de son autonomie

2.3 Conclusion

La laparoscopie crée une première distance en intercalant un écran, une interface, qui rompt la boucle naturelle de la perception et de l'action. Elle nécessite la reconstruction d'une représentation de l'environnement à partir d'une image bidimensionnelle caractérisée par un traitement plus lent et plus coûteux en ressources. Le robot (en vision 3D), dans lequel tout n'est pourtant qu'interface, recrée une unité pour le chirurgien : il reconstitue cette boucle perception – action de façon artificielle et replace le chirurgien dans une situation plus naturelle et écologique d'interaction avec l'environnement, grâce à une plus grande dextérité dans la manipulation des instruments et une vision 3D. Cette dernière est caractérisée, à l'inverse de la vision en 2D, par un traitement de l'information plus rapide et automatique (selon la théorie des deux voies de traitement) ou au contraire, par l'absence de traitement et une capture directe de l'action par les composantes de l'environnement (affordances).

Le tableau, inspiré des premières analyses de données (Nyssen, 2001, 2000, Table 1) reprend de manière synthétique, les différences majeures qui peuvent être mises en évidence entre la laparoscopie classique et le système robotique.

Table 1 : Récapitulatif des différences majeures entre la laparoscopie classique et le système robotique

	Inconvénients de la laparoscopie	Impacts correctifs et effets pervers apportés par le robot da Vinci
Système afférent	<ul style="list-style-type: none"> -qualité médiocre de l'image -bidimensionnalité de l'image -peu de sensation tactile 	<ul style="list-style-type: none"> -image en 3D et haute résolution d'image vidéo -pas de sensation tactile, pas de retour de force
Système efférent	<ul style="list-style-type: none"> -limitation du degré de liberté à 4 DOF -problématique de l'amplitude du geste -problématique de la précision du geste -problématique d'orientation spatiale intra corporelle 	<ul style="list-style-type: none"> -instruments permettant d'augmenter la dextérité à 6 DOF (endowrist/endohand) de manière intra corporelle -système de contrôle du tremblement physiologique de la main -reproduction contrôlée et miniaturisée de l'amplitude des mouvements des mains du chirurgien (de 2:1 à 5:1) -à terme simulation et reproduction autonome d'actes chirurgicaux par le robot ainsi qu'intégration d'une interface tactile plus sophistiquée
Chirurgien	<ul style="list-style-type: none"> -position difficile -fatigue -douleurs musculaires et articulaires 	<ul style="list-style-type: none"> - poste de travail ergonomique - précision et contrôle du geste chirurgical - nécessité d'intégrer des connaissances techniques avancées - staff éloigné, modification du travail coopératif
Staff	<ul style="list-style-type: none"> - position difficile - vue en 2D 	<ul style="list-style-type: none"> - statut quo - nécessité de former le personnel pour le set-up et l'utilisation du système - risques potentiels au niveau sécurité du personnel, du patient et du matériel - nécessité de prévoir la présence d'un <i>clinical technician</i>
Salle d'opération		<ul style="list-style-type: none"> - encombrement important de par le volume des composants du système robotique - domotique médicale à contrôler

3 LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR DANS LES PROCÉDURES MIS

Un des inconvénients majeurs de la laparoscopie classique est la perte de la perception de la profondeur, privation qui est à l'origine d'une longue courbe d'apprentissage qui précède l'acquisition d'une performance correcte avec cette technique (Hernandez et al., 2004). Plusieurs études, menées dans une optique chirurgicale, se sont penchées sur l'impact des images en 2D et en 3D sur les performances motrices des chirurgiens ; elles présentent cependant des résultats contradictoires.

Certaines études n'obtiennent pas de différence de performance motrice (Hanna et al., 1998 ; Chan et al., 1997 ; Crosthwaite et al., 1995 ; Pietrabissa et al., 1994) tandis que d'autres montrent une amélioration des performances en 3D (Taffinder et al., 1999 ; Van Bergen et al., 1998 ; Dion & Gaillard, 1997 ; Peitgen et al., 1996 ; Birkett et al., 1994 ; Wenzl et al., 1994). Ainsi, Dion et Gaillard (1997) observent une meilleure qualité de la perception visuelle et un temps de réaction motrice plus court lorsque le stimulus est présenté en 3D⁶¹. Dans leur étude, Birkett et al. (1994) montrent que seules les tâches jugées complexes sont plus rapidement et plus facilement réalisées en 3D qu'en 2D, alors qu'aucune différence n'est mise en évidence pour les tâches plus simples. Van Bergen et al. (1998) et Dion et Gaillard (1997) mettent également en évidence le rôle de la vision 3D dans l'amélioration des performances lors de manœuvres chirurgicales complexes (telles que reconnaître des détails anatomiques) par la diminution du temps opératoire et du nombre d'erreurs. Ainsi, le placement et la manipulation des instruments, la reconnaissance des organes et des structures anatomiques, l'examen endoscopique, les relations entre les structures, la dissection, le placement des sutures et la réalisation des nœuds sont réalisés plus facilement, rapidement et correctement avec une image en 3D qu'avec une image en 2D (Van Bergen et al., 1998 ; Birkett et al., 1994 ; Wenzl et al., 1994). La gestualité est également différente ; la manipulation plus aisée des instruments avec une vision 3D rend leur placement sur les tissus plus rapide et correct sans avoir besoin de toucher ni de sentir les organes au préalable pour évaluer la position des instruments comme c'est le cas en vision 2D (Birkett et al., 1994).

En outre, certains auteurs suggèrent que la vision en 3D réduit la fatigue mentale, surtout lors d'opérations longues et difficiles (Geis, 1996 ; Birkett et al., 1994).

⁶¹ Comme dans les études de psychologie cognitive présentées précédemment, Dion & Gaillard (1997) montrent que l'accélération au moment de l'atteinte de l'organe est plus grande en vision binoculaire qu'en vision monoculaire, confirmant ainsi le rôle de l'information binoculaire dans le contrôle de l'action en temps réel.

Cependant, la fatigue mentale reste un élément difficile à mesurer, souvent évalué de façon subjective à partir de questionnaires.

Enfin, lorsqu'il est demandé aux chirurgiens de comparer subjectivement les avantages de la vision 3D avec ceux de la vision 2D, ceux-ci jugent souvent que leurs performances sont meilleures et réalisées plus facilement en 3D qu'en 2D, impression qui n'est pas toujours en accord avec les données objectives récoltées en correspondance (Van Bergen et al., 1998).

La discordance observée dans les diverses études peut trouver plusieurs sources d'explication. Tout d'abord, comme les études de Dion & Gaillard (1997), Van Bergen et al. (1998) et Birkett et al. (1994) le montrent, les différences de performance entre la vision 2D et 3D semblent dépendre de la nature de la tâche à réaliser, les avantages liés à la vision en 3D étant plus marqués pour les tâches d'une plus grande complexité. Lors de tâches plus simples, les ressources de traitement, moins mobilisées dans l'exécution de la tâche permettent peut-être aux sujets d'exploiter de façon plus efficace l'information visuelle monoculaire présente dans l'image. Ainsi, les chirurgiens peuvent utiliser l'information dynamique qui est en principe disponible dans l'image, notamment par le mouvement de la caméra qui procure de l'information sur la parallaxe de mouvement (Voorhorst et al., 1996). Cependant, comme le soulignent Huber et al. (2003), la présence d'indices conflictuels lorsque la vision est en 2D peut mener à des représentations en 3D ambiguës de la scène. Les différences entre la vision 2D et 3D semblent également être fonction de la mesure qui est enregistrée (la vitesse ou la précision, Smith et al., 2001). Au regard de l'ensemble des expérimentations passées, Arnold et Farrell (2002) suggèrent d'entamer les recherches avec des tâches chirurgicales perceptivo-motrices relativement simples, telles que l'insertion d'une aiguille et par la suite, de recourir à des procédures plus complexes.

La seconde source de disparité entre les études peut provenir du choix des populations étudiées. Les chirurgiens habitués à opérer sous vision 2D sont peut-être moins sensibles aux avantages procurés par la vision 3D, suite aux stratégies de compensation efficaces qu'ils ont mises en place au cours de leur pratique avec une image en 2D (Marotta & Goodale, 1998 ; Hanna et al., 1998 ; Chan et al., 1997). A l'opposé, une population d'étudiants n'ayant aucune expérience pourra se montrer très sensible à la différence provoquée par les images en 2D et en 3D.

Enfin, un dernier facteur important qui peut expliquer les contradictions entre les différentes études, est le caractère peu perfectionné des systèmes 3D de première génération que les recherches antérieures ont utilisés. Ces derniers recréaient une disparité binoculaire apparente à partir d'un écran en 2D en faisant osciller chaque image de manière alternative avec une haute fréquence (50-60 Hz pour chaque œil). Les chirurgiens devaient porter des lunettes qui occultaient chaque œil au moment

approprié. Ce dispositif permettait une vision 3D assez approximative, avec une image de mauvaise résolution, peu contrastée, souvent de moins bonne qualité que l'image standard en 2D (Falk et al., 2001 ; Mon-Williams & Wann, 1998 ; Hanna et al., 1998 ; Chan et al., 1997).

4 CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, il subsiste une question très importante qui est de savoir quelle information est reprise par le système visuel et comment le chirurgien se forme une représentation visuelle de la scène filmée, qu'il utilise pour diriger et contrôler son action. Pour répondre à cette question, notre objectif est d'étudier l'influence des images en 2D et 3D sur les performances chirurgicales dans un plan méthodologique qui tient compte des trois sources de disparité mises en évidence dans les études décrites ci-dessus. Pour cela, nous étudierons les performances de sujets ayant des expertises différentes dans des tâches de complexité variable à partir d'un système visuel perfectionné, reproduisant une vision binoculaire ou monoculaire très proche de la vision naturelle humaine qui est permise par le système da Vinci. La méthodologie appliquée afin d'atteindre nos objectifs est détaillée et justifiée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V

ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

L'objectif de ce dernier chapitre théorique est de présenter les différents aspects méthodologiques classiquement utilisés dans l'étude de la perception de la profondeur en psychologie cognitive et, dans un second temps, de les mettre en rapport avec les techniques d'investigation qui peuvent être mises en place dans le terrain de recherche riche et complexe que constitue la chirurgie minimale invasive.

1 MÉTHODES D'INVESTIGATION DE LA PERCEPTION DE LA PROFONDEUR

La perception de la profondeur a été étudiée par de nombreuses méthodes très diverses qui ont souvent mené à des résultats contradictoires. Cependant, cette variabilité a permis de mettre en évidence les différentes implications des indices binoculaires et monoculaires en fonction du paradigme expérimental utilisé et a ainsi contribué à une meilleure compréhension de leur utilisation et efficacité respective dans la perception de la profondeur.

1.1 La vision monoculaire comme perturbation de la fonction visuelle

La perception est un système complexe qui fonctionne habituellement de façon efficace et cohérente et qui ne peut être étudié en profondeur qu'à travers la perturbation⁶² (Bingham & Pagano, 1998). Pour évaluer les effets d'une perturbation bien spécifique, il est nécessaire de comparer la performance perturbée avec des performances normales ou non perturbées. Pour cela, il est de coutume d'étudier et de comparer les performances de sujets sains avec celles de patients présentant des déficits, notamment dans la sphère visuelle, suite à des lésions cérébrales ou à d'autres pathologies afin d'en comprendre le fonctionnement normal. Un autre moyen d'investigation particulièrement utilisé dans le domaine de la perception visuelle consiste à placer des sujets sains, sans déficits particuliers, dans des conditions expérimentales « appauvries » (par exemple, en

⁶² Par exemple, la perturbation qui est créée par les illusions visuelles.

absence de vision binoculaire, avec une luminosité réduite, avec des images en noir et blanc, etc.).

Dans l'étude de la perception de la profondeur, la vision monoculaire (condition appauvrie) est classiquement comparée à la vision binoculaire (condition contrôle), avec un choix dans le nombre et le type d'indices visuels présents. La condition monoculaire est souvent créée en couvrant un œil (laissant l'œil dominant découvert). Cette technique expérimentale présente cependant un inconvénient majeur : elle entraîne la perte non seulement des indices binoculaires (tels que la disparité rétinienne, la vergence oculaire et l'information concordante) mais aussi des sources d'information monoculaire provenant de l'œil caché (taille relative des objets familiers, vitesse de l'image, la parallaxe de mouvement, Mazyn et al., 2004 ; Collewijn & Erkelens, 1990 ; Lee, 1976). Cette condition artificiellement créée, qui consiste à cacher un œil pour la vision monoculaire, peut d'ailleurs être à l'origine des résultats contradictoires présentés dans la littérature (par exemple, Marotta et al., 1998 et Coull et al., 2000).

1.2 Paradigmes d'étude de la perception de la profondeur

Distance égocentrique versus exocentrique (ou allocentrique)

Deux types d'estimation des distances sont classiquement distingués : soit on demande au sujet d'estimer la distance égocentrique absolue (c'est-à-dire la distance entre un observateur et un objet externe), soit on demande au sujet d'émettre un jugement sur la distance exocentrique ou allocentrique (qui correspond à la distance entre deux objets). Trois caractéristiques fondamentales distinguent ces deux processus (Willingham, 1998) :

- Les représentations spatiales allocentriques impliquent l'activation de processus conscients, tandis que les représentations égocentriques, plus impliquées dans les mouvements d'interaction avec l'environnement, ne sont pas accessibles à la perception consciente⁶³. Plusieurs études ont par exemple montré que des sujets pouvaient corriger la position d'un stimulus lorsque celle-ci est modifiée lors d'un mouvement et cela même quand les sujets ne sont pas conscients du changement perceptif (Prablanc & Martin, 1992 ; Castiello et al., 1991 ; Goodale et al., 1986, Pelisson et al., 1986 ; Soechting & Lacquaniti, 1983)
- L'espace allocentrique est utilisé à des fins d'observation et de jugement et n'est pas lié à un effecteur particulier, tandis que l'espace égocentrique est défini par

⁶³ Cette distinction reproduit à nouveau la dichotomie fonctionnelle établie entre la voie ventrale (qui traite des processus conscients de la perception) et dorsale (qui contrôle les actions).

rapport à la composante motrice qui sera activée, l'effecteur devant être sélectionné avant que la représentation égocentrique de l'espace ne soit construite⁶⁴ (la représentation égocentrique sera donc différente si le sujet doit, par exemple, renvoyer une balle avec son pied ou avec sa main, tandis que la représentation allocentrique de la balle et de son mouvement dans l'espace sera identique dans les deux cas).

- La formation de la représentation spatiale allocentrique implique une plus grande mobilisation des ressources attentionnelles que la représentation égocentrique qui, elle se construit sur un mode plus automatique qui sollicite moins de ressources.

Jusqu'aux années nonante, une pléthore d'études scientifiques a consacré ses investigations aux jugements de profondeur exocentriques et à la séparation figure-fond, la contribution des indices visuels de profondeur aux jugements de distance absolue étant très peu étudiée (Servos, 2000). Actuellement, un nombre croissant d'études (Servos, 2000 ; Marotta et al., 1997, 1998 ; Jackson et al., 1997 ; Servos et al., 1992) examine le rôle de la perception de la profondeur dans la calibration et le contrôle des réponses motrices telles que les mouvements de préhension, comportements qui se basent essentiellement sur l'information égocentrique (Marr, 1982). De fait, quand il interagit avec l'environnement, le sujet doit se baser sur les propriétés intrinsèques de l'objet (telles que sa taille, forme...) pour ajuster l'ouverture de la main afin d'attraper l'objet de façon adéquate ; en outre, la distance égocentrique absolue doit être connue afin de diriger correctement le mouvement dans l'espace.

C'est pour refléter ces deux types d'information différente que deux composantes du mouvement sont classiquement distinguées lors d'une interaction avec un objet : le mouvement d'approche (ou dit de transport) dans lequel le membre se dirige vers l'objet, et le mouvement de préhension dans lequel la main est ouverte et orientée en vue de faciliter la préhension de l'objet (Jeannerod, 1984). Ces deux composantes seraient traitées par des systèmes visuo-moteurs différents et se baseraient sur des sources d'information perceptive différentes (Watt & Bradshaw, 2000 ; Jackson et al., 1997). Le mouvement d'approche dépendrait d'une représentation égocentrique de l'environnement extérieur (qui correspond à l'ébauche en 2,5D de Marr (1982) dans laquelle les objets sont représentés en fonction de la position spatiale relative de l'observateur) tandis que le mouvement de préhension en lui-même se baserait sur une

⁶⁴ L'espace allocentrique serait utilisé lors de la sélection du but (stratégie opératoire) tandis que la représentation spatiale égocentrique serait utilisée pour la sélection de la cible dans les processus d'intégration perceptivo-motrice. Willingham (1998) va même plus loin dans son modèle en proposant que la formation du but n'utilise pas seulement la représentation perceptive allocentrique mais qu'elle la détermine.

représentation centrée sur l'objet (contenant les propriétés intrinsèques de l'objet telles que la taille, la forme et l'orientation de l'objet, la table 2 propose un récapitulatif des différences entre distance égocentrique et allocentrique).

Table 2 : Récapitulatif des caractéristiques des distances égocentriques et allocentriques

	Distance égocentrique	Distance allocentrique
Définition	Distance entre un observateur et un objet externe	Distance entre deux objets
Type d'activité	Mouvement d'interaction avec l'environnement	Activité de jugement
Niveau d'activation	Liée à la composante motrice et à l'effecteur activé pour réaliser le mouvement	Pas liée à un effecteur particulier, dépend du but général de l'action
Niveau de conscience	Processus automatique, pas accessible à la conscience	Processus conscient, qui peut être verbalisé
Ressources de traitement	Construction sur un mode automatique, sollicite peu de ressources	Forte mobilisation des ressources attentionnelles
Voie de traitement	Dépend plus de la voie dorsale	Dépend plus des mécanismes de la voie ventrale
Implication méthodologique	S'étudie à travers l'action	S'étudie à travers la réponse verbale

Réponse verbale versus motrice

La perception ne s'exprime qu'à travers l'action (qu'elle soit verbale ou gestuelle, Bingham & Pagano, 1998) : les perturbations provoquées dans la perception ne seront dès lors observables qu'à travers l'action et le type d'actions requises aura un impact sur ces observations.

Dans le paradigme expérimental le plus courant, on demande au sujet d'estimer verbalement la distance. Cette technique d'investigation pose plusieurs problèmes méthodologiques et écologiques qui sont notamment à l'origine des résultats contradictoires rapportés dans la littérature. Si l'estimation verbale peut être considérée comme une certaine forme d'action, elle constitue toutefois une activité inhabituelle et une stratégie qui est peu utilisée dans la vie courante : contrairement à l'interaction directe avec l'environnement (par exemple, l'action d'attraper un objet), elle n'est ni apprise ni entraînée et n'implique pas nécessairement de feedback (Bingham & Pagano,

1998). Plusieurs études ont ainsi montré que l'estimation verbale était une mesure qui n'était ni stable ni fiable (elle serait par exemple, deux fois plus variable que le mouvement d'approche, Pagano & Bingham, 1998 ; Foley, 1977).

En outre, l'estimation de la distance rapportée verbalement par le sujet implique l'activation d'un ensemble de processus psychologiques, autres que perceptifs, qui interviennent entre la perception et l'estimation de la distance. Celle-ci ne constitue donc pas une mesure pure et directe de la perception de la distance, puisque des mécanismes et des facteurs cognitifs d'autres niveaux interviennent également (Richardson & Waller, 2005). Les estimations verbales sont, par exemple, influencées par la compréhension et l'utilisation personnelles des unités de mesures. Ce qui est mesuré à partir du jugement verbal est donc contaminé par un ensemble de stratégies et processus cognitifs de haut niveau (tels que la charge mentale, les stratégies cognitives utilisées par le sujet...) autres que la perception pure de la distance.

Malgré ces critiques pertinentes sur les estimations verbales de distance et un intérêt substantiel pour la fonction visuo-spatiale, très peu d'études empiriques se sont centrées sur la façon dont l'information spatiale de profondeur est perçue et utilisée pour l'action (Carey et al., 1998). Pourtant, la perception de la profondeur n'est pas uniquement utile pour la perception explicite ou verbale des distances. L'estimation de la profondeur absolue dans l'espace direct (*peripersonal space*, Shikata et al., 1995) est un élément essentiel pour un contrôle précis des mouvements d'approche et de préhension. Cependant, de nouveau et de façon surprenante, peu nombreuses sont les études qui ont examiné les contributions relatives des divers indices visuels de distance dans des tâches de contrôle moteur plutôt que dans des tâches d'estimation visuelle sans mouvement vers l'objet (Greenwald et al., 2005 ; Knill & Kersten, 2004 ; Carey et al., 1998). Les recherches qui étudient les réponses motrices dans ce cadre commencent seulement à paraître. Parmi ces rares études, nous pouvons citer celles de Servos, Goodale et al. (Servos, 2000 ; Servos & Goodale, 1994 ; Servos, Goodale & Jacobson, 1992) qui ont étudié l'apport de l'information binoculaire dans les mouvements d'approche et de préhension de l'objet⁶⁵.

Comparant réponses verbales et réponses motrices, Servos (2000) n'a montré aucune différence entre la vision monoculaire et binoculaire pour des tâches d'estimation explicite (verbale) des distances, alors qu'il en a obtenu dans des tâches motrices telles que les mouvements d'approche ou de préhension. Falk et al. (2001) ont obtenu le même pattern de résultats pour les réponses verbales et motrices dans le domaine de la

⁶⁵ En enregistrant les mouvements des sujets à haute résolution par un système d'enregistrement optique à infrarouge, ces auteurs ont notamment montré qu'une première vue en 3D facilitait la coordination des mouvements de préhension par rapport à une vision monoculaire en permanence.

chirurgie minimale invasive. En outre, d'autres auteurs ont montré que les erreurs verbales n'étaient pas corrélées aux erreurs de mouvements lorsque les sujets devaient réaliser simultanément des mouvements et des jugements verbaux (Pagano & Bingham, 1998), ce qui suggère que ces deux processus fonctionnent indépendamment. L'ensemble de ces résultats mène à la conclusion que la sous-estimation des distances observée dans des mouvements de préhension en vision monoculaire n'est pas purement la conséquence d'un biais purement perceptif, mais que le déficit relève plutôt du système *visuo-moteur* en lui-même, lequel serait perturbé par le fait de partir d'un input monoculaire pour calibrer une réponse motrice qui doit être réalisée dans un espace tridimensionnel (Servos, 2000). En outre, en vision monoculaire, le système visuo-moteur sous-estimerait non seulement la distance mais également la taille de l'objet⁶⁶, comme en témoigne la taille d'ouverture de la main qui est trop petite pour attraper l'objet (Servos, 2000).

D'autres études ont également démontré l'importance de la vision binoculaire dans des tâches motrices (Servos & Goodale, 1998 ; Judge & Bradford, 1988), particulièrement pour des mouvements réalisés dans des environnements complexes, notamment quand ils contiennent d'éventuels obstacles (Jackson et al., 1997) ou quand le feedback direct et la connaissance des résultats ne sont pas disponibles dans l'environnement (Coull et al., 2000). Des études physiologiques, neurologiques et comportementales ont également souligné le rôle important joué par la vision binoculaire pour un mouvement de préhension optimal (Sakata et al., 1997 ; Dijkerman et al., 1996 ; Servos et al., 1992). Une des différences majeures entre les mouvements d'atteinte d'objets en vision monoculaire et binoculaire se marque par le nombre d'ajustements on-line effectués par le sujet lors de l'exécution du mouvement mais aussi par leur qualité ; en vision monoculaire, ces ajustements semblent être la conséquence d'erreurs d'estimation initiale de la distance (Kruyer et al., 1997 ; Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1998, 1997). Très récemment, Loftus et al. (2004) ont montré que la vision monoculaire ne menait pas à une sous-estimation systématique de la distance mais plutôt à une plus grande variabilité dans la performance, expliquée notamment par le nombre de réajustements plus importants dans cette condition, tel qu'observé antérieurement par Marotta et al. (1998, 1997 ; Kruyer et al., 1997).

⁶⁶ Ce qui constitue un corollaire logique du fonctionnement du système visuel et de l'influence des indices de profondeur dont, ici, celui de la taille relative : dans le cas présent, si la distance absolue de l'objet est sous-estimée, sa taille réelle sera elle aussi sous-estimée, car un objet considéré comme étant proche dans le champ visuel est projeté sur la rétine avec une taille relative plus grande que si ce même objet était perçu comme étant plus lointain.

En **résumé**, les réponses verbales et motrices impliquent des processus de traitement différents et sont sous-tendues par des systèmes qui fonctionnent indépendamment⁶⁷ (voir table 3 pour un récapitulatif), même s'ils peuvent s'influencer⁶⁸. La différence entre le 2D et le 3D n'est fortement mise en évidence que dans des tâches motrices où une action doit être entreprise ; la plupart des études n'obtiennent en effet aucune différence de performance entre le 2D et le 3D dans des tâches telles qu'estimer verbalement une distance (Falk et al., 2001 ; Servos, 2000, Servos & Goodale, 1994 ; Servos et al., 1992). La plupart des réponses motrices implique des processus précis, corrects, acquis et pratiqués de longue date (Loomis, da Silva, Fujita & Fukusima, 1992). Ce type de réponse produit une mesure plus directe, précise et « pure » (qui comprend moins de biais et de processus intermédiaires) de la distance perçue. Par toutes ces caractéristiques, les réponses motrices semblent être une mesure plus pertinente à utiliser lors de l'étude de l'estimation des distances que les réponses verbales (Loomis & Knapp, 2003).

Table 3 : Récapitulatif des caractéristiques des distances égocentriques et allocentriques

Réponses verbales	Réponses motrices
Peu de différence 2D-3D dans l'estimation des distances	Meilleure estimation des distances en 3D qu'en 2D
Dépendent du système perceptif	Dépendent du système visuo-moteur
Intervention des processus conscients	Pas ou peu d'intervention des processus conscients
Dépendent des mécanismes de la voie ventrale	Dépendent des mécanismes de la voie dorsale

La contrainte temporelle

Il semble que le fait d'inclure ou non une contrainte temporelle dans le protocole expérimental peut influencer la différence entre la vision en 2D et en 3D. Comme nous l'avons vu précédemment, les indices binoculaires sont traités plus rapidement que les indices monoculaires (Greenwald et al., 2005). Les contraintes temporelles doivent donc jouer sur leur efficacité respective. Dans ses travaux, Foley (1977, Foley & Held, 1972) a montré que les sujets surestimaient les distances en vision monoculaire ainsi qu'en

⁶⁷ Ce qui rejoint la position des auteurs qui postulent l'existence de deux voies différentes avec d'un côté une voie pour la reconnaissance et les processus plus conscients (tels que les jugements ou estimation de distances verbaux) et de l'autre côté une voie pour le contrôle visuo-moteur (Servos, 2000 ; Milner & Goodale, 1992).

⁶⁸ Pagano et Bingham (1998) montrent ainsi que l'estimation verbale perturbe le mouvement d'approche concomitant, l'intervention des processus conscients (qui produisent un jugement verbal erroné) entravant alors le bon fonctionnement du processus automatique, moins contrôlé, du mouvement d'approche.

vision binoculaire (et cela, aussi bien dans leurs réponses verbales que motrices) quand les cibles étaient présentées dans l'espace direct sans aucune contrainte temporelle. Dans une étude plus récente, Servos (2000) montre également que lorsque les sujets doivent estimer verbalement la distance sans contrainte temporelle, l'utilisation du seul système monoculaire ne présente pas de déficit par rapport à la vision binoculaire, les performances déficitaires en vision monoculaire se manifestant surtout lorsque les sujets doivent émettre assez rapidement une réponse motrice exigeant une certaine habileté. Enfin, Mazyn et al. (2004) ont montré que les différences entre le 2D et le 3D étaient fortement réduites lorsque les contraintes temporelles étaient allégées.

Environnements réels versus virtuels

Rose et Foreman (1999) soulignent le fait que les comportements perceptif et sensori-moteur peuvent être significativement différents dans le monde réel et virtuel. De la même façon, les charges cognitives associées au traitement de l'information dans les environnements réel et virtuel ainsi que les traitements cognitifs eux-mêmes peuvent ne pas être les mêmes. Ces deux environnements ne contiennent pas le même type d'information. Par exemple, l'information proprioceptive est très souvent absente dans les environnements virtuels. Cette dernière procure pourtant des informations sur la localisation du sujet par rapport à l'objet, donnée essentielle pour la formation de la représentation égocentrique de l'espace ainsi que pour l'interaction avec l'environnement. Dans d'autres situations où l'information proprioceptive n'est pas disponible (par exemple, chez certains patients atteints de lésions cérébrales), plusieurs auteurs ont montré que la vision pouvait se substituer de façon efficace à l'information proprioceptive (Jeannerod et al., 1984).

Dans les environnements réels, l'estimation verbale de distance égocentrique sous-estime approximativement dans 90% des cas la distance exacte (Foley, Ribeiro-Filho & Da Silva, 2004). Dans les environnements virtuels, les distances égocentriques sont également largement sous-estimées (au minimum de 50%, Thompson et al., 2004 ; Witmer & Kline, 1998). L'estimation des distances exocentriques quant à elle, est moins étudiée dans les environnements virtuels et met en évidence des performances assez bonnes (correctes à environ 90%, Waller, 1999).

Les raisons de la sous-estimation de la distance égocentrique dans les environnements virtuels ne sont toujours pas identifiées à l'heure actuelle, malgré plusieurs études qui ont comparé des technologies plus ou moins réalistes ou sophistiquées (Richardson & Waller, 2005). Richardson & Waller (2005) ont cependant montré qu'une brève période d'apprentissage permet d'améliorer les performances et de les rapprocher de la distance exacte quand un feedback de correction est donné. En outre, les auteurs ont montré que

cette amélioration persiste dans le temps (une semaine dans leur étude). Il semblerait toutefois que ce feedback correctif ne modifie pas le percept en lui-même mais plutôt la façon dont l'information de distance est traitée.

2 LA CHIRURGIE MINIMALE INVASIVE : APPROCHE METHODOLOGIQUE

La chirurgie minimale invasive constitue un champ extrêmement riche à exploiter, aussi bien sur le plan théorique que pour les applications qui peuvent en découler. Toutefois, ce domaine se révèle difficile à investiguer de manière uniforme en raison des variations qui peuvent apparaître entre les études (telles que nous l'avons mis en évidence à la fin du chapitre précédent) ; celles-ci sont notamment fonction du choix de la population (novice-expert), de l'instrument utilisé et de la nature des tâches à réaliser. De fait, les conditions expérimentales et la méthodologie utilisée déterminent en grande partie les résultats et les conclusions subséquentes. Dans cette dernière partie théorique, notre objectif est de présenter et de justifier la méthodologie adoptée dans nos études expérimentales : les techniques utilisées, le choix de la population, les tâches utilisées et les variables mesurées.

2.1 *Analogies et apports par rapport aux études classiques de psychologie cognitive*

Dans tous les paradigmes expérimentaux traditionnels de psychologie cognitive, les conditions visuelles sont manipulées de façon artificielle, créant des situations non naturelles et nouvelles dans lesquelles les sujets ont peu d'expérience (Mazyn et al., 2004). Comme nous l'avons souligné au début de ce chapitre, une des limites majeures des recherches classiques sur l'influence des indices monoculaires et binoculaires est le manque de validité écologique de la condition monoculaire qui est souvent créée en couvrant un œil (laissant l'œil dominant découvert), ce qui entraîne la perte non seulement des indices binoculaires mais aussi des sources d'information monoculaire provenant de l'œil caché (Mazyn et al., 2004 ; Collewijn & Erkelens, 1990 ; Lee, 1976).

En optant pour le contexte particulier de la chirurgie minimale invasive, nous avons pu contourner ce double inconvénient des études plus classiques. Premièrement, la condition 2D que nous avons mise en place permettait aux sujets de réaliser leurs tâches avec les deux yeux, ne nécessitant pas de couvrir un œil. Ensuite, ce contexte d'étude nous procurait une situation provenant d'un environnement réel, constitué de novices et d'experts. Nous avons choisi de confronter nos sujets à des types de tâches et à des instruments en cherchant à nous rapprocher des caractéristiques des situations habituelles d'activité finalisée. Du point de vue du dispositif, cela nous a conduit à utiliser des instruments d'un degré de complexité bien différent (puisqu'il s'agit d'un

robot chirurgical) de ceux habituellement utilisés dans des études classiques de psychologie cognitive.

Par ailleurs, une analogie intéressante à souligner entre notre contexte expérimental et celui des études plus classiques en psychologie cognitive est que dans ces dernières, les sujets utilisent classiquement le pouce et l'index dans les mouvements d'approche et de préhension, doigts qui sont également utilisés pour manipuler les instruments et réaliser les gestes en laparoscopie classique ainsi qu'avec le robot (le robot reproduisant tout à fait le geste de préhension naturel des doigts, voir figure 11). Cependant, Gentilucci, Roy & Stefanini (2004) montrent que s'il existe des similarités entre le geste de préhension avec et sans instrument, des différences sont également observables, surtout au niveau de l'aspect temporel du mouvement : les gestes avec l'instrument seraient plus lents car ils ne seraient pas contrôlés par les informations proprioceptives (absentes lors de l'utilisation de l'outil) mais par la vision, qui traite plus lentement les informations.



Fig. 11 : Manettes de manipulation du robot

2.2 *La nécessité de la simulation en chirurgie minimale invasive*

Le contexte d'étude particulier que nous avons investigué nous a conduit à construire des tâches et à utiliser des conditions expérimentales proches de celles rencontrées en situation réelle. La simulation est une technique utilisée dans de nombreux secteurs qui traitent des situations complexes (notamment, l'aviation et l'anesthésie). Elle présente également un intérêt croissant dans le domaine de la chirurgie, principalement à trois niveaux : pour la formation des futurs chirurgiens, pour l'évaluation des nouveaux instruments et technologies, et enfin, pour la recherche fondamentale.

Dans une perspective didactique

Une des grandes spécificités de la chirurgie est qu'elle ne s'apprend pas exclusivement de manière livresque mais plutôt sur le terrain (Dawson & Kaufman, 1998), avec tous

les avantages et les risques que cette méthode pédagogique comporte. Les principaux inconvénients⁶⁹ de cette pratique sont les risques de dommages pour le patient si l'assistant commet une erreur, ainsi que le coût en temps et en ressources qui sont nécessaires (par exemple, le coût de formation d'un assistant en chirurgie était de l'ordre de \$76 470 par an en 1995, Dawson & Kaufman, 1998 ; Bridges & Diamond, 1999 ; Anastakis et al., 1999). Toutefois, l'apprentissage des habiletés chirurgicales est une période déterminante pour la suite de la carrière de chirurgien : le succès de la chirurgie, le temps opératoire et le taux de morbidité sont en effet directement reliés aux habiletés de manipulation (Darzi et al., 2001 ; Chan et al., 1997). En outre, avec l'arrivée des nouvelles technologies telles que la chirurgie minimale invasive, qui transforment les procédures, il est devenu nécessaire d'envisager un enseignement différent, de trouver une façon d'entraîner les futurs chirurgiens et d'améliorer leurs habiletés par des entraînements et des modules de formation en dehors des salles d'opération⁷⁰(Vassiliou et al., 2005 ; Moorthy et al., 2003 ; Hamilton et al., 2002 ; Haluck & Krummel, 2000 ; Gallagher et al., 1999). Ces derniers sont d'ailleurs demandeurs d'une mise en place de tels systèmes d'apprentissage et d'entraînement (Chiasson et al., 2003 ; Rattner et al., 2001).

Afin de pallier les nombreux obstacles posés par les méthodes d'apprentissage classique dans le domaine de la chirurgie minimale invasive, l'idée de recourir à des séances de simulation pour entraîner et aider à l'acquisition des habiletés chirurgicales s'est de plus en plus développée en s'appuyant sur le fonctionnement des simulateurs déjà fort perfectionnés et exploités dans le domaine de l'aviation et de l'anesthésie (Shah et al., 2002).

Plusieurs simulateurs ont été conceptualisés dans le domaine de la chirurgie minimale invasive, mais peu sont réellement et fréquemment utilisés. Plutôt que de construire des systèmes hautement perfectionnés et coûteux qui reproduisent l'anatomie humaine de façon très approximative et qui, de la sorte, ne se révèlent pas d'une grande utilité dans les apprentissages par rapport à la formation directe en salle d'opération, il s'avère que des simulateurs assez simples, tels que les pelvytrainers (voir fig.12), qui permettent de réaliser des tâches de base (passer une aiguille dans des anneaux, transporter des petites pièces d'un point à un autre, effectuer un nœud...), sont très adéquats pour l'apprentissage des habiletés chirurgicales. Ainsi, le MIST (*minimally invasive surgical training system*) reproduit un environnement de laparoscopie classique qui reprend un ensemble de tâches simples et basiques mais très pertinentes pour l'acquisition des

⁶⁹ Inconvénients qui sont ceux que l'on retrouve dans la plupart des systèmes complexes à risque tels que l'aviation.

⁷⁰ En effet, un grand nombre de cas de complications rapportées dans la littérature lors de l'introduction de la laparoscopie classique au début des années 90 est expliqué l'apprentissage mal encadré de cette nouvelle technique à l'époque (Hernandez et al., 2004 ; Z'graggen et al., 1998 ; Shea et al., 1996).

habiletés élémentaires en chirurgie (appelées tâches « primitives », car elles comprennent un ensemble de procédures et d'habiletés nécessaires à toute intervention chirurgicale, Stone & McCloy, 2004 ; Gallagher & Satava, 2002 ; Derossis et al., 1998). Plusieurs études ont démontré le transfert et l'amélioration des compétences obtenues à partir de situations de simulation avec des objets inanimés (*pelvic trainer*), en salle d'opération⁷¹ (Hamilton et al., 2002 ; Scott et al., 2000). En outre, les entraînements en dehors des salles d'opération ont des effets positifs sur le bien-être : ils diminuent l'anxiété et procurent aux assistants plus de confiance en eux et de confort lorsqu'ils sont ensuite en situation réelle, en salle d'opération (Hamilton et al., 2002 ; Issenberg et al., 1999 ; Melvin et al., 1996). Selon certains auteurs toutefois, ces environnements virtuels devraient être repensés et reconfigurés pour avoir un aspect plus réaliste avant de les utiliser comme outil de formation (Brydges et al., 2005 ; Reznick, 1999). En outre, il n'existe à l'heure actuelle aucun module de formation objectif et reconnu ayant montré un impact réel sur les performances en salle d'opération. La plupart des modules qui existent sont plutôt évaluatifs que formatifs et n'aident pas l'assistant à développer une compréhension concrète des aspects particuliers des habiletés techniques qui doivent être améliorées (Vassiliou et al., 2005).

Dans une perspective fondamentale

D'abord conçus dans un objectif de formation, les simulateurs sont aujourd'hui utilisés dans d'autres perspectives et notamment, comme outil de recherche fondamentale afin d'étudier, dans des conditions contrôlées et reproductibles, des processus dynamiques et complexes qui ne peuvent être appréhendés par des tâches de laboratoire classiques (Nyssen & De Keyser, 1998 ; Nyssen, 1997 ; Leplat, 1997). Les études de laboratoire montrent en effet des limites écologiques importantes dues à la difficulté de reproduire la complexité du monde réel dans lequel l'expertise peut s'exprimer dans toute sa richesse et nuance. Les activités de certains domaines d'expertise peuvent toutefois être plus aisément reproduites en laboratoire (comme certaines tâches motrices telles que dactylographier, ou certaines tâches de raisonnement impliquées dans une partie d'échecs). D'autres activités, par contre, nécessitent des approches plus écologiques dans des contextes bien spécifiques. Les simulateurs procurent alors un contexte d'étude adéquat qui se situe entre les environnements naturels qui, par leur caractère imprédictible et incontrôlable, procurent des résultats difficilement exploitables au-delà d'une perspective exploratoire, et les recherches de laboratoire qui, mieux contrôlées,

⁷¹ Certaines études ne montrent cependant pas d'effet bénéfique (Traxer et al., 2001). Mais, de nouveau, des différences méthodologiques peuvent être à l'origine de ces contradictions.

limitent la portée des conclusions tirées à partir de données récoltées dans un environnement artificiel et dénué de sens pour le sujet.

Le robot chirurgical comme outil de formation ?

Plusieurs questions se posent quant aux objectifs que peut remplir le robot *da Vinci* en matière de formation et de simulation. Certains auteurs préconisent son utilisation comme nouvel instrument d'apprentissage des procédures laparoscopiques, en raison de la facilité avec laquelle tout chirurgien, novice ou expert, parvient à le manier (Yohannes et al., 2002). Hernandez et al. (2004) ne montrent ainsi pas de différence entre les chirurgiens experts en laparoscopie et les novices, suggérant donc que le robot peut offrir le même niveau de performance, quelle que soit l'expérience préalable en laparoscopie. Badani et al. (2004) montrent quant à eux que les chirurgiens qui ont six mois d'expertise avec le robot sont plus rapides que les chirurgiens n'ayant jamais utilisé le robot.

Dans notre étude, nous comparerons les performances en laparoscopie classique (sur pelvi-trainer, voir fig. 12) avec celles sur le robot. Un des objectifs de notre thèse sera de répondre à la question de l'utilisation du robot *da Vinci* comme outil de formation des futurs chirurgiens.



Fig. 12 : Exemple de pelvi-trainer.

2.3 *La définition de la compétence chirurgicale*

Parmi nos objectifs, notre étude a l'intention d'étudier des populations de différents niveaux d'expertise. Cependant, qu'est-ce que la compétence chirurgicale ? Et surtout comment peut-on l'évaluer ? Ces deux questions fondamentales sont très souvent posées dans la littérature chirurgicale, parfois en filigrane, parfois de manière explicite. Les chirurgiens se sentent de plus en plus concernés par cette question, surtout dans le monde académique et de la formation continue, en raison notamment des décisions de réorganisation et de financement des soins de santé ainsi que de la prise de conscience et de l'intérêt toujours croissant porté à l'incidence des erreurs médicales, particulièrement aux Etats-Unis, même si ce phénomène commence à prendre de l'ampleur sur le vieux continent (Risucci, 2002).

La compétence chirurgicale peut être conceptualisée par un grand nombre de caractéristiques, certaines étant également des éléments essentiels dans d'autres domaines (par exemple, dans l'aviation, Shah et al., 2002 ; Trunkey & Botney, 2001).

La compétence chirurgicale est une entité difficilement définissable. En effet, ne parler déjà que d'entité signifie que l'on place des limites, des frontières qui délimiteraient le savoir, les connaissances qu'un chirurgien doit maîtriser. Or ces frontières, s'il est possible de les localiser, embrassent un champ d'expertise extrêmement vaste et diversifié : ce dernier contient aussi bien des aspects gestuels, procéduraux et moteurs que des connaissances déclaratives portant sur des stratégies opératoires, des identifications d'organes ou des diagnostics à réaliser. En outre, ces connaissances sont utilisées dans un milieu dynamique qui évolue, qui est différent pour chaque patient, où la même situation ne se reproduit jamais une seconde fois à l'identique. Selon certains auteurs (Ericsson, 1994), un expert dans un domaine doit maîtriser toutes les connaissances et les habiletés importantes concernant ce domaine. Cependant, vu le caractère intangible de l'expertise en chirurgie, sa mesure en est tout aussi problématique (Carthey, de Leval & Reason, 2000).

Deux procédures peuvent être classiquement utilisées pour différencier des populations expertes : soit les sujets ont une expertise artificiellement créée pour l'expérimentation (des sujets novices sont sur-entraînés à effectuer une tâche, voir, par exemple, Gauthier et al., 1998), soit les sujets ont une réelle expertise dans un domaine qui peut être évaluée dans une situation où les paramètres sont contrôlés. Dans notre cas, nous avons la chance de nous trouver dans la deuxième situation, avec des sujets possédant une réelle et riche expertise dans le domaine.

Le deuxième aspect méthodologique sur lequel il convient de se pencher est la détermination du seuil d'expertise : en effet, à partir de quel moment, un individu est-il considéré comme expert ? Cette question cruciale est d'ailleurs très probablement à l'origine des résultats peu consistants rapportés dans la littérature et se pose d'autant plus lorsque l'on doit différencier plusieurs niveaux d'expertise. Divers critères peuvent être pris en compte pour évaluer le niveau d'expertise : l'expérience, la performance à un pré-test⁷², la spécialité, la qualification, la position dans l'entreprise ou dans l'organisation, ou encore la sélection par les pairs⁷³ (Farrington-Darby & Wilson, 2006). Pour chaque caractéristique, des « sous-critères » de sélection peuvent encore être différenciés : par exemple, quand on parle d'expérience⁷⁴, on peut considérer le nombre d'années de pratique (Ericsson (1994) et Chase & Simon (1973) évaluent à dix ans le nombre nécessaire d'années de pratique pour devenir expert), la fréquence passée/actuelle de la pratique (un expert peut ne plus avoir pratiqué depuis plusieurs années), le nombre de situations traitées (nombre de parties d'échecs, d'opérations chirurgicales...), le nombre d'heures de pratique (Ericsson et al., 1993).

Il nous fallait, dans le cadre de nos études, définir un critère nous permettant de différencier les niveaux d'expertise. Dans la plupart des études en chirurgie, l'expertise n'est pas souvent établie à partir du nombre d'années de pratique mais elle est plutôt évaluée par le nombre d'opérations réalisées, critère qui semble plus adéquat pour refléter la compétence dans ce domaine (Hernandez et al., 2004). C'est ce critère que nous avons donc retenu pour différencier les experts dans la partie expérimentale de notre étude.

2.4 La tâche ou activité étudiée

Plusieurs aspects de la tâche doivent être évalués en détail avant son utilisation. Le niveau de difficulté de la tâche est un élément déterminant. Il s'agit en effet d'éviter un effet plancher avec une tâche trop simple chez les experts ou au contraire, un effet

⁷² La performance à un pré-test pose un problème crucial, et non des moindres, qui est celui de choisir un test approprié : si l'expérimentateur choisit un test similaire aux tâches utilisées dans la condition expérimentale, le pré-test peut déjà être considéré comme étant partie intégrante de l'expérimentation et le raisonnement utilisé pour classer les experts devient circulaire, d'un autre côté, si au contraire, le pré-test étudie des compétences tout à fait différentes de celles évaluées dans l'expérimentation, sa validité dans la catégorisation des experts peut être remise en question (Farrington-Darby & Wilson, 2006).

⁷³ Ces deux derniers critères souffrent d'importantes limitations méthodologiques, les sujets étant haut placés dans la hiérarchie ou reconnus comme experts par leurs pairs n'étant pas toujours experts dans le domaine étudié. Certains auteurs ont par exemple montré des différences entre des experts reconnus comme tel sur le plan social et des experts identifiés par leur performance réelle (Ericsson et Charness, 1994).

⁷⁴ La justification théorique du choix de l'expérience comme critère déterminant les experts est le postulat sous-jacent que l'expertise se développe avec le temps et la pratique (Ericsson et al., 1993).

plafond chez les sujets novices qui rencontreraient trop de difficulté dans la réalisation de la tâche (Farrington-Darby & Wilson, 2006).

Le degré de familiarité de la tâche ainsi que le réalisme et la signification qu'elle a pour le sujet sont également des facteurs qui peuvent influencer la différence obtenue entre des sujets experts et novices (Ericsson & Smith, 1991). Dans de nombreuses études, le fait de séparer les liens qui existent habituellement entre la perception et l'action peut limiter les capacités des experts à utiliser et démontrer pleinement leurs capacités, masquant ainsi certaines caractéristiques significatives qui les distinguent des sujets novices moins performants (Abernethy, Gill, Parks & Packer, 2001 ; Williams et al., 1992).

Dans le cadre de nos expériences, nous avons pris soin de construire des tâches motrices en rapport avec les tâches réalisées en chirurgie. Pour les raisons que nous détaillons ci-dessous, l'utilisation de cadavres, humain ou animal, n'a été introduite dans aucun de nos protocoles expérimentaux. Les expériences à partir de cadavre humain permettent les études les plus écologiques par l'exposition à une anatomie identique à celle des humains vivants. Cependant, cette situation expérimentale, outre le coût, les questions éthiques et les problèmes de disponibilité qui y sont liés, se distingue encore de la réalité notamment par la qualité des tissus humains moins souples et distincts en apparence (Hamilton et al., 2002). Les modèles d'animaux peuvent être obtenus plus facilement et sont moins onéreux. Cependant, leur anatomie diffère de celle des êtres humains et des problèmes éthiques sont également soulevés quant à l'utilisation des animaux à des fins expérimentales. Si l'apprentissage de nouvelles habiletés à partir d'êtres vivants est important avant une application clinique, les modèles inanimés constituent un moyen d'apprentissage qui, bien que critiqué comme non réaliste, est sûr, facilement disponible, d'un coût financier raisonnable, exigeant peu de supervision et offrant une pratique et une répétition illimitées⁷⁵ (Shah & Darzi, 2003 ; Scott et al., 2001 ; Anastakis et al., 1999).

2.5 *Le type de mesure*

Le type de mesure utilisée peut être fort différent d'une étude à l'autre en fonction du domaine investigué et de l'objectif poursuivi. La performance évaluée peut inclure des comportements tout aussi divers que des actes moteurs, des raisonnements, des prises de décision, des résolutions de problèmes, etc. Si certaines études se focalisent sur la

⁷⁵ Aspect très important lors d'évaluation des compétences ou d'études comparatives pour que les conditions expérimentales soient identiques pour tous les sujets et permettent des comparaisons objectives (Hernandez et al., 2004).

performance ou le produit final (mesurant ainsi la précision, la vitesse d'exécution...), d'autres au contraire se préoccupent du raisonnement antérieur et des étapes qui ont donné lieu au résultat (dans des situations notamment où il n'existe pas toujours une seule réponse correcte).

Tout au long de notre travail, nous avons distingué deux grands types de variables, avec d'un côté les mesures objectives et directement observables de la performance, et d'un autre côté les variables que l'on peut qualifier de subjectives, qui reprennent les impressions du sujet et qui ne sont appréhendables qu'indirectement, au travers d'un questionnaire auquel le sujet répond.

Mesures objectives des performances

Comme nous l'avons souligné à de multiples reprises, la compétence chirurgicale est une entité complexe, avec de larges frontières, difficilement définissable et donc difficilement mesurable (Scott et al., 2001). Malgré ces difficultés et les nombreuses critiques qui ont été formulées à leur encontre, les mesures objectives quantitatives restent un élément essentiel de l'évaluation d'une habileté ; elles doivent cependant être améliorées en intégrant le maximum d'aspects pertinents de la tâche. Dans nos études, nous avons établi un score pour la plupart des tâches afin de refléter de la manière la plus adéquate possible la qualité de la performance du sujet (Derossis et al., 1998). Nous avons également analysé en détail, dans une étude (étude 4), le type d'erreurs commises par les sujets. Enfin, pour certaines tâches pour lesquelles l'établissement d'un score posait d'importantes difficultés, le temps d'exécution de la tâche a alors été enregistré (Hubens et al., 2003).

Evaluation subjective des performances par les sujets

La psychologie ergonomique a longtemps favorisé l'étude de l'activité à partir de la tâche plutôt qu'à partir de l'agent (Leplat, 1997). Ces deux composantes sont pourtant essentielles et très étroitement liées dans toute activité, l'une influençant et dépendant de l'autre.

C'est pourquoi, dans notre plan expérimental, nous étudions également, à côté des mesures plus objectives décrites ci-dessus, le degré de certitude, de satisfaction et de difficulté des sujets placés dans les différentes conditions. Ces trois facteurs interviennent dans les processus de défense décrits par Amalberti (1996) que sont l'expérience, la métaconnaissance et la confiance et qui entrent dans l'évaluation du

risque par l'opérateur. Etudier ces trois facteurs dans l'utilisation des nouvelles technologies en chirurgie en établissant le rapport avec le traitement des images en 2D et 3D, constitue une donnée importante relevant à la fois de la perspective fondamentale et appliquée. Relevons d'abord les aspects cognitifs et perceptifs ; plusieurs études ont montré que le fait de supprimer la vision binoculaire induisait une plus grande « incertitude perceptive ». Le sujet ayant moins d'indices perceptifs pour contrôler son action, sa performance montrerait beaucoup de variations (attribuables aux réajustements multiples) et beaucoup plus d' « incertitudes » en vision 2D qu'en 3D (Loftus et al., 2004). Notre objectif est d'étudier comment cette incertitude perceptive est traitée par le sujet, de vérifier s'il en a conscience et s'il la rapporte explicitement dans un questionnaire. Sur le plan appliqué, plusieurs recherches ont montré l'importance de ces facteurs dans les processus d'acceptation de nouvelles technologies ou de changements (Marshall et al., 2001 ; Jones & Cale, 1997 ; Muir & Moray, 1996 ; Muir, 1994). Un score élevé dans ces facteurs est en outre corrélé avec le niveau de performance qui s'améliore avec la confiance des sujets en eux, leur satisfaction et la perception de la complexité de la tâche et cela, de manière encore plus significative dans le domaine de la chirurgie que dans d'autres domaines de la médecine (Carter et al., 2005 ; Marshall et al., 2001).

La notion de confiance

La confiance est un critère essentiel dans la conduite de systèmes à risque. Amalberti (1996) la considère comme essentielle à la réalisation du « compromis cognitif » que le sujet essaye d'opérer entre le coût de son activité (charge, fatigue) et le risque qu'elle représente. Pour reprendre les arguments d'Amalberti (p. 174), « il s'agit d'une variable intermédiaire cruciale dans la gestion du compromis cognitif car elle permet d'accepter un certain niveau de risque externe et interne. Elle s'appuie sur la distinction entre la notion de confiance en soi (égocentrée) et en la machine (exocentrée) ». Cette notion déduite et décrite par Amalberti (1996) lors de l'observation de pilotes d'avions, reproduit tout à fait la situation dans laquelle se retrouve un chirurgien dans les choix qu'il entreprend lors d'une intervention. Ainsi par exemple, quand l'image reproduite par la caméra n'est plus tout à fait nette, le chirurgien va poursuivre l'intervention jusqu'à ce qu'il évalue que l'effort qu'il doit fournir et le risque encouru avec cette mauvaise image deviennent trop coûteux par rapport à l'interruption de la dissection pour nettoyer l'optique. Cette évaluation du risque s'effectue en fonction de la confiance que le chirurgien a de ses capacités ainsi que de celle qu'il place dans la machine qu'il est en train d'utiliser.

C'est de cette manière que la confiance dans le système (comprenant soi-même et l'ensemble de la situation) intervient dans la régulation de l'activité. Si elle est élevée, la charge de travail sera allégée ; toutefois, un excès de confiance présente également des risques. Ainsi, dans notre exemple, le chirurgien se reposant trop sur ses capacités et/ou celles du système et continuant à opérer à partir d'une image floue ou dégradée augmentera les risques de sectionner accidentellement un mauvais vaisseau ou éprouvera des difficultés fort importantes pour réaliser correctement ses actions. A l'opposé, l'émergence du sentiment de stress diminue la confiance et fort logiquement augmente la charge de travail tout en affectant la performance (Hong, 1999 ; Amalberti, 1996). En outre, la confiance est un sentiment fragile qui peut rapidement chuter et qui ne remonte que difficilement ; elle se base en effet plus sur les conséquences immédiates, spécifiques et négatives des événements que sur les aspects plus permanents et positifs de l'environnement (Muir & Moray, 1996).

La confiance est principalement fondée sur les métaconnaissances qu'a l'opérateur de ses capacités (Kruger & Dunning, 1999). Elle est influencée par les résultats de la pratique : des résultats positifs renforceront la confiance dans l'emploi futur des savoir-faire, tandis que des résultats négatifs freineront la confiance et réduiront l'intention de réutiliser les mêmes savoir-faire que ceux qui ont mené à cette évaluation négative. A ce niveau, l'expertise joue également un rôle majeur : si la confiance est liée à la connaissance que le sujet a de ses compétences, un expert doit alors avoir une confiance qualitative plus élevée qui l'autorise à accepter plus de risques parce qu'il sait qu'il pourra plus aisément les contrôler (Amalberti, 1996 ; Weill-Fassina et al., 1993). Cette stratégie comportementale se traduira également par une plus grande adaptabilité et flexibilité de l'opérateur.

La confiance semble évoluer en trois phases (Amalberti, 1996) :

- Phase initiale ou phase de défense : l'opérateur qui possède un minimum de connaissances au départ de sa pratique n'est pas sûr de lui : son mode de fonctionnement est très rigide et est soumis à un contrôle très exigeant qui implique massivement les processus conscients.
- Phase d'exploration ou d'acquisition de la confiance : les premiers automatismes apparaissent, l'opérateur est plus à l'aise et a le sentiment de posséder un savoir-faire suffisant (surtout sur un plan quantitatif) pour maîtriser de façon adéquate l'exécution de la tâche dans ses variantes les plus courantes. Cette étape est marquée par une simplification et rigidification des procédures.
- Phase de rétraction ou de préférence : les savoir-faire sont entièrement automatisés, la confiance évolue sur le plan qualitatif : il ne s'agit plus de

développer un grand nombre de savoir-faire efficaces mais plutôt un « savoir gérer » son propre fonctionnement. Cette confiance qualitative autorise ponctuellement l'opérateur à accepter plus de risques et procure une plus grande adaptabilité aux diverses situations.

Les notions de satisfaction et de difficulté

Ces deux notions sont importantes et fortement liées à la confiance que le sujet a dans ses capacités. La satisfaction intervient dans l'évaluation de la performance et la motivation qui en découle. De plus, plusieurs études ont montré que la satisfaction avait un impact direct sur la performance motrice (Theodorakis, 1996) et sur l'expression des compétences en général (Fernandas, Mills & Fleury, 2006).

La confiance est également influencée par la perception de la difficulté de la tâche à réaliser, facteur qui peut générer de l'anxiété. La perception de la difficulté n'aurait toutefois pas un effet direct sur la performance en elle-même : elle agirait plutôt indirectement (et de façon négative) sur la performance, au travers de l'anxiété provoquée et alimentée par ce sentiment de difficulté (Hong, 1999). La sensation de difficulté est un sentiment personnel et variable d'une exécution à l'autre. Elle se différencie de la complexité par le fait que la seconde renvoie à des éléments observables et est « objective », externe à l'individu, tandis que la première est liée au vécu personnel de l'individu et à l'évaluation de sa performance par rapport à l'ensemble de ses savoirs et savoir-faire (Amalberti, 1996).

Les métaconnaissances interviennent à nouveau dans la formation de ces deux concepts et sont liées à l'expertise. Par exemple, selon Kruger et Dunning (1999, 2002), le phénomène de surestimation de la performance observé chez les sujets novices, alors que les experts ont plutôt tendance à sous-estimer leur performance, s'explique par le manque de métaconnaissances exploitées par les premiers. Les données très récentes de l'étude de Burson, Larrick et Kalyman (2006) modèrent toutefois cette affirmation en précisant qu'elle n'est valable que pour certains types de tâches que les sujets novices évaluent comme très simples, et que la proposition s'inverse complètement dans les tâches que les sujets novices évaluent comme difficiles.

Enfin, le type de feedback et la façon dont ce dernier est utilisé sont également des éléments qui influencent l'évaluation subjective de la performance et des deux notions de satisfaction et de difficulté qui y sont liées (Burson et al., 2006).

3 CONCLUSIONS

Ce dernier chapitre théorique nous a permis de tracer et de justifier les aspects méthodologiques que nous allons appliquer à l'ensemble de notre recherche. Au vu de l'importance significative des différents points théoriques abordés dans cette partie, il nous a semblé plus approprié de placer ce chapitre dans notre partie théorique. Notre étude utilisera ainsi des tâches motrices qui reflètent de manière plus pertinente l'interaction naturelle qui lie la perception à l'action (Loomis & Knapp, 2003). Nous comparerons deux instruments, la laparoscopie classique et le système robotique, au travers de l'exécution de tâches motrices, construites sur des modèles inanimés, par des sujets d'un degré d'expertise varié. La performance des sujets sera évaluée par des mesures à la fois objectives (score, qualité du geste ou temps d'exécution) et subjectives (confiance, satisfaction et difficulté évaluées par un questionnaire).

**PARTIE III : HYPOTHESES ET ASPECTS
METHODOLOGIQUES**

Hypothèse directrice et objectif des études

Les images en 2D et en 3D n'ont pas le même impact sur le traitement de l'information et influent donc différemment sur les actions des sujets. Notre hypothèse directrice est la suivante : les effets des images en 2D et en 3D sur l'action ne sont pas constants et seront donc modulés (augmentés ou diminués) sous l'influence de certains facteurs contextuels. C'est ceux-ci que nous nous proposons d'étudier dans la partie expérimentale de ce travail.

Comme nous l'avons souligné dans notre partie théorique, le contexte joue un rôle essentiel dans l'utilisation et l'efficacité des indices monoculaires et binoculaires (Jackson et al., 1997). Ces facteurs contextuels relèvent de divers ordres : expertise des sujets ; complexité d'une tâche qui doit être résolue par le biais d'images en 2D ou en 3D ; instruments utilisés pour résoudre cette tâche. Nous formulons donc l'hypothèse que toutes ces variables contextuelles interfèrent avec le traitement des images en 2D et 3D, et amplifieront ou au contraire réduiront l'écart entre les deux conditions visuelles, dans un processus orienté vers l'action (ici, la résolution d'une tâche). En d'autres termes, nous voulons vérifier si la différence entre 2D ou 3D est un facteur qui pèse de manière déterminante dans les mécanismes qui conduisent de la perception à l'action. Selon nous, d'autres facteurs s'insèreraient dans la boucle perception-action, et pourraient moduler l'impact des mécanismes perceptifs sur l'accomplissement de l'action.

Pour mener à bien cette enquête, nous avons choisi cette situation complexe et finalisée qu'est la chirurgie minimale invasive. Les facteurs contextuels qui seront investigués dans ce domaine spécifique, à grande validité écologique, seront l'étude de la complexité de la tâche (Jackson et al., 1997) et l'expertise des sujets.

Il nous a semblé en outre extrêmement intéressant d'introduire une composante contextuelle évolutive, en mesurant l'impact de l'apprentissage d'une tâche complexe (Marotta et al., 1998) sur la différence habituellement observée entre 2D et 3D.

Enfin, dans toutes nos études, nous avons voulu déterminer précisément l'importance de la dimension instrumentale : dans quelle mesure celle-ci n'a-t-elle pas une influence prépondérante sur l'action, qui passe même au premier plan devant les facteurs strictement perceptifs ?

a) Les études : objectifs et hypothèses

Dans une **étude préalable**, une première analyse exploratoire a été réalisée afin de déterminer l'impact des images en 2D et 3D sur la performance d'un large échantillon

de sujets novices (n=224) dans une tâche simple. Le choix d'une population de sujets novices, qui n'avaient aucune expérience particulière dans le traitement d'images en 2D (contrairement aux chirurgiens habitués à l'utilisation des images en 2D), a été motivé par la volonté d'éviter le biais lié à l'expertise (facteur étudié dans l'étude 2), afin de mesurer pleinement et exclusivement l'impact des facteurs perceptifs en réduisant autant que faire se peut l'impact des facteurs contextuels.

Après cette étude à vocation exploratoire, la première caractéristique contextuelle investiguée était l'influence de la *complexité de la tâche* à réaliser sur le traitement 2D-3D. Nous avons déjà souligné son influence dans notre partie théorique, mais celle-ci reste confuse et sujette à discussion. Cette étude de la complexité de la tâche est particulièrement importante : elle pourrait permettre de résoudre les divergences que l'on relève, d'une part, dans les études de psychologie cognitive, qui soulignent l'importance de la vision binoculaire (3D) dans des contextes complexes ou riches en indices (Jackson et al., 1997) et, d'autre part, dans les études menées en chirurgie minimale invasive qui présentent, quant à elles, des résultats contradictoires quant aux bénéfices de la 3D (Birkett et al., 1994). En fait, ces bénéfices de la 3D ne seraient peut-être pas constants mais fonction de la complexité de la tâche assignée aux sujets.

Afin de répondre à ces questions d'intérêt théorique et appliqué, nos deux premières études se sont attachées à étudier l'impact des images en 2D et 3D, tout d'abord sur une population de sujets novices appelés à résoudre des tâches de complexité variable (étudiants en médecine, **étude 1**) et ensuite sur une population d'experts (chirurgiens, **étude 2**). La première étude avait pour objectif d'étudier le traitement visuel des images en 2D et 3D en fonction de la complexité de l'action, sans que l'influence d'une expérience antérieure ne contamine les résultats.

L'influence de l'expertise dans le domaine chirurgical était l'objet de la **seconde étude** : la performance de chirurgiens experts était comparée à celle des novices en fonction du type d'image traité (2D-3D), dans les mêmes tâches de complexité croissante que celles présentées dans l'étude 1. L'expertise constitue en effet un second facteur, tout à fait inexploré dans la littérature scientifique, qui peut agir sur le traitement des images en 2D et 3D et qui peut être à l'origine des résultats contradictoires présentés dans les différentes études de chirurgie. Dans les salles d'opération, les chirurgiens experts en laparoscopie classique parviennent à opérer de manière extrêmement performante malgré une image en 2D. Ces derniers ont donc acquis des mécanismes efficaces leur permettant de s'orienter et de réaliser correctement des actes précis à partir d'une image dépourvue d'indices visuels binoculaires. L'objectif de la seconde étude est d'analyser les mécanismes de compensation mis en œuvre par les chirurgiens experts lorsqu'ils opèrent dans un environnement appauvri en indices visuels de profondeur et de

comparer ces mécanismes spécifiques à la situation des sujets novices qui n'ont pas cette pratique.

Les **études 3 et 4** étaient, quant à elles, centrées sur le processus d'apprentissage et avaient pour objectif d'étudier spécifiquement l'acquisition des habiletés et l'évolution des performances à partir d'images en 2D et 3D. Nous avons complété les données des études précédentes en analysant les courbes d'apprentissage d'une tâche complexe chez des sujets novices (**étude 3**). Dans un second temps, nous avons approfondi l'étude de l'influence des images en 2D et 3D sur le type d'erreurs commises, ces dernières nous fournissant en retour des informations sur les indices perceptifs que le sujet utilisait et sur la stratégie qu'il adoptait pour diriger son action en 2D et en 3D ainsi que l'évolution de ces indices au cours de l'apprentissage (**étude 4**).

Ces études entendaient répondre à des besoins théoriques comme empiriques. Comme nous l'avons souligné dans notre partie théorique, l'introduction de nouveaux instruments crée des changements dans les procédures chirurgicales et rend nécessaire la mise en place d'un apprentissage spécifique (Prasad et al., 2002). Ce processus d'acquisition des habiletés dans la chirurgie robotique s'avère un champ d'étude extrêmement enrichissant :

D'un point de vue théorique, notre objectif était d'étudier comment des sujets novices se construisaient progressivement une représentation et une stratégie d'action à partir d'images en 2D ou en 3D. Dès lors, il s'agissait de mesurer, chez les sujets, si l'apprentissage d'une tâche (par répétition de celle-ci) modulerait les différences perceptives habituellement observées entre 2D et 3D. Plus particulièrement, l'apprentissage d'une tâche permet-il d'observer, après un certain nombre de répétitions de la tâche en condition 2D, une meilleure utilisation des indices monoculaires qui compenserait la perte de la profondeur ? Cette question est importante, car nous avons relevé dans notre partie théorique que l'usage des indices monoculaires était fonction de l'apprentissage (Marotta et al., 1998). Notre hypothèse était ici que l'apprentissage d'une tâche, particulièrement en condition 2D, développerait l'usage des indices monoculaires et permettrait de réduire l'impact de la perte des indices binoculaires.

Mais cette étude a également des implications sur le plan appliqué. La problématique de l'acquisition des habiletés chirurgicales est au centre des préoccupations du monde académique (Risucci, 2002 ; Darzi et al., 2001 ; Anastakis et al., 1999). Cet intérêt est la résultante de plusieurs facteurs : tout d'abord, certaines techniques, qui présentent de grands avantages pour les patients, ont été introduites sans appréciation réelle de leurs effets sur les apprentissages des chirurgiens : c'est par exemple le cas de la chirurgie minimale invasive, dont les effets sur la courbe d'apprentissage n'ont pas été mesurés (Hernandez et al., 2004 ; Shea et al., 1996).

De surcroît, certaines études, qui prétendent évaluer les « courbes d'apprentissage » des chirurgiens, reprennent sous cette notion des éléments extrêmement variés. Dans les publications consacrées aux procédures chirurgicales et de diagnostic, cette expression est utilisée de plus en plus fréquemment pour désigner le processus d'acquisition de connaissances et d'amélioration des habiletés (Ramsay et al., 2000). Une récente méta-analyse de 275 études a montré que, pour évaluer le niveau d'apprentissage, les auteurs utilisaient les conséquences pour les patients (telles que la survie ou les complications) et les aspects d'assurance qualité tels que le temps pour réaliser la procédure chirurgicale ou le temps d'hospitalisation (Ramsay et al., 2000). Cependant, ces éléments sont souvent considérés comme inappropriés par plusieurs auteurs car ils ne fournissent ni ne correspondent à une définition précise et objective de l'apprentissage (Smith et al., 2001 ; Ramsay et al., 2000). Ces éléments ont un caractère trop général, dépendant du contexte, sans aucun rapport direct avec l'apprentissage même (Hernandez et al., 2004). En outre, plusieurs études ont montré qu'une exécution plus rapide ne présuppose pas que la performance soit correctement réalisée et donc, que la mesure seule du temps opératoire n'est pas suffisante pour indiquer la maîtrise d'habiletés de manipulation laparoscopique (Smith et al., 2001).

On comprend donc mieux que le monde médical et académique ressente la nécessité d'évaluer les progrès des chirurgiens et des assistants tout au long de leur processus d'apprentissage (Hernandez et al., 2004). Actuellement, si le monde scientifique s'accorde sur l'intérêt d'une telle entreprise, les tentatives de construction d'une évaluation objective des performances laparoscopiques n'en sont encore qu'à leurs débuts (Darzi et al., 2001). Plusieurs études ont proposé des modèles prometteurs et des tâches types (Smith et al., 2001 ; Reznick et al., 1997 ; Derossis et al., 1998). Certains ont recueilli davantage de suffrages que d'autres, mais il n'existe à l'heure actuelle encore aucun consensus sur un modèle standard d'évaluation et/ou d'entraînement.

Notre étude de l'apprentissage nous permettra donc : 1° d'évaluer si la tâche utilisée dans cette expérience se révélera pertinente pour mesurer l'apprentissage dans les différentes conditions techniques 2° de mesurer l'impact des différentes techniques sur l'apprentissage des chirurgiens 3° de mettre en évidence d'éventuels transferts d'habileté entre les techniques.

Enfin, le dernier volet de notre partie expérimentale a été consacré à une étude de terrain destinée à enrichir l'ensemble de nos conclusions au moyen de données récoltées en salles d'opération (**étude 5**). Cette dernière étude nous a permis d'analyser comment les images en 2D et en 3D transformaient les représentations et les stratégies d'action en situation réelle de travail avec toute la dynamique et la complexité qui caractérisent ce type d'environnement.

b) Plan expérimental

Dans nos hypothèses formulées plus haut, nous insistions sur le fait que nous étudions les interactions de la dimension perceptive avec plusieurs facteurs contextuels. Un de ces facteurs revient dans chacune de nos tâches : il s'agit de l'instrument utilisé pour mener à bien celle-ci.

Les sujets de nos études ont réalisé diverses tâches en utilisant le système robotique en 3D (Da Vinci) ou la laparoscopie classique en 2D. Mais aucune conclusion sur l'impact des facteurs perceptifs sur l'action (robot en 3D versus laparoscopie en 2D) ne pouvait être tirée de cette simple comparaison entre les systèmes : en effet, les différences d'ergonomie entre la laparoscopie et le robot sont tellement importantes que nous encourageons le danger, en comparant ces deux systèmes, de ne pas savoir si les différences constatées entre le robot 3D et la laparoscopie en 2D ne sont pas imputables autant à ces facteurs instrumentaux (ergonomie, facilité de manipulation) qu'aux facteurs perceptifs (2D versus 3D).

C'est pourquoi nous avons rajouté dans notre étude une nouvelle condition : l'utilisation du système robotique en 2D. Le système robotique présente en effet l'avantage de pouvoir être utilisé avec l'option visuelle 3D (chaque caméra reproduisant une image conforme à la vision de l'œil correspondant) ou avec une vision en 2D (les deux caméras procurant la vue unique de l'œil droit aux deux yeux). Cette particularité technique nous a permis d'affiner notre plan expérimental général et de construire les conditions expérimentales suivantes : système robotique en 2D, système robotique en 3D et laparoscopie classique (avec vue en 2D ou avec vue directe en 3D, voir Table 4). Nous étudierons ainsi la seule influence de la dimension perceptive (perception de la profondeur) par la comparaison du robot en 2D et en 3D (toutes choses étant égales par ailleurs). En outre, la comparaison des performances des sujets en laparoscopie 2D avec le robot en 2D nous permettra de mettre en évidence la seule dimension instrumentale (mesurer l'impact de la facilité de mouvement, de la direction de la caméra, etc.), sans qu'elle interagisse avec un changement de condition perceptive.

L'étude de l'impact de la dimension instrumentale et de son interaction avec la dimension perceptive dans la qualité des actions a des conséquences à la fois théoriques et pratiques, puisqu'elle autorise à affiner notre connaissance de l'influence des nouvelles technologies sur la performance chirurgicale, et, plus particulièrement, de mieux comprendre à quels facteurs attribuer les bénéfices de ces nouvelles technologies. L'impact du système robotique sur l'amélioration (supposée) des performances s'explique-il par l'effet positif de la vue en 3D (auquel cas, on observera de manière

HYPOTHESE DIRECTRICE

prépondérante l'effet de la dimension perceptive, et donc une différence entre 2D et 3D, quelle que soit la technique utilisée) ? Ou au contraire, s'explique t-il par la récupération de la dextérité et de la liberté de mouvement des instruments (dans ce cas, on observera de manière prépondérante l'effet de la dimension instrumentale, et donc une différence entre le système robotique et classique, indépendamment de la condition visuelle) ?

TABLE 4 Les deux dimensions de notre plan expérimental investiguées dans nos différentes études

		<i>Dimension instrumentale</i>	
		Laparoscopie classique	Système robotique
<i>Dimension perceptive</i>	2D	Etudes 1, 2, 3, 4, 5	Etudes 1, 2, 3, 4
	3D	Etudes 3, 4	Etudes 1, 2, 3, 4, 5

PARTIE IV : PARTIE EXPERIMENTALE

ÉTUDE EXPLORATOIRE

Impact of 2D and 3D vision on the performance of novice subjects using the da Vinci robotic system

Adélaïde Blavier⁷⁶, Quentin Gaudissart⁷⁷, Guy-Bernard Cadière^b Anne-Sophie Nyssen⁷⁸.

Article accepté pour publication dans Acta Chirurgica Belgica

⁷⁶ National Fund of Scientific Research, University of Liège, Liège, Belgium

⁷⁷ Department of gastro-intestinal surgery, CHU St Pierre, Brussels, Belgium

⁷⁸ Cognitive Ergonomics Laboratory, University of Liège, Liège, Belgium

1 INTRODUCTION

The objective of this article was to answer an important question present in the literature: do the 2D-3D vision have an influence on motor performance in minimal invasive surgery? Depth perception is an important factor determining the utility of many computer- and video-based environment (Westerman & Cribbin, 1998), it is thus useful in a safety and economical point of view to know if depth perception also plays a predominant role in minimal invasive surgery.

The cognitive literature has shown that image in 2D and image in 3D do not contain the same information (Bingham & Pagano, 1998; Jackson et al., 1997). Although 2D vision compensates somewhat for the lack of depth perception using a lot of monocular cues, image in 3D contains more information especially in order to accurately and efficiently guide the action. If monocular cues are useful and provide performances comparable with binocular cues for some tasks (e.g., distance estimation (Falk et al., 2001; Servos, 2000)), 2D vision has been shown to affect kinematics and pattern human motion. Indeed, motion appears to rely on binocular depth cues particularly in reaching and grasping movements, main component of the surgical gesture.

According to this literature, surgical tasks should be performed better in 3D view than in 2D view. However, the surgical literature shows contradictory results about the benefits of the 3D vision in laparoscopic surgery: some studies showing best motor performances with 3D vision (Taffinder et al., 1999; Van Bergen et al., 1998; Peitgen et al., 1996; Dion & Gaillard, 1997; Birkett et al., 1994) while others failed to obtain difference of performance between 2D and 3D (Hanna et al., 1998; Crosthwaite et al., 1995; Pietrabissa et al., 1994) . Divergence in all these results is partially because first-generation 3D systems, with their lower resolution, were compared with standard 2D systems (Falk et al., 2001). Our objective was to answer this debate and to evaluate the benefits of 3D vision in minimal access surgery using the da Vinci robotic system that allows quasi natural three-dimensional visualization of the operative field. To avoid any bias from earlier laparoscopic experience, we selected a large sample of participants without any experience in open, minimally invasive or robotically assisted surgery.

2 MATERIALS AND METHODS

The Da Vinci system consists of two primary components: the surgeon's viewing and control console and, a moveable cart with three articulated robot arms. The surgeon is seated in front of the console, looking at an enlarged three-dimensional binocular display on the operative field while manipulating handles that are similar to "joy-sticks". Manipulation of the handles transmits the electronic signals to the computer that transfers the exact same motions to the robotic arms. The computer interface has the capacity to control and modify the movements of the instrument tips by downscaling deflections at the handles by a factor between (5:1 to 2:1). It can eliminate physiologic tremor, and can adjust grip strength applied to the tools. The computer generated electrical impulses are transmitted by a 10-meter long cable and command the three articulated "robot" arms. Disposable laparoscopic articulated instruments are attached to the distal part of two of these arms. The third arm carries an endoscope with dual optical channels, one for each of the surgeon's eyes. The 3D visualization can be changed to 2D if desired. In this study, we used 3D and 2D options in order to investigate the influence of 3D vision in performing surgical tasks. The only difference between the two conditions was the depth-vision type: 2D or 3D vision.

Participants

224 nurses (198 women and 26 men) without any experience in conventional, laparoscopic or robotic surgery were randomly divided into two conditions: one group performing with the robotic system in 2D and the other group performing with the robotic system in 3D. Except the dimension view (2D versus 3D), all task characteristics were identical in the two conditions.

Task

The task consisted in displacing a plastic bead of five millimetres from a closed isolating tube to another one. The tubes were parallel and horizontally disposed at different depths (interval of 5 cm). This mainly involved visuo-motor processes (eye-hand coordination without any other feedback than visual). Task did not require camera displacement, only manipulating instruments (microforceps) using the two hands.

Measures

We measured the time (in seconds) to perform the task. Immediately after performing the task, participants were asked their self-confidence and satisfaction about their performance on a 4-point likert scale.

Statistical analysis

We conducted a t student analysis in order to compare the performance in the two viewing conditions (2D-3D view).

3 RESULTS

Our results showed better time performance in 3D than in 2D. Participants were significantly faster to perform the task in 3D than in 2D ($t(222) = 7.93, p < 0,000$). Concerning the actual time, men and women showed similar performance (Table 1). Concerning self-confidence and satisfaction about their performance, no difference appeared either between the 2D and 3D conditions or between gender (Table 2).

	2D	3D
All subjects	40.26±17.49	24.67±11.2
Men	40.36±15.24	25±11.18
Women	42.25±17.86	24.64±11.26

Table I: Time (in seconds) to perform the task in the two conditions

	2D	3D
Satisfaction		
All subjects	2.79±0.64	2.77±0.71
Men	2.75±0.95	3.33±0.58
Women	2.8±0.61	2.71±0.71
Self-confidence		
All subjects	2.26±0.7	2.35±0.6
Men	2±0.81	2.67±0.58
Women	2.3±0.7	2.32±0.61

Table II: Subjects self-confidence and satisfaction in performing task in 2D or 3D condition

4 DISCUSSION

As the tactile and force feedbacks are lost in minimal-access surgery, the video image plays the most crucial role in giving the surgeon information about the performance of

the operation. Our study emphasizes the important role of depth perception and the advantage of the 3D view when using da Vinci robotic system. Indeed, 3D view allows novice participants to execute faster a basic motor task. Our results thus confirm conclusion from other studies (Taffinder et al., 1999; Van Bergen et al., 1998; Peitgen et al., 1996; Dion & Gaillard, 1997; Birkett et al., 1994) concerning the advantage brought by 3D in performing surgical tasks. Birkett et al. (1994) suggested that the advantage of the 3D view was only observed in complex surgical tasks, our results show that 3D view also leads to better performance in basic motor task with novice subjects. Moreover, recent studies have shown that 2D vision requires longer and slower information processing than 3D vision (Greenwald et al., 2005; Mazin & Lenoir, 2004). 3D vision appears to be essential and more intuitive, requiring less cognitive elaboration and mental load. The cognitive resources usually involved in the 2D image processing may be involved in other processes when 3D vision is used, allowing to increase gesture precision and safety. However, the robotic system is a technique ahead of its time, expensive and not very accessible. Our results that showed obvious advantage of 3D vision for novice subject performance are encouraging the development of efficient and less expensive 3D systems for conventional laparoscopic surgery in general. Indeed, 3D vision may have an impact on the operating time and on the resident training, the loss of depth perception being the main drawback for the novice to overcome when facing the television monitor (Chan et al., 1997). The use of 3D view could reduce the long learning curve that constitutes the only existing path to overcome the difficulties met with minimal invasive surgery. Nevertheless, as our study was conducted on only one task performed by novice participants without any surgical experience, we may observe different results with experienced surgeons that are used to operating with 2D vision in conventional laparoscopy.

ETUDE 1

TACHES DE COMPLEXITE CROISSANTE CHEZ DES SUJETS NOVICES

Perceptual and instrumental impacts of robotic laparoscopy on surgical performance: Implications for surgeon training and patient safety

Adélaïde Blavier⁷⁹, Quentin Gaudissart⁸⁰, Guy-Bernard Cadière², Anne-Sophie Nyssen⁸¹.

Soumis à Surgical Endoscopy

⁷⁹ National Fund of Scientific Research, Cognitive Ergonomics Laboratory, University of Liège, Liège, Belgium

⁸⁰ Department of gastro-intestinal surgery, CHU St Pierre, Brussels, Belgium

⁸¹ Cognitive Ergonomics Laboratory, University of Liège, Liège, Belgium

1 INTRODUCTION

In constant and considerable evolution, new technologies in surgery transform the surgeon's activity and practice. In laparoscopic surgery, new systems permit vision in 2D or 3D. However, the literature shows contradictory results about the benefits brought by the 3D vision: some studies showing best motor performances with 3D vision (Birkett et al., 1994; Dion et al., 1997; Peitgen et al., 1996; Taffinder et al., 1999; Van Bergen et al., 1998) while others failed to obtain difference of performance between 2D and 3D (Chan et al., 1997; Crosthwaite et al., 1995; Hanna et al., 1998; Pietrabissa et al., 1994). In some studies (Chan et al., 1997), only the complex tasks were performed more easily and faster with 3D view than with 2D view whereas no difference between 2D and 3D appeared in the easiest tasks. Divergence in all these results is partially because first-generation 3D systems, with their lower resolution, were compared with standard 2D systems (Falk et al., 2001). Actually, new 3D systems allow to retrieve a natural bi-dimensional view and suppress the bias met in anterior studies. In this paper, we used a new generation of 3D system, the da Vinci robotic system. This robotic system allows to regain three-dimensional visualization of the operative field and the degrees of movement freedom lost in classical laparoscopy, thanks to an intra-cavity articulation of the surgical tools. Only one published study (Hubens et al., 2003) has compared performance obtained using classical laparoscopic techniques and this robotic system. This study showed advantages for the da Vinci robotic system, particularly when it was used with 3D view option. However, only six subjects participated in this study and the chosen tasks were specific to the robotic system training. Our objective was to study with more participants the impact of the robotic system on standard and ecological surgical tasks of increasing complexity (bench models developed and validated in several studies (Derossis et al., 1998; Reznick et al., 1997; Scott et al., 2000)). In order to precisely analyse the nature of the benefits brought by these expensive new technologies, we differentiated and independently studied the influence of the three-dimensional view (afferent component) comparing 2D and 3D view and the influence of movement freedom restoration (efferent component) comparing classical laparoscopy with robotic system. We also studied the impact of the use of technology on subject's self-confidence, satisfaction and facility, knowing that these three factors influence performance and new technology acceptance in operating room (Jones & Cale, 1997; Marshall et al., 2001). To avoid any bias from earlier laparoscopic experience in our comparison between classical and robotic laparoscopic techniques, we only selected medical students without any experience in open, minimally invasive or robotically assisted surgery.

2 MATERIALS AND METHODS

Materials

The Da Vinci system consists of two primary components: the surgeon's viewing and control console and, a moveable cart with three articulated robot arms. The surgeon is seated in front of the console, looking at an enlarged three-dimensional binocular display on the operative field while manipulating handles that are similar to "joy-sticks". Manipulation of the handles transmits the electronic signals to the computer that transfers the exact same motions to the robotic arms. The computer interface has the capacity to control and modify the movements of the instrument tips by downscaling deflections at the handles (by a factor between 5:1 to 2:1). It can eliminate physiologic tremor, and can adjust grip strength applied to the tools. The computer generated electrical impulses are transmitted by a 10-meter long cable and command the three articulated "robot" arms. Disposable laparoscopic articulated instruments are attached to the distal part of two of these arms. The third arm carries an endoscope with dual optical channels, one for each of the surgeon's eyes. As the 3D visualization can be changed to 2D, we used 3D and 2D options.

We used a pelvitrainer for the classical laparoscopic condition (from Ethicon®). The optical system consists of the laparoscope, camera, light source and video monitor (Storz endoskope®). The camera was always controlled by the same observer.

Methods

Sixty medical students (26 women and 34 men, mean age 24.9 ± 2.9 years) without any prior surgical experience were selected. All subjects underwent standard acuity examination (with Ergovision and Visuotest from Essilor®) and only those with either normal or corrected-to-normal vision were included. As shown in table 1, they were randomly divided into the three groups, one performing tasks in classical laparoscopy, another using the robotic system in 3D and the third using the robotic system in 2D view. They were unaware of the existence of 2D and 3D options of the robotic system, and then unaware of the advantages or difficulties related to their experimental condition.

Our three experimental conditions allowed us to differentiate two dimensions (as shown in table 1): one we called "perceptive", afferent component, where robotic system in 2D and 3D differed only by the type of vision (binocular versus monocular) and another we called "instrumental", efferent component, where the freedom degree for movement

was the main difference between robotic system in 2D and classical laparoscopy. This experimental plan allowed us to more precisely study the influence of new technology on surgical performance and particularly to answer the question: is the impact of this robotic system explained by the benefit of 3D view (in this case, we will observe predominant effect of perceptive dimension and thus difference between 2D and 3D) or by the recovery of movement freedom (in this case, we will observe predominant effect of instrumental dimension and thus difference between classical and robotic system)?

TABLE 1. Number of subjects in each condition according to both dimensions

		<i>Instrumental dimension</i>	
		Classical laparoscopy	Robotic System
<i>Perceptive Dimension</i>	2D	20 subjects	20 subjects
	3D		20 subjects

3 PROCEDURE

The experiment consisted of three phases:

1. First phase: familiarisation

Anterior studies have shown a strong learning effect in the first trials with laparoscopic techniques and in skill learning in general (Brashers-Krug et al., 1996; Derossis et al., 1998; Doyon et al., 2003; Huber et al., 2003; Prasad et al., 2002). In order to decrease the learning effect in the ulterior motor tasks and to obtain homogenous groups concerning the technical mastery (Van Bergen et al., 1998), we organised a familiarisation phase in which subjects repeated 10 times a task (task 0, see description below) with the technique of their experimental condition. As only one hand was used in classical laparoscopy, subjects in this condition performed 5 trials with the dominant hand and 5 trials with the non-dominant hand in order to train both hands. At the sixth trial, subjects shifted from 2D to 3D or 3D to 2D view in robotic condition and from dominant hand use to non-dominant use or the reverse in laparoscopic condition. This phase allowed us to study learning curves with the different techniques.

2. Second phase: tasks of increasing complexity

After the familiarisation phase, the subjects performed 4 tasks of increasing complexity using the technique that had become familiar to them.

3. Third phase: switch of technique

In this last phase, subjects performed the most difficult task (task 4) with the technique they had never used. Our objective was to study the transfer of a skill acquired with a specific technique to the other one.

Evaluating the performance after a technical switch is highly relevant in order to understand the risk associated with a change of procedure (e.g., a conversion procedure when the surgeon has to revert to a classical method) and to determinate an adequate surgical training corresponding to the different technologies.

4 TASKS

Performances in tasks requiring visual motor control are particularly affected by monocular vision, whereas accuracy for verbal judgment or distance estimation is similar between 2D and 3D visual systems (Falk et al., 2001; Servos, 2000). We thus selected ecological **motor** tasks, suitable for novice subjects and compatible with the two techniques. Tasks were selected with the collaboration of an expert surgeon, according to their relevance and their validity demonstrated in anterior studies (Derossis et al, 1998; Reznick et al., 1997; Scott et al., 2000). The five tasks were devised ranging from basic to more advanced laparoscopic skills. For each task, we calculated a specific performance score that we describe below.

Task 0 (familiarisation task, see Fig.1): grasping and picking up five five-millimetre plastic beads from a starting position, transferring them and finally placing them into a container. This task required fine motor skills to grasp the pieces accurately as well as a good distance perception to place the pieces into the container in an accurate way. It also required camera moves and allowed to study and develop a two-handed video-eye-coordination (Scott et al., 2000). This first and easiest task was used in the familiarisation phase and was therefore repeated ten times.

Performance score: Time (in seconds) to put the five pieces into the recipient.

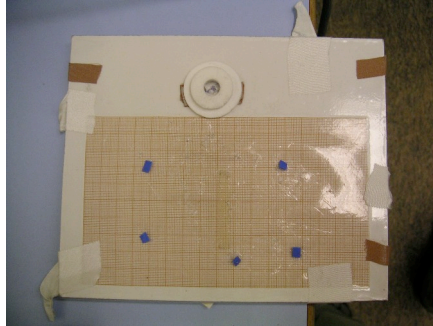


Fig. 1: Familiarisation task

Task 1: checkerboard (see Fig.2)

This task involved arranging 16 rubber letters and numbers into the appropriate squares on a flat surface. It allowed to study spatial relationships on a flat surface and to evaluate accurate fine motor skills (Scott et al., 2000). Moreover, this task involved reading letters and numbers and thus an accurate identification process.

Performance score: number of letters and numbers correctly placed into squares in 4 minutes.

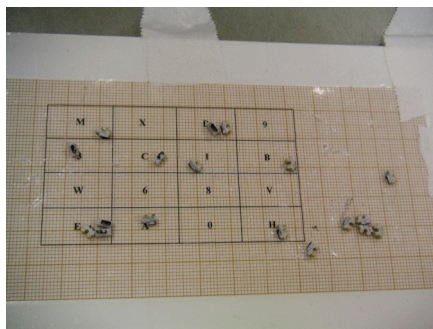


Fig. 2: Checkerboard

Task 2: rings route (see Fig.3)

This task involved passing through rings with a needle. This task required depth perception and wrist articulation skills (Scott et al., 2000). It also required particular skill when transferring the needle and therefore a good two-hand coordination.

Performance score: number of rings the needle went through in 4 minutes.

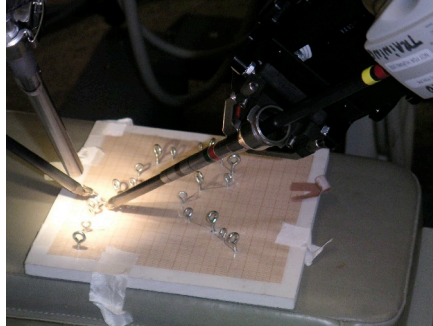


Fig. 3: rings route

Task 3: circular pattern cutting (see Fig.4)

This task consisted in cutting a circular pattern. This task involved using the grasper in one hand and applying tension to the material while cutting with the endoscopic scissors in the other hand (Derossis et al., 1998).

Performance score: diameter cut in 4 minutes, with a bonus if the pattern is cut in less than 4 minutes.

Penalty score: the cutting accuracy was also evaluated by calculating the percentage area of deviation from the circle outline.

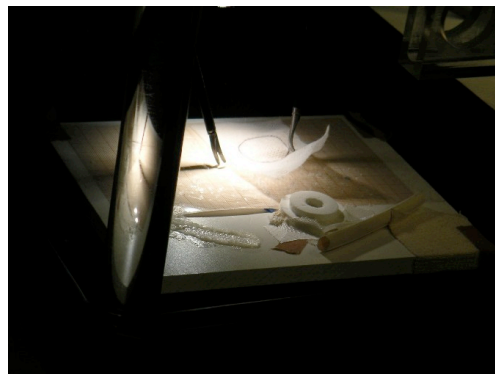


Fig. 4 : circular pattern cutting

Task 4: suture and knot (see Fig.5)

This task involved placing and tying a simple suture using pre-marked points. This task required and developed particular skills when transferring the needle, placing the suture and tying the knot (Derossis et al., 1998). Suturing requires manual dexterity to manipulate the instruments and develops two-hand coordination (Scott et al., 2000).

Performance score: time (in seconds) to perform both suture and knot.

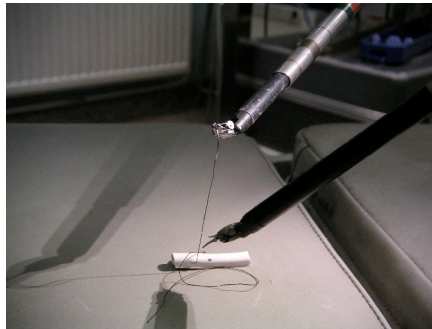


Fig.5 : suture and knot

Questionnaires

After the familiarisation phase, subjects had to fill in a questionnaire, they were asked about their feelings of mastery and about their familiarity with the technique they used. They had to evaluate it on a 4-point Likert scale.

After the realization of the four tasks of increasing complexity, participants evaluated their performance and answered a questionnaire about their feeling of satisfaction, their self-confidence as well as describe the difficulty they had completing each task.

Once again a 4-point Likert scale was used.

After performing the 4th task with the other technique (technical switch), subjects were asked to compare the two techniques (robotic versus classical laparoscopic system) on a 4-point Likert scale and to comment on their general performance. These comments included : speed of task execution, gesture accuracy, gesture quality, image quality, site view, instrument utilization, spatial orientation, comfort, action visibility, difficulty, concentration, feedback quality and anticipation.

5 STATISTICAL ANALYSIS

For the familiarisation phase (task 0), time performance was analysed by a repeated measure-analysis of variance. For each task of increasing complexity, an ANOVA was used to analyse both performance scores and answers to the questionnaire. A Newman-Keuls test was used for *post hoc* comparison.

The evolution of the answers to the questionnaire was evaluated by a repeated measure-analysis of variance. The aim of such an analysis was to study any change in the subjects' evaluation of satisfaction, self-confidence and difficulty in correlation with the increase of tasks complexity.

We also proceeded to a Pearson correlation analysis between the scores at the different tasks and between the scores and the questionnaire answers. A T student test was used to analyse the answers to the final questionnaire comparing classical laparoscopy with robotic system. Significance was defined as an a *p* value less than 0.05.

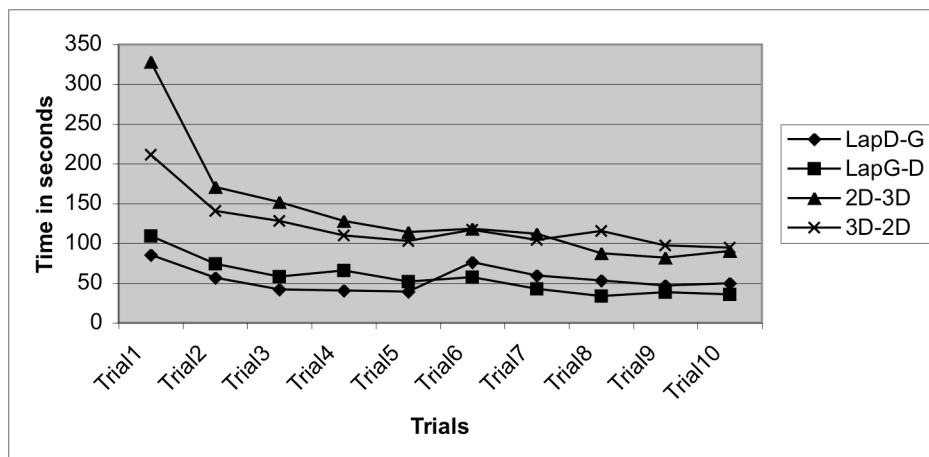
6 RESULTS

1. Results of the familiarisation phase

Our results showed that, during all the familiarization phase, the subjects performed significantly faster with the classical laparoscopic system than with the robotic system (Graphic 1).

We obtained a significant difference in performance between the three conditions in the first three trials ($P < 0.000$): the best performance was observed with subjects using classical laparoscopy followed by those using the robot in 3D and, finally, those using the robot in 2D.

From the second trial on, performances did not statically differ with the use of either the 3D or 2D options of the robot; only the difference in performance between the robot (2D or 3D) and the classical laparoscopy remained the same during the whole familiarisation phase. No significant difference was observed between the use of two hands in classical laparoscopy.



GRAPHIC 1. Learning curves in the four conditions: LapD=classical laparoscopy with dominant hand; LapG=classical laparoscopy with non-dominant hand; 2D=robotic system in 2D; 3D=robotic system in 3D

At the sixth trial, the shift (2D/3D for the subjects using the robotic system or dominant/non-dominant hand for subjects in classical laparoscopy) did not provide any significant change in the subject's performance.

The repeated measure-analysis of variance showed a significant learning effect during the whole familiarization phase ($P<0.000$). A significant interaction between the conditions in the first five trials emphasized that learning was different according to the technique used ($P<0.000$). In the last five trials, the learning effect remained ($P<0.000$) but without any link to the type of technique.

Concerning the answers to the questionnaire, no difference appeared about the feeling of mastery and familiarity, no matter what techniques were used (Table 2).

TABLE 2. Feelings of mastery and familiarity in the three conditions after the familiarisation phase

	Classical laparoscopy	Robotic system in 2D	Robotic system in 3D	P value of post hoc analyses
Feeling of mastery	3.05±0.57	2.85±0.67	3.13±0.5	No significant difference
Feeling of familiarity	2.41±0.59	2.37±0.49	2.69±0.6	No significant difference

2. Results for the tasks of increasing complexity

As shown in table 3, every task was performed significantly better when assisted by the da Vinci robot in 3D than using classical laparoscopy.

In 1 (checkerboard, $p<0.05$), the performance was significantly better using the 3D robotic system than with the 2D robotic system and classical laparoscopy.

The performances in task 2 (rings route, $p<0.0000$) were significantly different depending on the three conditions: the best performance was observed with the robot in 3D, followed by the performance obtained with the robot in 2D and, finally, the worst performance was obtained using classical laparoscopy.

In task 3 (circular pattern cutting), the cut distance was significantly longer with the robotic system in 3D than with the classical laparoscopy and with the robotic system in 2D ($p<0.005$).

The cut precision (penalty score) was significantly higher with the classical laparoscopic system followed by the robotic system in 2D and finally by the robotic system in 3D ($p<0.00001$).

In the 4th task, seven subjects were not able to tie the knot in the classical laparoscopy condition. Post hoc analyses showed difference between the two techniques: robotic system (in 2/3D) led to a faster performance than classical laparoscopy ($p<0.0000$).

TABLE 3. Scores at each task

	Classical laparoscopy	ID	Robotic system in 2D	PD	Robotic system in 3D	P value of Post hoc analyses
Task 1						
Score	7±2.36		7.24±1.95	<	8.94±2.05	1-3 <0.01; 2-3 <0.05
Task 2						
Score	2.21±1.39	<	3.65±1.62	<	8±2.15	1-2<0.05; 1-3<0.0005; 2-3<0.0005
Task 3						
Score	69.06±41.08		75.88±33.7	<	101.31±34.7	0.05
Penalty	6.89±3.59	>	4.06±2.04	>	1.93±1.28	1-2<0.005; 1-3<0.0005; 2-3<0.05
Task 4						
Time	490.15±223.04	>	262.21±114.52		159.40±59.13	1-2<0.0005; 1-3<0.0005

1= classical laparoscopy; 2= robotic system in 2D ; 3= robotic system in 3D

ID = significant influence of instrumental dimension; PD= significant influence of perceptive dimension

We proceeded to a correlation analysis in order to study the links between the scores in the different tasks. As shown in table 4, the performance in the second task was the only one to be significantly correlated with the scores of the other tasks.

TABLE 4. Correlations between scores at each task

	Task 2: Rings route	Task 3: Cutting pattern	Task 4: Suture and knot
Task 1: Checkerboard	0.52 $p<0.0000$	0.2	-0.19
Task 2: Rings route		0.36 $p<0.005$	-0.41 $p<0.005$
Task 3: Cutting pattern			-0.24

Concerning the self-evaluation (Table 5), ANOVA showed, for each task, a significant difference between the experimental conditions about the feeling of satisfaction (respectively, $p<0.05$; $p<0.05$; $p<0.005$; $P<0.001$) and about the self-confidence evaluation (respectively, $p<0.05$; $p<0.000$; $p<0.00005$; $P<0.001$). The feeling of difficulty differs between the experimental conditions only in the last task ($p<0.001$).

When we sum up the subjective scores of all tasks and for each condition (see total line in Table 5), subjects felt significantly more satisfied ($p<0.00001$), self-confident ($p<0.000005$) and less in difficulty ($p<0.005$) with the robotic system in 3D than with the robotic system in 2D and than finally with the classical laparoscopic technique.

TABLE 5. Satisfaction, self-confidence and difficulty scores for each task

	Classical laparoscopy	ID	Robotic system in 2D	PD	Robotic system in 3D	P value of post hoc analyses
Task 1						
Satisfaction	2.22±0.74		2.31±0.79	<	2.94±0.68	1-3<0.05; 2-3<0.05
Self-confidence	2.55±0.78		2.75±0.58		3.12±0.73	1-3<0.05
Difficulty	2.38±0.69		2.11±0.93		2.2±0.99	No significant difference
Task 2						
Satisfaction	1.78±0.8		1.69±0.8	<	2.5±0.76	1-3<0.05; 2-3<0.05
Self-confidence	1.72±0.75		2.12±0.8	<	2.8±0.75	1-3<0.001; 2-3<0.05
Difficulty	3.22±0.64		3.23±0.84		2.8±0.71	No significant difference
Task 3						
Satisfaction	2.11±0.83	<	2.56±0.89	<	3.18±0.65	1-2<0.05; 1-3<0.005; 2-3<0.05
Self-confidence	1.94±0.8		2.31±0.7	<	3.19±0.65	1-3<0.0005; 2-3<0.005
Difficulty	2.78±0.55		2.76±0.75		2.53±0.83	No significant difference
Task 4						
Satisfaction	1.78±0.94	<	2.31±1.07	<	3.06±0.68	1-2<0.05; 1-3<0.001; 2-3<0.05
Self-confidence	1.83±0.79	<	2.75±1.06		3.06±0.85	1-2<0.01; 1-3<0.001
Difficulty	3.66±0.59	>	2.82±1.01		2.53±0.88	1-2<0.01; 1-3<0.005
Total						
Satisfaction	7.47±2.7	<	8.87±1.8	<	11.69±1.42	1-2<0.05; 1-3<0.001; 2-3<0.001
Self-confidence	8.06±2.15	<	9.94±1.84	<	12.06±1.84	1-2<0.01; 1-3<0.0005; 2-3<0.005
Difficulty	12.09±1.71		10.89±1.82	>	9.50±2.48	1-3<0.000; 2-3<0.05

1= classical laparoscopy; 2= robotic system in 2D ; 3= robotic system in 3D
 ID = significant influence of instrumental dimension; PD= significant influence of perceptive dimension

The repeated-measure analysis of variance showed that satisfaction ($p<0.0005$), self-confidence ($p<0.001$) and difficulty ($p<0.0000$) significantly differed between the tasks. Subjects in classical laparoscopy met significantly more difficulties in tasks 2 and 4 than in task 1 (respectively, $p< 0.05$ and $p<0.00005$). In the 2D robotic system condition, the difficulty evaluation significantly differed only between tasks 1 and 2 ($p<0.005$) and with the 3D robotic system, no significant difference appeared between the tasks.

Our results in table 6 show a significant correlation between the performance scores and the subjective evaluations (satisfaction, self-confidence and difficulty), the only exception to that being the correlation between task 1 and difficulty 1.

Task 2 scores show the strongest correlation with self-evaluations and, particularly with the total evaluation of satisfaction (0.77), self-confidence (0.61) and difficulty (0.44).

TABLE 6. Correlations between scores and feelings of satisfaction, self-confidence and difficulty for each task

	satisf1	satisf2	satisf3	satisf4	sattot	certit1	certit2	certit3	Certit4	certtot	diffic1	diffic2	Diffic3	diffic4	di
Task1	.61***	.29*	.22	.31*	.41**	.47***	.31*	.29*	.18	.42**	-.19	-.20	.07	-.11	-.1
Task2	.51***	.68***	.48***	.43**	.71***	.37**	.55***	.49***	.37**	.61***	-.07	-.39**	-.11	-.26	-.4
Task3	.12	.18	.47***	.16	.33*	-.05	.19	.40**	.14	.24	.17	-.10	-.42**	-.14	-.1
Task4	-.15	-.06	-.35*	-.57***	-.45**	-.01	-.06	-.23	-.54***	-.35*	.16	-.01	.05	.51***	.3

*p<0.05 ; **p<0.005 ; ***p<0.000

sattot, certtot and difftot= sum of all subjective scores of respectively, satisfaction, self-confidence and difficulty

3. Results for technical switch

The ANOVA analysis showed a significant difference between the experimental conditions in performing task 4 a second time after the technical switch (p<0.01).

Post hoc analyses revealed a significant difference only between classical laparoscopy and the 3D robotic system (Table 7).

TABLE 7. Time (in seconds) to execute the suture and the knot after the technical switch

	Classical laparoscopy	Robotic system in 2D	Robotic system in 3D	P value of Post hoc analyses
Task 4				
Time	519.57±65.94	326.17±92.68	206.73±53.84	1-3 <0.05

1= classical laparoscopy; 2= robotic system in 2D ; 3= robotic system in 3D

The final questionnaire comparing the two techniques showed a significant difference for all items. The only exception is the concentration and the feedback quality but perhaps these questions were too abstract or not understood by subjects (Table 8).

TABLE 8. Answers to questionnaire comparing the two techniques (classical and robotic laparoscopy)

	Classical laparoscopy	Robotic system	T and P Value
General performance	1.8±0.8	3.5±0.63	6.6, <0.00000
Speed of performance	1.94±0.82	3.25±0.77	4.69, <0.0001
Gesture accuracy	1.88±0.86	3.5±0.82	5.54, <0.00001
Image Quality	2.12±0.69	3.19±1.05	3.48, <0.005
Site view	2.12±0.69	3.38±0.96	4.33, <0.0005
Instrument utilization	1.71±0.77	3.69±0.48	8.79, <0.00000
Spatial orientation	2.12±0.93	3.38±0.72	4.33, <0.0005
Comfort	1.94±0.85	3.63±0.72	6.05, <0.000005
Concentration	2.24±0.66	2.44±1.15	No significant
Feedback quality	2.47±0.79	2.75±0.93	No significant
Action visibility	2.12±0.69	3.44±0.81	5.04, <0.00005
Anticipation	2.18±0.73	2.88±0.81	2.37, <0.05
Complexity	3±1.06	1.75±0.86	3.71, <0.001
Gesture quality	2.24±0.83	3.25±0.45	4.32, <0.0005

7 DISCUSSION

7.1 *Discussion of the familiarisation phase*

The objective of this phase was to train the subjects to use a specific technique (manipulating instruments, moving a camera, grasping objects, aiming at a recipient) in order to prevent a strong familiarisation effect in ulterior motor tasks. Indeed, a very fast familiarization to the different techniques was showed; the improvement of the performance between the first and the second trial was really strong (respectively by 50% and 30% with the robotic system in 2D and 3D), confirming the existence of a period of rapid initial learning as shown in other studies in surgery and cognitive psychology (Brashers-Krug et al., 1996; Chan et al., 1997; Derossis et al., 1998; Doyon et al., 2003; Huber et al., 2003; Prasad et al., 2002). However, although all the learning curves reached a plateau at the end of the ten trials, they followed a different pattern for each technique. As in Prasad et al. study (Prasad et al, 2002), our results demonstrated an early phase of greater learning with the robotic system (in 2D and 3D), while the learning curve was extremely reduced, nearly non-existent, in classical laparoscopy, contrary to other studies which showed strong learning curves in classical laparoscopy (Hubens et al, 2003).

Moreover, in all the trials, we obtained a better performance with classical laparoscopy than with the robotic system (in 2D and 3D). If we observed a significant difference at the first trial between 3D and 2D vision with the robotic system in this relatively easy task, contrary to the Birkett et al. hypothesis (Birkett et al., 1994), this difference disappeared after the first trial. It seems that although the 2D vision affected the performance at first, subjects rapidly and accurately compensated for the lack of binocular depth perception, relying on only monocular cues to perform as fast as subjects in the 3D robotic system condition.

Two aspects of the task could partially explain the results we observed in classical laparoscopy (best performance, floor effect and absence of learning curves).

The first one is that the task was very easy, perhaps easier than the tasks used in other studies. This task did not require any specific fine movements, and the manipulation was very basic without any need to grasp the pieces in a specific way. This argument could partially explain the absence of learning curves in classical laparoscopy. Yet, it

cannot account for the best performances observed in classical laparoscopy: indeed, why wasn't the robotic system also advantaged by the easiness of the task ?

The second aspect is that the task required frequent camera moves in order to explore the whole site and to grasp all pieces, whereas the robotic system seems to offer a lot of advantages in microsurgery in particular where fine suturing and knot tying are required (for example, in our most complex tasks). The need to frequently move the camera for relatively long distances actually constituted a second task in itself that had to be learned and performed by subjects. This can account for the fact that the performance with the robot never caught up with the performance with classical laparoscopy.

In classical laparoscopy, the movements of the camera do not require a strong learning and can occur simultaneously with the instruments movements. A robotic system, however, requires a change of mode (pushing a pedal and manipulating the same handles used for instruments movement) and this has to be performed in succession of instrument movement. Prasad et al. (2002) have also obtained the same results in their study comparing the learning curves in classical laparoscopy with the Zeus robotic system (2D view). In their study, they pointed out that the nature of the tasks could be a factor contributing to these findings.

In our study, the second task of moving camera influenced and thwarted the advantages of the robotic system, showing limits of this technology. This finding is in accordance with clinical and experimental observations concerning the advantages brought about by the robotic system in microsurgery or in small operating field (Cadière et al., 2001; Garcia-Ruiz et al., 1998; Nio et al., 2001).

Finally, although this familiarisation with a very simple task cannot be considered as a strong expertise acquisition, we noted that this phase allowed our subjects to be confident when performing the following tasks.

7.2 *Discussion of the tasks of increasing complexity*

Our results showed that in all tasks, the robotic system in 3D brought about better performances than classical laparoscopy. Moreover, the difference between the robotic system in 3D and the classical laparoscopy tended to increase with the difficulty of the tasks. It is clear that the difference in the first and simplest task was smaller and less significant than the one observed in the subsequent and more complex tasks. We also noted a significant difference between the robotic system in 2D and the classical laparoscopy in all tasks except for the first and easiest task. All these results are in accordance with Hubens' study (Hubens et al., 2003).

If we analyse the impact of the robotic technology in terms of perceptive and instrumental benefits (Table 1), we observe that the influence of the two dimensions differs, according to the nature and the complexity of the task. The perceptive dimension played a significant role and could explain the performance in the first three tasks. Moreover, it was the only determinant factor of the performance in the first and easiest task. These findings confirm the important role of the binocular depth perception in surgical performance (Birkett et al., 1994; Dion et al., 1997; Peitgen et al., 1996; Taffinder et al., 1999; Van Bergen et al., 1998).

The influence of the instrumental dimension was significant in the last three tasks, tasks involving more complex movements than just grasping. In the 4th task, the instrumental dimension differentiated between the conditions, manual demands overlapping the perceptive advantage. Indeed, in the classical laparoscopy condition, the instrument length and rigidity seemed to be the most difficult obstacle to overcome in order to introduce the needle and particularly to cross the instruments in order to tie the knot. In this task, the robotic system brought about such a movement freedom (DOF) that the disadvantages linked to monocular vision with robotic system (2D) were overlapped and did not sufficiently affect the performance or make it significantly worse than with the robotic system in 3D.

The absence of any significant difference between the 2D and 3D conditions of the robotic system in this task could also be explained by the fact that both hands were in movements, providing a strong motion parallax that is a particularly efficient monocular cue of depth perception (Voorhorst et al., 1996).

The two tasks of intermediate complexity (tasks 2 and 3) seemed to involve both perceptive and instrumental dimensions.

The data from the questionnaires showed the same tendency: subjects generally felt less confident, less satisfied and more in difficulty with classical laparoscopy than with the robotic system in 2D and than finally, with the robotic system in 3D. Self-confidence, satisfaction and facility are determinant factors in the process of new technology acceptance in the operating theatre (Jones & Cale, 1997). Self-confidence is an important aspect of optimal performance and may lead to increased self-efficiency (Marshall et al., 2001). Indeed, although overconfidence could be considered as a pervasive cognitive bias and thus as a negative component, cognitive anxiety is characterized by worry, negative expectations and concentration disruption, and thus could strongly disturb the activity (Huber et al., 2003). Moreover, self-confidence bears a more significant impact upon performance on the surgical clerkship than in other areas of medicine (Carter et al., 2005; Marshall et al., 2001). In our study, one can think that our subjects had expectations about the robotic system and anticipated to have more facilities with it. However, the difference observed between the robotic system in 2D and 3D confirms that the self-confidence was influenced by the depth perception and

was not determined by expectations about a new technology. In the same way, higher satisfaction with the robotic system could be explained by the effect of novelty. However, the difference between the robotic system in 3D and 2D showed that subjects relied more on their actual performance than on any novelty effect produced by the robotic system.

Moreover, our results showed that satisfaction, self-confidence and difficulty differently evolved during the tasks and emphasized perceptive and instrumental dimensions. In classical laparoscopy, the task considered as the most difficult was task 4 whereas with the robotic system, the most difficult one was task 2. This finding (not statistically significant) about the subjective evaluation of difficulty confirms the role of the instrumental dimension in task 4, as was emphasized by the performance scores.

Finally, our results showed that the performances in task 2 were the only one to be significantly correlated to the other tasks: indeed, rings route summarized a lot of useful and usual fine movements required in minimal invasive surgery and notably reproduced all the complexity of the suture gesture (except the knot). Moreover, scores in this task were highly correlated with subjective evaluation of satisfaction, self-confidence and difficulty. By all these aspects, this task seems to be a very efficient and accurate way to evaluate minimal invasive systems or to improve and train surgical performances.

7.3 *Discussion of the technical switch*

After the technical switch, our results showed a better performance with the robotic system in 3D than with classical laparoscopy, these two conditions showing no significant difference with the robotic system in 2D. This switch occurred without any learning of the technique and the task (suture and knot) was the most difficult one. This result emphasized the role of the two dimensions described in table 1: both instrumental and perceptive dimensions seemed to be necessarily present and the presence of only one of them was not sufficient to provide any significant difference. In this case, it is thus the combination of the advantages of binocular vision with the restoration of freedom degrees (DOF) that led to a better performance.

The results after this technical switch are ecologically relevant especially as far as two phenomena linked to surgery are concerned : the problem of conversion procedure and the problem of surgeons training and formation. Indeed, the extremely bad performance observed in classical laparoscopy after the technical switch emphasizes the risk associated with a conversion procedure performed by a surgeon mainly trained with the robotic system.

8 GENERAL CONCLUSION

In conclusion, our study shows that the robotic system obviously has some advantages : by increasing the quality of the binocular vision in all tasks and by increasing the instruments movement freedom and that particularly in fine motor tasks. These advantages were particularly emphasized in small fields because camera moves can be a significant drawback of the robotic system. Moreover, we showed that the lack of depth perception can be compensated by the camera or hands movements. At a subjective level, the robotic system provides satisfaction, self-confidence and facility for novice subjects, particularly in 3D vision. However, the poor performance after the technical switch emphasizes the necessity to pursue a training with classical laparoscopic techniques. These contrasted findings emphasize the importance to study the whole activity and not to limit the research to only some aspects of the task.

We showed that the influence of both perceptive and instrumental benefits depended on the complexity and demands of the task. This suggests that underlying cognitive and motor processes involved in the different tasks are somewhat different. Further studies are necessary to understand better the implications of these different cognitive mechanisms, notably with expert surgeons in order to evaluate if visuomotor processes change with expertise. A fourth experimental condition could also be introduced in order to complete the study on the involvement of the two dimensions described in table 1: the classical laparoscopy without camera and with a direct 3D view. In this study, we did not use this condition because of its lack of clinical and ecological relevance. However, integrating this condition in another study would be theoretically relevant. Understanding the nature of cognitive and motor processes involved in the execution and control of laparoscopic gesture constitutes a relevant issue for the development of both procedures and training in a compatible and safe way with the technological evolution in surgery.

ETUDE 2

TACHES DE COMPLEXITE CROISSANTE CHEZ DES SUJETS EXPERTS

1 INTRODUCTION

L'expertise est un phénomène étudié de longue date, implicitement ou explicitement, dans le domaine de l'ergonomie et de la psychologie du travail (lors d'analyse de la tâche, de la performance et de la fiabilité humaine, dans les études sur l'apprentissage ou la formation, dans le design d'interfaces, etc., Leplat, 1991) ainsi que dans le domaine de la psychologie cognitive (raisonnement, résolution de problèmes, etc., Godet & Simon, 1998 ; Chase & Simon, 1973). Le concept d'expertise est peu à peu sorti du monde exclusif de la recherche pour devenir un phénomène d'intérêt social et culturel, entrant dans la scène politique et constituant un enjeu majeur dans les décisions de réorganisation des entreprises (Farrington-Darby & Wilson, 2006) : le transfert, l'acquisition et l'extraction de l'expertise sont au cœur des préoccupations dans un monde toujours plus concurrentiel, qui subit une évolution très rapide en matière d'introduction de nouvelles technologies, avec une population âgée plus nombreuse et des jeunes qui ont souvent une formation plus théorique et moins centrée sur la pratique.

Les études menées à partir des performances expertes sont très enrichissantes pour la recherche fondamentale et la compréhension du fonctionnement des processus humains ainsi que pour les applications pratiques qu'elles offrent. Dans une perspective fondamentale, les différences de performance entre experts et novices sont les plus larges que l'on ait pu mettre en évidence chez des adultes sains dans des conditions expérimentales contrôlées (Ericsson, 1994). Ces différences permettent de mieux comprendre le fonctionnement des mécanismes cognitifs et sensori-moteurs qui régissent le comportement humain et son adaptation à l'environnement. En outre, l'étude de l'expert qui a atteint le niveau le plus élevé dans un domaine permet d'identifier les limites des performances humaines dans un milieu naturel (Ericsson & Lehmann, 1996 ; Ericsson, 1994).

Dans une optique plus appliquée, une meilleure connaissance des processus cognitifs intervenant dans la nature et le développement de l'expertise fournit une aide dans la conception de systèmes, de milieux de travail, de programmes d'apprentissage, etc (Pliske et al., 2001). Ericsson (1994) insiste sur les implications importantes que l'étude de l'expertise peut avoir sur l'amélioration de la formation dans des domaines professionnels (tels que les spécialisations en médecine) où les évaluations standardisées ne sont pas courantes malgré le souhait, largement exprimé dans la littérature scientifique anglo-saxonne, de les utiliser de façon plus fréquente et pertinente (Hamilton et al., 2002 ; Scott et al., 2001 ; Smith et al., 2001 ; Ramsay et al., 2000).

L'étude de la performance experte a donc des implications importantes aussi bien pour la compréhension de la structure et des limites de l'adaptation humaine que pour l'élaboration de méthodes d'apprentissage optimales (Ericsson & Charness, 1994).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de reproduire le plan expérimental de l'étude 1 avec des sujets experts afin d'analyser les différences de performance entre les conditions (laparoscopie classique, robot en 2D ou 3D), chez des sujets qui manipulent quotidiennement les instruments de laparoscopie classique ou robotique. Lors de cette étude, nous voulions précisément étudier l'impact de l'expertise sur les différences perceptives (2D-3D) et instrumentales (robot-laparoscopie classique) mises en évidence dans l'étude précédente. Notre hypothèse était que les différences perceptives et instrumentales entre les trois conditions seraient réduites chez les sujets experts qui sont habitués à manipuler les instruments de nos expériences et à agir à partir d'images bidimensionnelles.

2 MÉTHODOLOGIE

Sujets

Douze étudiants en médecine, sans aucune expérience en chirurgie ouverte, laparoscopique ou robotique, composaient le groupe des sujets novices. Le deuxième groupe expérimental était composé de douze chirurgiens experts en laparoscopie classique (nombre d'opérations en laparoscopie classique >100). Quatre chirurgiens experts en chirurgie robotique (nombre d'opérations avec le système robotique > 50) composaient le dernier groupe. Il est important de souligner que les experts en chirurgie robotique étaient également experts en laparoscopie classique. Afin de distinguer sans ambiguïté les deux groupes d'experts, nous parlerons d'experts en laparoscopie pour désigner le premier groupe et d'experts en robotique pour le second.

Procédure

La procédure expérimentale était sensiblement la même que celle de l'étude précédente. Les sujets commençaient par une phase de familiarisation dans laquelle ils répétaient dix fois une même tâche (voir étude 1) avec le système robotique en 2D, avec le système robotique en 3D ou en laparoscopie classique. Le temps de réalisation de la tâche (en secondes) était mesuré pour chaque essai. Les 12 sujets novices et les 12

chirurgiens experts en laparoscopie étaient répartis dans les trois conditions, tandis que les chirurgiens experts en chirurgie robotique ne réalisaient la tâche de familiarisation que sur le robot en 2D ou 3D⁸². Avec le système robotique, les sujets réalisaient cinq répétitions en vision 2D et cinq en vision 3D (dans un ordre contrebalancé). En laparoscopie classique, les sujets réalisaient cinq essais avec leur main dominante et cinq avec leur main non dominante (l'ordre étant de nouveau contrebalancé entre les sujets).

Dans une seconde phase, tous les sujets réalisaient quatre tâches de complexité croissante (identiques à celles de l'étude précédente) dans chacune des trois conditions (laparoscopie classique, système robotique en 2D et en 3D). L'ordre des conditions était différent pour chaque sujet. Après la réalisation de chaque tâche, les sujets estimaient leur degré de confiance (certitude), de satisfaction et de difficulté sur une échelle de Likert graduée de 1 à 4 (voir annexe).

3 RÉSULTATS

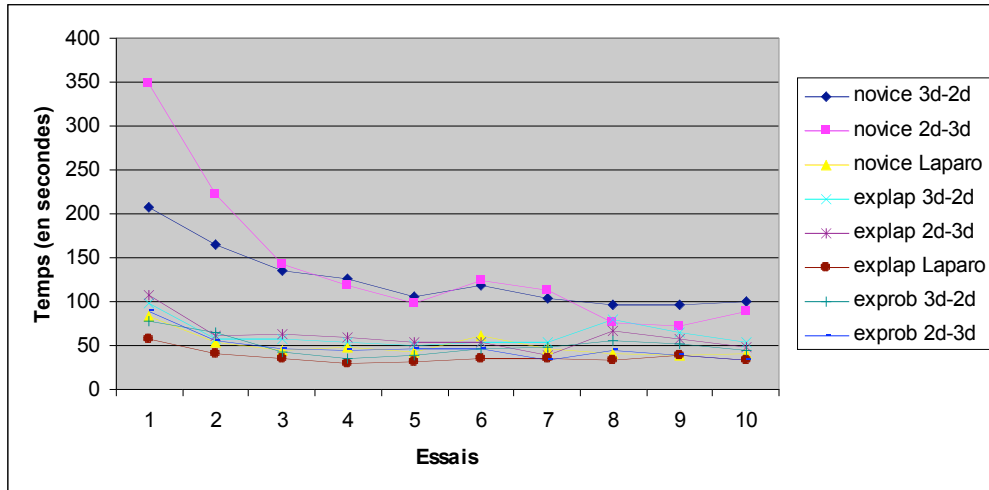
1. Phase de familiarisation

Les données de cette phase ont été analysées par une analyse de variance à mesures répétées en fonction de la condition expérimentale (laparoscopie classique, système robotique en 2D et en 3D) et du niveau d'expertise des sujets (novices, experts en laparoscopie, experts en robotique). Les analyses *post hoc* ont été réalisées à partir du test de Tukey (HSD pour échantillons de tailles différentes).

Nos résultats montrent un effet principal de l'apprentissage ($F=4.18$, $p<0.05$) ainsi qu'un effet principal de l'expertise ($F=14.35$, $p<0.0005$, voir graphique 1). Les sujets novices ont en effet des performances moins bonnes que celles des experts (en laparoscopie et en robotique) lorsqu'ils réalisent la tâche avec le robot (quelle que soit la dimension visuelle). En laparoscopie classique par contre, l'ensemble des sujets (novices et experts) a des performances similaires (voir graphique). Un effet de la condition expérimentale est mis en évidence mais seulement pour les sujets novices : cet effet différencie les trois conditions aux deux premiers essais ($p<0.005$) tandis qu'à partir du troisième essai, les différences de performance ne se situent plus qu'entre le robot (2D ou 3D) et la laparoscopie classique, en faveur de cette dernière ($p>0.01$). Nos résultats montrent également que les courbes d'apprentissage sont significativement différentes selon le degré d'expertise des sujets ($F=5.42$, $p<0.05$) et selon la condition

⁸² Vu le petit nombre de chirurgiens experts en robotique, nous n'avons pu étudier leur performance en laparoscopie classique dans la première phase.

expérimentale ($F=6.84$, $p<0.01$). En outre, comme dans l'étude précédente, aucune différence n'est mise en évidence lors du passage 2D-3D (ou 3D-2D) avec le robot ou lors du changement de main en laparoscopie, que ce soit chez les novices ou chez les experts⁸³.



Graphique 1: Evolution des courbes d'apprentissage en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale.

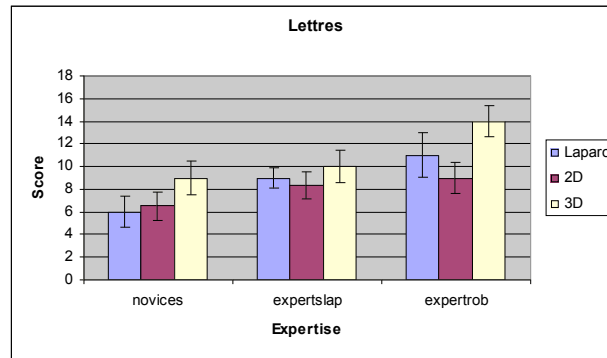
2. Tâches de complexité croissante

Une analyse de variance a été réalisée pour chaque tâche en fonction de la condition expérimentale (laparoscopie classique, système robotique en 2D et en 3D) et du niveau d'expertise des sujets (novices, experts en laparoscopie, experts en robotique). Les analyses *post hoc* ont été réalisées à partir du test de Tukey (HSD pour échantillons de tailles différentes).

Dans la première tâche (chiffres et lettres à replacer correctement sur un échiquier), nous observons un effet significatif de l'expertise ($F=16.64$, $p<0.001$), de la condition expérimentale ($F=7.85$, $p<0.05$) ainsi qu'un effet d'interaction significatif ($F=15.44$, $p<0.005$, graphique 2). Concernant l'expertise, les chirurgiens montrent des performances significativement meilleures que les novices, particulièrement en laparoscopie classique (où l'ensemble des chirurgiens montre une meilleure performance que les étudiants en médecine, $p<0.05$) et avec le système robotique en 3D (où les chirurgiens experts en robotique obtiennent une meilleure performance que les novices et chirurgiens experts en laparoscopie, $p<0.05$). L'effet de la condition est mis en évidence au sein des groupes de novices et d'experts en robotique, leurs

⁸³ Les courbes en laparoscopie utilisant les mains dominante et non dominante sont d'ailleurs regroupées dans le graphique afin de ne pas surcharger ce dernier inutilement.

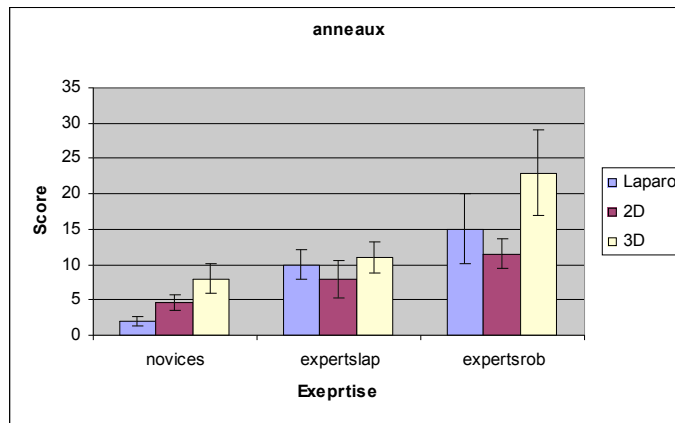
performances étant significativement meilleures avec le système robotique en 3D qu'avec le système robotique en 2D ou en laparoscopie classique ($p < 0.05$). Aucune différence significative entre les conditions n'est mise en évidence dans le groupe d'experts en laparoscopie, ces derniers montrant une performance similaire dans les trois conditions.



Graphique 2 : Score à la première tâche en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale

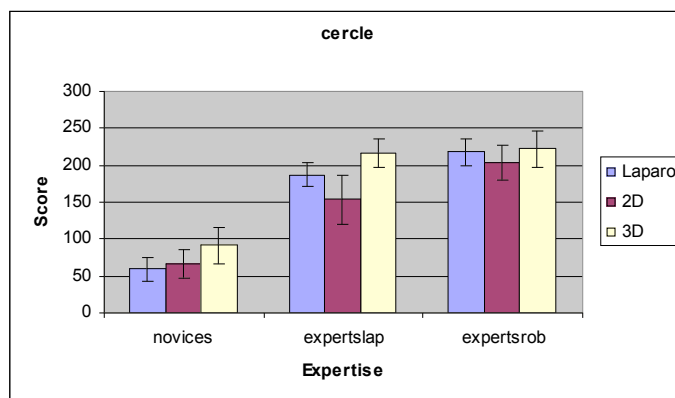
Dans la seconde tâche (parcours d'anneaux), nous observons de nouveau un effet principal de l'expertise ($F=35.74$, $p < 0.0000$), de la condition expérimentale ($F=28.84$, $p < 0.0001$) ainsi qu'un effet d'interaction ($F=17.64$, $p < 0.001$, graphique 3). L'ensemble des chirurgiens montre une meilleure performance que les sujets novices pour chacune des conditions (excepté entre les experts en laparoscopie et les novices pour le robot en 3D). L'effet de la condition est présent chez les sujets novices, dont les performances sont significativement différentes entre les trois conditions ($p < 0.05$), et chez les chirurgiens experts en robotique, dont les performances sont significativement meilleures avec le robot en 3D qu'avec le robot en 2D ($p < 0.05$). Par contre, aucune différence entre les conditions n'est mise en évidence chez les chirurgiens experts en laparoscopie, ces derniers montrant des performances similaires en laparoscopie classique et avec le système robotique en 2D et 3D.

ETUDE 2



Graphique 3: Score à la seconde tâche en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale

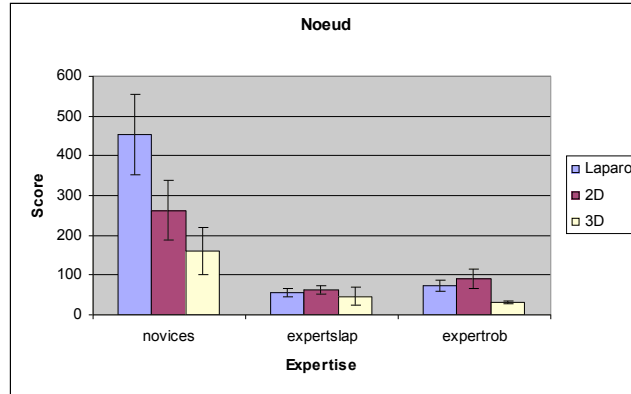
Dans la troisième tâche (découpage du cercle), nous montrons un effet significatif de l'expertise ($F=43.75$, $p<0.000$, graphique 4) : les performances de l'ensemble des chirurgiens sont meilleures que celles des novices ($p<0.0001$) et les chirurgiens experts en robotique présentent de meilleures performances que les chirurgiens experts en laparoscopie lorsqu'ils sont en laparoscopie classique ou avec le robot en 2D ($p<0.05$). Un effet de la condition est également mis en évidence ($F=8.39$, $p<0.05$) mais seulement chez les chirurgiens experts en laparoscopie, qui obtiennent de meilleures performances avec le robot en 3D qu'avec le robot en 2D (ces deux conditions n'étant pas significativement différentes de la laparoscopie classique).



Graphique 4: Score à la troisième tâche en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale

La réalisation de la dernière tâche (la suture et le nœud) produit également un effet significatif de l'expertise ($F=37.45$, $p<0.0001$) et de la condition expérimentale ($F=5.86$, $p<0.05$). L'ensemble des chirurgiens réalise le nœud plus rapidement que les novices, quelle que soit la condition expérimentale. La performance de ces derniers est significativement meilleure avec le robot (2D ou 3D) qu'avec la laparoscopie classique ($p<0.01$). Si aucune différence entre les conditions n'est mise en évidence chez les

experts en laparoscopie, les chirurgiens experts en robotique sont plus rapides avec le robot en 3D que dans les deux autres conditions ($p<0.05$).



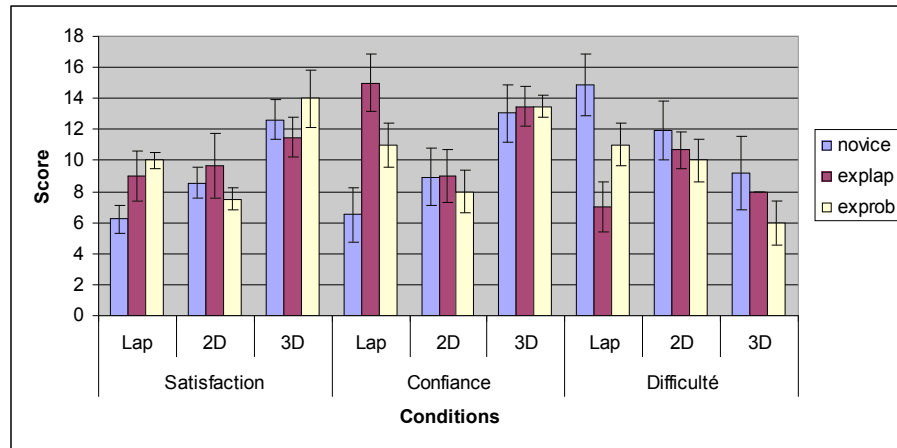
Graphique 5 : Temps pour réaliser la quatrième tâche en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale

3. Réponses au questionnaire

Les réponses au questionnaire mettent en évidence un effet principal de la condition au niveau de la satisfaction et de la confiance pour toutes les tâches⁸⁴ (graphique 6). Au niveau de la satisfaction, les sujets sont plus satisfaits de leur performance avec le robot en vision 3D que dans les deux autres conditions. Au niveau de la confiance, les sujets se sentent plus sûrs d'eux avec le système robotique en 3D qu'avec le robot en 2D pour les tâches 1 (chiffres et lettres, $p<0.05$) et 2 (parcours d'anneaux, $p<0.05$) et qu'en laparoscopie classique et avec le robot en 2D pour les tâches 3 (cercle, $p<0.05$) et 4 (nœud, $p<0.05$). Nous n'obtenons pas d'effet de la condition dans l'évaluation de la difficulté.

Au niveau de l'expertise, nos résultats montrent que les chirurgiens experts en robotique sont significativement plus satisfaits de leur performance dans les tâches 1 et 4 que les autres sujets ($p<0.05$). Les chirurgiens experts sont également plus sûrs d'eux que les sujets novices, particulièrement les experts en laparoscopie dans les tâches 2, 3 et 4 ($p<0.005$). Les experts expriment également moins de difficultés que les novices pour les tâches 1 et 4 ($p<0.05$).

⁸⁴ Pour la satisfaction : chiffres et lettres : $F=4.74$, $p<0.05$; parcours d'anneaux : $F=6.46$, $p<0.05$; cercle : $F=5.32$, $p<0.05$; nœud : $F=6.36$, $p<0.05$.
 Pour la confiance : chiffres et lettres : $F=13.46$, $p<0.005$; parcours d'anneaux : $F=15.84$, $p<0.001$; cercle : $F=7.64$, $p<0.05$; nœud : $F=12.47$, $p<0.005$.



Graphique 6 : Score total aux sentiments de satisfaction, confiance et difficulté en fonction de l'expertise et de la condition expérimentale

4 DISCUSSION

4.1 Phase de familiarisation

Nos résultats mettent à nouveau en évidence un effet plancher lors de la réalisation de la tâche simple (voir étude 1). Ce dernier est particulièrement visible dans les performances des chirurgiens, et cela quels que soient leur type d'expertise et la condition expérimentale : tous montrent des performances similaires avec le robot en 2D, 3D et en laparoscopie classique. Si les performances des sujets novices restent plus lentes que celles des experts lors de l'utilisation du robot, cette différence d'expertise n'apparaît pas en laparoscopie classique : dans cette condition, les sujets novices présentent des résultats similaires à ceux des experts. Cette absence de différence entre experts et novices en laparoscopie classique témoigne du manque de sensibilité de cette tâche lorsqu'elle est réalisée en laparoscopie classique, ce qui n'est pas le cas avec le système robotique. Elle semble en effet ne requérir aucune compétence préalable lorsqu'elle est réalisée par laparoscopie classique, contrairement à sa réalisation avec le système robotique. En outre, nos résultats précisent que la compétence préalable nécessaire pour l'obtention d'une meilleure performance avec le système robotique ne relève pas d'une expertise spécifique avec ce système mais d'une expertise générale en laparoscopie (puisque les chirurgiens experts en laparoscopie et en robotique ne présentent pas de différence).

Par rapport à l'étude précédente, cette étape confirme certaines données ou tendances observées auparavant (elle reproduit notamment, chez les sujets novices, une courbe d'apprentissage similaire à celle de l'étude 1) mais elle nous procure également des

informations supplémentaires liées à l'expertise. Ainsi, si dans la première étude, les courbes de la laparoscopie classique et du robot ne se rejoignaient pas au bout des dix essais, nous montrons dans cette seconde étude que chez des sujets experts, les courbes de toutes les conditions se superposent. Dans l'étude précédente, nous mettions en évidence la taille du champ et le déplacement fréquent de la caméra pour expliquer la différence persistante entre le robot (2D et 3D) et la laparoscopie classique. Cette seconde étude qui prend en considération la performance d'experts nous montre que l'expertise peut réduire (et même supprimer) l'effet de ces deux facteurs, qui ont toutefois une influence considérable sur la performance de sujets novices.

4.2 *Tâches de complexité croissante*

Cette seconde partie confirme les résultats et les tendances observées lors de la première étude avec des sujets novices. En outre, la comparaison avec la performance de sujets experts nous procure de nouvelles informations sur la façon dont sont traitées les images en 2D et 3D et nous renseigne sur les limites⁸⁵ des mécanismes perceptifs humains dans un contexte naturel avec des sujets sains.

Ainsi, si nous observons de manière générale une différence entre les conditions chez les sujets novices, cette différence est nettement moins apparente dans la performance des sujets experts, particulièrement chez les chirurgiens experts en laparoscopie. Les sujets novices obtiennent de meilleures performances avec le robot en 3D qu'avec le robot en 2D (tâches 1 et 2) et la laparoscopie classique (tâches 1, 2 et 4). A l'inverse, les chirurgiens experts en laparoscopie montrent des performances similaires dans les trois conditions lors de la réalisation de toutes les tâches (excepté pour la troisième tâche dans laquelle leur performance est meilleure avec le robot en vision 3D que dans les autres conditions). Les chirurgiens experts en robotique quant à eux obtiennent de meilleures performances avec le robot en vision 3D que dans les deux autres conditions pour la majorité des tâches (1, 2 et 4). L'ensemble de ces résultats témoigne d'une sensibilité différente aux aspects perceptifs (2D-3D) et instrumentaux (laparoscopie et système robotique) en fonction, non seulement du niveau d'expertise, mais également du type d'expertise.

⁸⁵ Dans ce cas-ci, limites supérieures puisque nous avons analysé la performance de sujets experts, à l'inverse des études qui examinent les limites inférieures chez des patients présentant des déficits. Ces deux approches ont le même objectif (comprendre le fonctionnement humain) mais elles tentent de l'atteindre par des constatations opposées : une à partir de la détérioration (sélective) des performances et l'autre à partir de l'amélioration considérable de la performance.

Sur le plan perceptif, nous montrons que les performances des sujets novices (tâches 1 et 2) et des chirurgiens experts en robotique (tâches 1, 2 et 4) sont sensibles à la différence 2D-3D tandis que les chirurgiens experts en laparoscopie y semblent moins sensibles. Ces résultats enrichissent considérablement le débat sur le traitement de l'information visuelle en 2D et 3D. Tout d'abord, l'absence de différence entre le 2D et le 3D chez les chirurgiens experts en laparoscopie témoigne de la mise en œuvre de mécanismes qui leur permettent de compenser la perte de profondeur binoculaire en vision 2D. De fait, les chirurgiens experts en laparoscopie pratiquent quotidiennement des opérations à partir d'images bidimensionnelles et ont donc appris à utiliser de façon efficace les indices de profondeur monoculaires pour guider leur action. Plusieurs études ont en effet montré que ces indices étaient sensibles aux phénomènes d'apprentissage (Marotta et al., 1998). Ces indices sont traditionnellement qualifiés de « cognitifs » dans le sens où ils sont traités par des processus conscients, lents et coûteux en ressources de traitement par opposition aux indices binoculaires qui ont des bases plus physiologiques et relèvent de traitements plus automatiques, rapides et inconscients (Greenwald et al., 2005; Mazyn et al., 2004 ; Bruce et al., 2003 ; Rock , 2001). Avec la pratique, il semblerait que les indices monoculaires soient intégrés en temps réel à l'action et soient traités plus rapidement et inconsciemment chez les chirurgiens experts, tandis que la performance des sujets novices en 2D serait, au contraire, caractérisée par un traitement quasi conscient des indices monoculaires pour guider leur action (par exemple, l'utilisation presque explicite de l'indice de recouvrement).

Par ailleurs, la sensibilité à la différence entre la vision 2D et 3D, mise en évidence chez les experts en robotique, ne correspond pas exactement à celle des sujets novices : contrairement à ces derniers, les chirurgiens experts en robotique ont également mis en place des mécanismes de compensation en vision 2D (puisque ceux-ci obtiennent des performances similaires à celles des chirurgiens experts en laparoscopie quand ils sont en 2D, quelle que soit la technique) mais leur expertise avec le système robotique leur permet de mieux exploiter l'information visuelle en 3D et d'améliorer ainsi leur performance dans cette condition par rapport à celle des chirurgiens experts en laparoscopie classique. De fait, la seule différence qui existe entre les chirurgiens experts en robotique et les experts en laparoscopie est observée lors de l'utilisation du système robotique en vision 3D, mais pas dans les autres conditions.

Si l'on se place maintenant sur le plan instrumental, nos résultats mettent en évidence que les performances des sujets novices sont, de manière générale, moins bonnes en laparoscopie classique qu'avec le système robotique. Chez les chirurgiens au contraire, ce sont les performances avec le système robotique en 2D qui ont tendance à être moins bonnes que celles observées en laparoscopie classique. Ces résultats prouvent que si les

sujets novices sont particulièrement en difficulté lors de la manipulation des instruments de laparoscopie, la performance des chirurgiens experts semble quant à elle plus perturbée par l'utilisation du robot en vision 2D que par la laparoscopie classique, dont ils sont experts dans le maniement. Ces résultats sont également reproduits au niveau de l'évaluation subjective : les chirurgiens experts (particulièrement ceux experts en laparoscopie) se sentent plus sûrs d'eux et moins en difficulté en laparoscopie classique qu'avec le robot en vision 2D.

5 CONCLUSIONS

Nos résultats montrent que les meilleures performances des sujets experts s'expliquent aussi bien sur un plan perceptif (meilleur traitement de l'information visuelle en 2D) que sur un plan instrumental (meilleure maîtrise de la laparoscopie). En outre, nous montrons que la performance des chirurgiens experts en robotique n'est pas identique à celle des chirurgiens experts en laparoscopie : ceux-ci semblent moins sensibles à l'apport du 3D procuré par le système robotique. Enfin, l'ensemble de nos résultats apporte des éléments qui expliquent les contradictions, relevées dans la littérature chirurgicale, concernant l'impact des images en 2D et 3D : certaines études qui examinaient les performances de sujets novices montraient des différences de performance entre la vision 2D et 3D (Hubens et al., 2003 ; Taffinder et al., 1999) tandis que d'autres qui étudiaient la performance de chirurgiens confirmés n'obtenaient pas ces différences (Hanna et al., 1998, 1997 ; Chan et al., 1997 ; Crosthwaite et al., 1995). Ces contradictions trouvent une explication dans nos résultats qui montrent que les chirurgiens habitués à traiter des images en 2D sont devenus moins sensibles à l'apport procuré par la vision 3D que des sujets novices.

Notre étude présente certaines limites. La plus importante est la petite taille de notre échantillon d'experts en robotique (n=4). La chirurgie robotique étant une toute nouvelle technologie, il ne nous a pas été possible d'observer la performance d'un plus grand nombre d'experts en robotique. Cette limite reflète un inconvénient majeur des recherches réalisées dans des environnements naturels, qui sont dépendantes de la réalité du terrain.

ETUDE 3

COURBES D'APPRENTISSAGE AVEC DES SUJETS NOVICES

Comparison of learning curves and skill transfer in classical and robotic laparoscopy according to the viewing conditions: Implications for training

Adélaïde Blavier⁸⁶, Quentin Gaudissart⁸⁷, Guy-Bernard Cadière², Anne-Sophie Nyssen⁸⁸

Accepté pour publication dans l'American Journal of Surgery

⁸⁶ National Fund of Scientific Research, Cognitive Ergonomics Laboratory, University of Liège, Liège, Belgium

⁸⁷ Department of gastro-intestinal surgery, CHU St Pierre, Brussels, Belgium

⁸⁸ Cognitive Ergonomics Laboratory, University of Liège, Liège, Belgium

Préambule

Rappel des objectifs de l'étude 3

Un des enseignements majeurs des études précédentes est le résultat surprenant que nous avons obtenu lors de la phase de familiarisation des sujets avec les techniques de laparoscopie : une meilleure performance en laparoscopie classique qu'avec le robot (2D et 3D) et surtout un effet plancher en laparoscopie classique alors que la plupart des études relatent des courbes d'apprentissage significatives. Nous avons en outre observé, au cours des essais dans la phase de familiarisation, une compensation de la perte de perception binoculaire de la profondeur, les sujets avec le robot en 2D rejoignant les performances des sujets en 3D dès le second essai. Toutes ces données, en contradiction avec la littérature, nous ont incitée à étudier plus attentivement le processus d'apprentissage de tâches complexes en fonction des deux dimensions dégagées précédemment. Dans cette partie, notre objectif est spécifiquement d'étudier l'acquisition des habiletés et l'évolution des performances chez des sujets novices utilisant les techniques de chirurgie minimale invasive et d'analyser notamment si les performances en 2D et en 3D se rejoignent à nouveau lors d'une tâche plus complexe⁸⁹ que celle utilisée dans la phase de familiarisation de l'étude précédente.

A la lumière des résultats des études précédentes, nous avons ajouté au protocole de l'étude suivante une nouvelle condition expérimentale, la laparoscopie classique avec vue directe (3D), afin de compléter le tableau différenciant les dimensions perceptives et instrumentales et d'en évaluer ainsi plus précisément l'apport (voir table I). Cette condition était absente dans la première étude en raison de son manque de pertinence écologique et clinique mais son importance théorique, dans la compréhension des interactions entre les deux dimensions que nous avons dégagées, nécessite son introduction dans notre recherche.

Table I : Dimensions dégagées par les quatre conditions expérimentales

PLAN EXPÉRIMENTAL		DIMENSION INSTRUMENTALE	
DIMENSION PERCEPTIVE		Laparoscopie classique	Robot
	2D	<i>Ecran</i>	<i>Robot en 2D</i>
	3D	<i>Vue directe</i>	<i>Robot en 3D</i>

⁸⁹ Le choix d'une tâche plus complexe est motivé par la volonté d'éviter l'effet plancher observé dans les études précédentes.

Enfin, nous devons trouver une tâche adéquate pour étudier ces phénomènes, ni trop simple, ni trop complexe afin d'éviter tout effet plancher ou plafond. Parmi les différentes tâches administrées dans la première étude, le parcours dans les anneaux fut la seule tâche à produire une différenciation particulièrement sensible entre les trois conditions. Les performances à cette tâche étaient également les seules à être significativement corrélées aux performances aux autres tâches ; en effet, cette tâche regroupait nombre de gestes essentiels et pertinents dans la pratique chirurgicale. Nous avons donc choisi de conserver cette tâche avec les mêmes caractéristiques pour cette étude.

Notre hypothèse principale pour cette seconde partie est que le robot en 3D permettra de meilleures performances et un apprentissage plus rapide de la tâche complexe par rapport aux autres conditions et cela, dès les premiers essais. Nous émettons également l'hypothèse qu'au terme de quelques essais, les performances avec le robot en 2D rejoindront celles obtenues avec le robot en 3D, les sujets s'étant adaptés à la vision 2D et ayant pallié l'absence de vision binoculaire. Selon les résultats observés dans l'étude précédente, la laparoscopie avec vue directe permettra une meilleure performance que celle à partir de l'écran mais les difficultés techniques (rigidité des instruments, difficulté de maniement) dans ces deux conditions amèneront des performances moins bonnes qu'avec le robot, qui persisteront et empêcheront un rapprochement significatif des courbes d'apprentissage des différentes conditions.

1 INTRODUCTION

The fundamental change, produced by new technology, in how surgeons perform operations has educational implications related to learning curves and patient safety (Sidhu et al., 2004). Traditionally, surgeons have honed their skills in the operating rooms through hands-on experience with veteran mentors (Hamilton et al, 2001). This manner of teaching effectively trains surgeons in traditional open surgical techniques, but is costly in terms of time, resources and patient morbidity (Bridges et al., 1989). Over the past decade, minimally access surgery has revolutionized general surgery, posing new obstacles for surgeons attempting to acquire laparoscopic skills (Jones et al., 1996). Indeed, laparoscopic surgery requires specialized training and practice in order to acquire new skills to operate, to manipulate tissues with long instruments and a new knowledge of anatomy and spatial orientation (Gallagher et al., 2003; Cadière et al., 1999). Moreover, classical laparoscopic surgery is generally a two-dimensional surgery. The loss of depth perception and spatial orientation are the main drawbacks for the novice to overcome when facing the television monitor (Chan et al., 1997). Advanced complicated laparoscopic surgery requires precise manipulation of the instruments. The success of surgery, the operating time, and the morbidity rate are directly related to the manipulation skills and are responsible for the well-described “learning curve” (Sidhu et al., 2004; Forbes et al., 2004; Smith et al., 2001).

However, minimal invasive surgery was introduced and adopted in a rapid form without precise appreciation of the long learning curve that constitutes the only existing path to overcome all these difficulties (Hernandez et al., 2004). Furthermore, very few studies have been done regarding the surgical skills education and competency testing associated with the use of new and sophisticated technology (Prasad et al., 2002). In order to avoid the problems that occurred at the introduction of laparoscopic surgery, several recent studies laid stress upon the need to understand how new technology affects learning curves in order to establish appropriate training and assessment (Hernandez et al., 2004; Prasad et al., 2002). Our objective was to answer this question by evaluating learning curves in a comparative study between classical and robotic laparoscopy. Our study analysed the perceptual and instrumental impacts of robotic technology on learning surgical performance of novice subjects using a standard and ecological surgical task developed and validated in several studies (bench models (Scott et al., 2000; Derossis et al., 1998; Reznick et al., 1997).

In this paper, we used a new generation of 3D system, the da Vinci robotic system. This robotic system allows to regain three-dimensional visualization of the operative field and the degrees of instruments movement freedom lost in classical laparoscopy. Three-dimensional camera system may improve the efficiency, shorten the learning curve and

reduce the operating time (Chan et al., 1997). However, the literature shows contradictory results about the benefits brought by the 3D vision: some studies showing best motor performances with 3D vision (Reznick et al., 1997; Taffinder et al., 1999; Van Bergen et al., 1998; Dion et al., 1997; Peitgen et al., 1996; Birkett et al., 1994) while others failed to obtain difference of performance between 2D and 3D (Chan et al., 1997; Hanna et al., 1998; Crosthwaite et al., 1995; Pietrabissa et al., 1994) In order to precisely identify the nature of the skills and learning involved with the robotic system, we differentiated and independently studied the influence of the three-dimensional view (afferent component) comparing 2D and 3D view and the influence of movement freedom restoration (efferent component) comparing classical laparoscopy with robotic system. To our knowledge, this is the first study that compares learning curves between da Vinci system and classical laparoscopy according to the viewing condition.

Moreover, in a second time, we evaluated the transfer of acquired skills to the other viewing condition (perceptive switch: 2D versus 3D) and to the other technique (technical switch: classical laparoscopy versus robotic system). These two switches allowed us to study how participants adapted their strategy to the change in depth perception (loss or gain of binocular depth perception) and to the change in technique. Evaluating performance after a technical switch is highly relevant to understand the risk associated to a change of procedure (for example, a conversion procedure when the surgeon has to revert to a classical method) and to determinate an adequate surgical training with the different technologies.

Finally, we also studied the impact of the use of technology on subject's self-confidence, satisfaction and facility during the learning, knowing that these factors influence performance, motivation and new technology acceptance in operating room (Jones & Cale, 1997; Marshall et al., 2001). To avoid any bias from earlier laparoscopic experience in our comparison between classical and robotic laparoscopic techniques, we only selected medical students without any experience in open, minimally invasive or robotically assisted surgery.

2 METHODS

Materials

The Da Vinci system consists of two primary components: the surgeon's viewing and control console and, a moveable cart with three articulated robot arms. The surgeon is seated in front of the console, looking at an enlarged three-dimensional binocular

display on the operative field while manipulating handles that are similar to “joysticks”. Manipulation of the handles transmits the electronic signals to the computer that transfers the exact same motions to the robotic arms. The computer interface has the capacity to control and modify the movements of the instrument tips by downscaling deflections at the handles (by a factor between 5:1 to 2:1). It can eliminate physiologic tremor, and can adjust grip strength applied to the tools. The computer generated electrical impulses are transmitted by a 10-meter long cable and command the three articulated “robot” arms. Disposable laparoscopic articulated instruments are attached to the distal part of two of these arms. The third arm carries an endoscope with dual optical channels, one for each of the surgeon’s eyes. As the 3D visualization can be changed to 2D, we used 3D and 2D options.

We used a pelvitrainer for the classical laparoscopic condition (from Ethicon®). The optical system consists of the laparoscope, camera, light source and video monitor (Storz endoskope®). The camera was always controlled by the same observer.

Subjects

This study was approved by the ethical committee at the University Hospital Centre of Bruxelles. Informed consent was obtained from each participant. Forty medical students (22 women and 18 men, mean age 24.23 ± 2.56 years) without any prior surgical experience were selected. All subjects underwent standard acuity examination (with Ergovision and Visuotest from Essilor®) and only those with either normal or corrected-to-normal vision were included. As shown in table 1, they were randomly divided into four groups: the first using classical laparoscopy with indirect view (2D screen), the second using classical laparoscopy with direct view, the third using the robotic system in 3D and the fourth using the robotic system in 2D. Subjects were unaware of the existence of 2D and 3D options of the robotic system, and then unaware of the advantages or difficulties related to their experimental condition.

Our four experimental conditions allowed us to differentiate two dimensions (see Table 1): one we called “perceptive”, afferent component, where the type of vision (binocular versus monocular) was the main within-technique difference (between 2D and 3D viewing conditions with the same technique) and another we called “instrumental”, efferent component, where the freedom degree for instrument movement was the main between-technique difference (between robotic system and classical laparoscopy). This experimental plan allowed us to more precisely study the influence of new technology on learning curves and particularly to answer the question: is the impact of this robotic system explained by the benefit of 3D view (in this case, we should observe predominant effect of perceptive dimension and thus difference between 2D and 3D) or

by the recovery of movement freedom (in this case, we should observe predominant effect of instrumental dimension and thus difference between classical and robotic system)?

Table 1: number of subjects in each condition according to both dimensions

		<i>Instrumental dimension</i>	
		Classical laparoscopy	Robotic system
<i>Perceptive Dimension</i>	2D	10 subjects	10 subjects
	3D	10 subjects	10 subjects

Procedure

Experiment consisted of three successive phases:

1. Learning curves: subjects repeated 6 times the task in one of the four experimental conditions.
2. Perceptive switch: subjects performed 2 trials with the same technique as in the first phase but in the other viewing condition (2D versus 3D).
3. Technical switch: subjects performed 3 trials with the other technique (classical versus robotic system).

Task

The task involved passing in succession a needle, with a thread attached, through rings placed in different heights and depths. This task required depth perception and wrist articulation skills (Scot et al., 2000). It also developed skills at needle transfer and thus two—handed coordination and ambidexterity. Rings route resumed a lot of useful and usual fine movements required in minimal invasive surgery (grasping needle, curving and introducing it...) and notably reproduced all the complexity of the suture gesture (except the knot). By all these aspects, this task seemed to be a very efficient and accurate way to evaluate minimal invasive systems.

For each trial, we calculated a performance score that was the number of rings in which the subjects went through with the needle in 4 minutes. All procedures were video recorded and accuracy was evaluated by three independent observers: for each trial, an error score was constituted by the total of failures (failure to grasp needle in one attempt, dropping the needle, missing the ring) and an ambidexterity score corresponded to the total number of alternative use of left and right instruments.

Questionnaires

After determined trials (1, 2, 6, 7 and 9), participants evaluated their performance and answered a questionnaire about feelings of mastery and familiarity with the technique and their feeling of performance satisfaction, self-confidence and difficulty on a 4-point Likert scale.

After the technical switch, subjects were asked to compare the two techniques (robotic versus classical laparoscopic system) on a 4-point Likert scale about their general performance, speed of execution task, gesture accuracy, gesture quality, image quality, site view, instrument utilization, spatial orientation, comfort, action visibility, difficulty, concentration, feedback quality and anticipation.

Statistical analysis

Learning curves for performance score, error score, ambidexterity score and answers to the questionnaire were analysed by a repeated measures analysis of variance (Statistica 6.1). We used Newman-Keuls test for *post hoc* comparison. T student test was used to analyse answers to the final questionnaire comparing classical laparoscopy and robotic system. Significance was defined as a *p* value less than 0.05.

3 RESULTS

1. Learning curves

Performance of all subjects improved from their first to sixth trial but learning curves were significantly different between the four conditions ($p < 0.005$, see Fig.1): 3D view (classical and robotic laparoscopy) allowed a great and fast improvement whereas, the improvement was very weak in classical laparoscopy with 2D-indirect view. From the first trial, performances with robotic system in 3D (5.36 ± 0.56) and in classical laparoscopy with 3D-direct view (4.75 ± 0.52) were significantly better than with the robotic system in 2D (2.2 ± 0.58 , respectively $P < 0.005$ and $P < 0.01$) and the worst performance was obtained in classical laparoscopy with 2D-indirect view (0.9 ± 0.58 , respectively $P < 0.0005$, $P < 0.001$). As shown in Fig. 1, these differences persisted and increased trial after trial with a better performance with 3D view (robotic or classical laparoscopy) than with robotic system in 2D ($P < 0.005$ in the first trial, $P < 0.0005$ in the sixth trial) and classical laparoscopy with 2D-indirect view ($P < 0.0005$ in the first trial, $P < 0.0001$ in the sixth trial). The difference between robotic system in 2D and classical

laparoscopy with 2D-indirect view also persisted but decreased trial after trial ($P<0.005$ in the first trial, $P<0.05$ in the sixth trial).

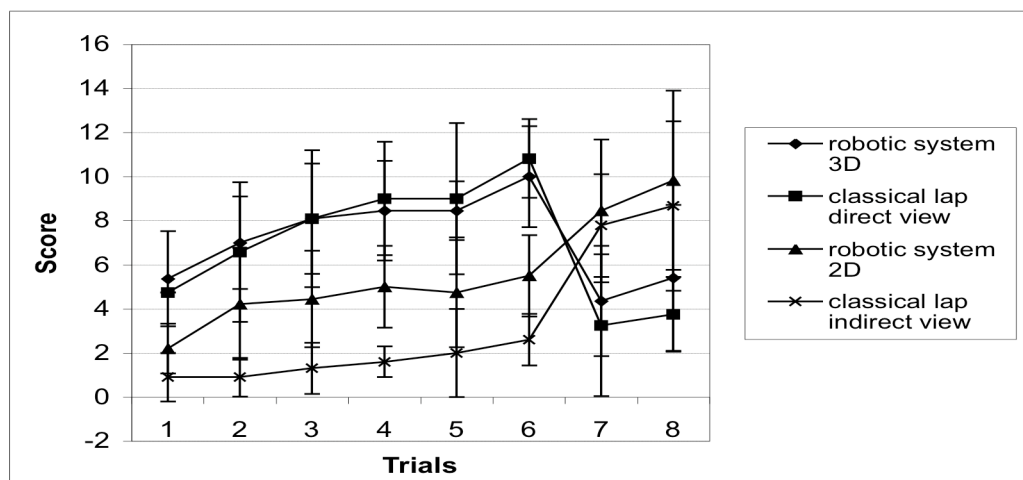


Fig.1. Learning curves for performance scores in the first six trials and in the perceptive switch (trials 7 and 8)

Concerning the performance quality (Table 2), from the first trial, error score was significantly higher in 2D-view conditions (laparoscopic and robotic) than in 3D-view conditions and did not evolve during the trials. In the first trial, ambidexterity score was significantly higher in classical laparoscopy with direct view than with robotic system in 3D ($P<0.05$) and higher in 3D-view conditions than in 2D-view conditions ($P<0.0005$). From the second trial, difference of ambidexterity score was only between 2D and 3D-view conditions, independently of the instrument aspect, and significantly evolved in all conditions until the sixth trial ($P<0.05$, Table 2).

Table 2
Error scores and ambidexterity scores in trials 1, 2, 6, 7 and 9 (interobserver reliability, Cronbach's alpha = 0.86)

	Classical laparosc With indirect view	Classical laparosc With direct view	Robotic system in 2D	Robotic system in 3D	P value
Error score					
Trial 1	20.12±2.29	9.03±3.14	18.89±5.1	11±4.3	$P<0.0000$ (1,2-3,4)
Trial 2	20.87±5.74	10.33±1.53	17.75±6.98	12.67±4.66	$P<0.05$ (1,2-3,4)
Trial 6	20.56±5.66	8.67±1.53	17.292±4.15	8.67±4.87	$P<0.0001$ (1,2-3,4)
Trial 7	22.67±4.73	11±8.66	22.11±5.28	11.63±7.25	$P<0.01$ (1,2-3,4)
Trial 9	30.43±9.55	13.08±4.58	23.67±8	10.5±4.37	$P<0.0005$ (1,2-3,4)
Ambidexterity score					
Trial 1	3.02±2.33	15.67±10.21	4.67±3.24	9.38±4.24	$P<0.001$ (4-3-1,2)
Trial 2	4.62±2.44	17.54±2.64	6.25±3.49	9.33±3.7	$P<0.0001$ (1,2,3-4)
Trial 6	7.06±2.5	23.05±7.23	7.86±4.18	17.56±5.68	$P<0.00001$ (1,2-3,4)
Trial 7	9.33±2.08	14.04±7.81	7.11±3.95	11.63±7.25	NS
Trial 9	2.86±2.54	13.07±7.43	5.78±2.77	9.87±4.05	$P<0.005$ (1-3,4;2-4)

Concerning answers to the questionnaire, feelings of mastery ($P<0.00005$), familiarity ($P<0.0000$), satisfaction ($P<0.005$), self-confidence ($P<0.01$) and difficulty ($P<0.05$) significantly evolved in all conditions during the trials. As shown in Table 3 (trials 1, 2, 6), subjects significantly reported in general less mastery, familiarity, self-confidence and more difficulty in classical laparoscopy with 2D-indirect view than in other conditions. Satisfaction was not significantly different between the four conditions.

Table 3
Feelings scores of mastery, familiarity, satisfaction, self-confidence and difficulty for trials 1, 2, 6, 7 and 9

	Classical laparoscopy With indirect view	Classical laparoscopy With direct view	Robotic system in 2D	Robotic system in 3D	P value
Trial 1					
Mastery	1.22±0.44	1.83±0.72	1.89±0.78	2±0.7	NS
Familiarity	1.33±0.5	2.25±0.96	2.11±0.78	2.33±1	$P<0.05$ (3-1)
Satisfaction	1.44±0.53	2.17±1.03	1.78±0.83	2.33±0.87	NS
Self-confidence	1.44±0.73	2±0.95	2±0.87	2.56±0.73	$P<0.05$ (3-1)
Difficulty	3.67±0.5	3±0.74	3±0.74	2.78±0.67	$P<0.05$ (2,3,4-1)
Trial 2					
Mastery	1.44±0.53	2.25±0.75	2.33±0.87	2.56±0.53	$P<0.01$ (2,3,4-1)
Familiarity	1.56±0.53	2.5±0.79	2.33±0.87	2.78±0.67	$P<0.01$ (2,3,4-1)
Satisfaction	1.78±0.67	2.33±0.87	2.22±0.67	2.11±0.6	NS
Self-confidence	1.67±0.7	2.25±0.61	2.44±0.88	2.56±0.53	$P<0.05$ (2,3-1)
Difficulty	3.67±0.5	2.83±0.72	2.78±0.83	2.67±0.7	$P<0.05$ (2,3,4-1)
Trial 6					
Mastery	1.78±0.67	2.72±0.65	2.22±0.67	2.56±0.53	$P<0.05$ (3,4-1)
Familiarity	2±0.7	2.9±0.7	2.33±0.7	2.78±0.67	$P<0.05$ (1-4)
Satisfaction	2.11±0.78	2.9±1.04	2.22±0.67	2.56±0.53	NS
Self-confidence	1.89±0.78	2.72±0.79	2.44±1.13	2.56±0.53	NS
Difficulty	3.22±0.83	2.36±0.92	3.22±0.44	2.44±0.88	$P<0.05$ (1-3)
Trial 7					
Mastery	1.75±0.5	2.56±0.88	1.56±0.73	2.78±0.97	$P<0.05$ (3,4-1)
Familiarity	1.75±0.5	2.77±0.67	1.67±0.7	3±0.7	$P<0.005$ (3,4-1,2)
Satisfaction	2±0.82	2.67±0.5	1.22±0.44	2.89±0.78	$P<0.0005$ (3,4-1,2;1-2)
Self-confidence	1.75±0.5	2.67±0.7	1.56±0.73	3.11±0.78	$P<0.0005$ (3,4-1,2)
Difficulty	3±1.41	2.67±0.7	3.33±0.7	3±0.7	NS
Trial 9					
Mastery	1±0	1.71±1.11	1.75±0.46	2.27±±0.79	$P<0.005$ (2,3,4-1)
Familiarity	1±0	1.43±0.53	2.12±0.64	2.55±0.93	$P<0.0005$ (2,3-1,4)
Satisfaction	1±0	1.43±0.53	1.87±0.64	2.18±0.98	$P<0.005$ (2,3-1)
Self-confidence	1±0	1.86±0.69	1.75±0.7	2.45±0.93	$P<0.0005$ (2,3,4-1)
Difficulty	3.9±0.32	3.57±0.53	2.87±0.64	2.64±0.8	$P<0.0005$ (2,3-1,4)

1= classical laparoscopy with indirect view; 2= robotic system in 2D; 3= robotic system in 3D; 4= classical laparoscopy with direct view

2. *Perceptive switch*

After the perceptive switch (Fig. 1, trial 7), subjects performed significantly better with 3D view (robotic system, 8.44 ± 3.24 , and classical laparoscopy, 7.78 ± 2.33) than with 2D view (robotic system, 4.42 ± 2.39 , $P < 0.05$, and classical laparoscopy, 3.25 ± 1.7 , $P < 0.005$). The gap between the trials 6 and 7 was significant in all conditions: performance significantly decreased from 3D to 2D condition in classical ($P < 0.0005$) and robotic ($P < 0.0005$) system and significantly increased from 2D to 3D condition in classical ($P < 0.0005$) and robotic ($P < 0.005$) system. The improvement of performance between trials 7 and 8 was not significant in any condition.

Similar results were obtained concerning error score with a significantly higher score in 2D-view conditions than in 3D-view conditions (Table 2, trial 7). Concerning ambidexterity score, no significant difference was obtained between the four conditions (Table 2, trial 7).

When we compared subjective evaluation between trials 6 and 7 (Table 3), feelings of familiarity, mastery, self-confidence significantly decreased for subjects switching from 3D to 2D with classical (respectively, $P < 0.005$, $P < 0.0005$, $P < 0.001$) and robotic (respectively, $P < 0.05$, $P < 0.005$, $P < 0.01$) system and significantly increased for subjects switching from 2D to 3D only in classical laparoscopy (respectively, $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.05$). Feeling of satisfaction significantly decreased only for subjects switching from 3D to 2D with the robotic system ($P < 0.01$). No significant difference was obtained in the switch from 2D to 3D with the robotic system and in difficulty evaluation.

3. *Technical switch*

After the technical switch (trial 9, see Fig. 2), performance decreased in all conditions, reaching the same score as the first trial (in classical laparoscopy, performance was slightly worse than in the first trial). We obtained a significant difference between all conditions ($P < 0.000005$) except between classical laparoscopy with 3D-direct view (3.78 ± 1.64) and robotic system in 2D (2.38 ± 1.3), best performance was obtained with robotic system in 3D (5.55 ± 2.77) and worst performance was in classical laparoscopy with 2D-indirect view (0.3 ± 0.48). The improvement during these last three trials was significant only in classical laparoscopy with 3D-direct view ($P < 0.05$). In trial 10 ($P < 0.001$), performance was significantly better in 3D view (robotic system in 3D, 6.56 ± 3.05 and classical laparoscopy with direct view, 5.5 ± 3.25) than in 2D view

(robotic system in 2D, 2.67 ± 1.5 and classical laparoscopy with indirect view, 1.37 ± 1.06). In trial 11 ($P < 0.00005$), performance was significantly different between all conditions except between robotic system in 2D (3.5 ± 2.38) and classical laparoscopy with 2D-indirect view (1 ± 1), with a significantly better performance in classical laparoscopy with 3D-direct view (11.67 ± 2.08) than with robotic system in 3D (7.8 ± 1.09).

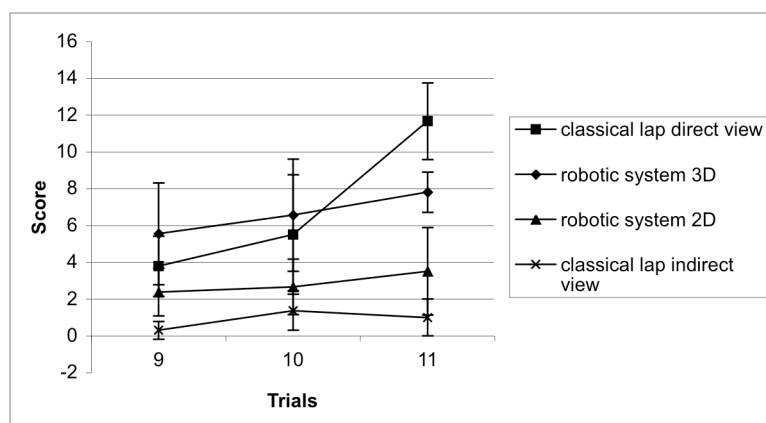


Fig.2. Learning curves for performance scores after the technical switch

Error score was significantly higher in classical laparoscopy with 2D-indirect view than in the 3D-view conditions (Table 2, trail 9). This high error score in classical laparoscopy with 2D-indirect view, decreased in the following trial to reach a score similar to the 2D robotic system score (20.17 ± 3.54). Ambidexterity score was significantly higher in the 3D-view conditions than in 2D-view conditions (Table 2, trial 9).

After the technical switch, subjects in classical laparoscopy with 2D-indirect view significantly reported worse feelings of mastery, familiarity, satisfaction, self-confidence and difficulty (Table 3, trial 9). The same negative evaluations about familiarity and difficulty feelings were reported by subjects in classical laparoscopy with 3D-direct view. Robotic system did not differ between 2D and 3D in any subjective evaluation.

Final questionnaire comparing the two techniques showed significant difference for all items except for the concentration and the feedback quality, perhaps these questions were to abstract or not understood by subjects (Table 4).

Table 4: Answers to questionnaire comparing the two techniques (classical and robotic laparoscopy)

	Classical laparoscopy	Robotic system	T and P Value
General performance	2±1.06	3±1.05	2.83; <0.01
Speed of performance	1.94±0.96	2.89±0.94	3; <0.005
Gesture accuracy	1.82±0.95	3.42±0.69	5.81; <0.05
Image Quality	1.8±0.79	2.98±0.89	3.38 <0.05
Site view	2.23±1.15	3.05±0.78	2.52; <0.05
Instrument utilization	1.87±0.96	3.42±0.84	5.09; <0.00005
Spatial orientation	1.88±0.78	3.31±0.88	5.12; <0.00005
Comfort	1.53±0.62	3.53±0.61	9.68, <0.000000
Concentration	2.24±0.9	2.37±1.12	No significant
Feedback quality	2.35±1.17	2.74±0.87	No significant
Action visibility	2.12±1.08	3.11±0.8	3.05; <0.005
Anticipation	2.23±0.97	2.89±0.96	2.07; <0.05
Complexity	2.98±1.02	1.96±1.01	2.29; <0.05
Gesture quality	1.88±0.78	3.32±0.58	6.28; <0.00000

4 DISCUSSION

4.1 *First phase: learning curves*

The need to compare learning curves obtained with different technologies and to determinate impact of several factors (depth perception, dexterity...) on surgical training has been pointed out by recent studies (Hernandez et al., 2004; Prasad et al., 2002; Yohannes et al., 2002). Indeed, our study showed that learning curves were different according to the technique and the viewing condition. In 3D-view conditions, learning curves of robotic and classical laparoscopy followed a similar pattern, with better performance and greater improvement than robotic system in 2D and classical laparoscopy with indirect view. In 2D-view conditions, we observed an improvement during the first three trials with the robotic system while in classical laparoscopy, the improvement was really small and progressive. Moreover, the gap in performance between 3D-view conditions (robotic system in 3D and classical laparoscopy with direct view) and 2D-view conditions (robotic system in 2D and classical laparoscopy with indirect view) grow up trial after trial. This finding of best performance with a 3D view whatever the instrumental aspect (classical or robotic), emphasizes the persistent and increasing impact of perceptive advantage brought by binocular vision that overlaps the instrumental difficulty. On the contrary, in 2D-view conditions, performances and improvement were better with the robotic system than in classical laparoscopy. This result suggests that unlike the 3D view, instrumental benefit influences and facilitates performance in 2D view.

No accuracy progress was observed in any condition during all trials but ambidexterity

score improved in all conditions particularly in 3D-view conditions, subjects using both hands with more facility. In parallel, participants generally reported less mastery, familiarity, self-confidence and more difficulty in classical laparoscopy with 2D indirect view than in the other conditions. However, these impressions positively evolved in all conditions, indicating an increase in the satisfaction and in the control sensation of the situation.

4.2 *Second phase: perceptive switch*

After the perceptive switch, as expected, subject's performances were affected by the 2D-3D change. In the two trials of this phase, the performance and error scores were only differentiated by the perceptive dimension, with better performance in 3D view (classical and robotic system) than in 2D view. Furthermore, performances were stable without any positive or negative evolution during the two trials. Perceptive switch had also a strong impact on subjective evaluation: a positive impact on subjects switching from 2D to 3D and a negative one on subjects switching from 3D to 2D. As in the previous phase, subjects reported more mastery, familiarity, self-confidence and satisfaction when they used 3D view (classical or robotic system) than when they acted with 2D view. These results again emphasized the role of perceptive dimension (see Table 1), differentiating between 2D and 3D whatever the instrumental dimension.

4.3 *Third phase: technical switch*

In the final phase, after the technical switch, the performances in all conditions decreased to the same score as in the first trial. Moreover, the performances did not much improve in this final phase, participants showing difficulty to adapt their movements to the other technique: with the robotic system, subjects kept conservatory strategy used in classical laparoscopy and showed difficulty to move the camera, and with classical laparoscopy, manipulation of long and rigid instruments seemed to be the most difficult obstacle to overcome, producing a very high error score in classical laparoscopy with 2D-indirect view. However, the improvement and best performance in the last trial in classical laparoscopy with direct view showed that 3D view allowed to efficiently overlap instrumental difficulty in classical laparoscopy.

Nevertheless, a supplementary factor has to be taken into account for the difference between classical laparoscopy with direct and indirect view: in classical laparoscopy with indirect view, the eye-hand orientation axis is deviated because the subject does not look in the same direction as he acts while, in classical laparoscopy with direct view, the eye-hand axis is re-established. This modification of the perception-action

axis can explain a part of difference observed between the two conditions, but its impact is difficult to exactly estimate. Recent studies have shown that angle and direction of looking affect the quality of endoscopic surgery [26,27] (Verwey et al., 2005; Previc, 1998). The optimal position of monitor appeared to involve a reasonable angle relative to the operating area (45°) while performance decreased with greater angle (90° (Verwey et al., 2005). In our study, the angle in classical laparoscopy with indirect view was 90°. This factor could particularly influence performance during the perceptive switch where the improvement between classical laparoscopy with indirect and direct view was more significant than between 2D and 3D robotic system.

In conclusion, the results after a technical switch led to two highly relevant observations: the skills acquired with a specific technique were not transferred to another technique, suggesting that skills acquired within each technique were not identical, and moreover, the learning with a specific technique could prevent learning and adequate use of another technique. Previous study suggested that robotic system could be an ideal training tool for residents and fellows because of the greater impact of the learning curve (Yohannes et al., 2002). However, our study moderates this suggestion emphasizing the difficulty to transfer skills learned with robotic system to classical laparoscopy.

5 GENERAL CONCLUSION

In this study, 3D view led to better performance and greater improvement than 2D view whatever the instrumental advantage may be. The difference in learning curves between the different conditions confirms the hypothesis that the learning process in the da Vinci system is shorter than in classical laparoscopy (Hernandez et al., 2004) but our study specify that this shortness is particularly due to the 3D view. All these findings emphasize the need to adapt the training tasks to the used technique (for example, the weak learning effect in classical laparoscopy with 2D indirect view suggests to begin with more simple and basic tasks, as already advocated (Arnold et al., 2002). Moreover, the difficult skill transfer after the technical switch suggests that the two techniques involved or trained not exactly identical skills, and lays stress on the necessity to pursue training with the different techniques in order to prevent gap in the performance and thus the operating risk if conversion procedure occurs. In our study, classical laparoscopy with direct view had not clinical relevance but was only used in order to better understand cognitive and visuo-motor mechanisms involved in the learning of a complex surgical task. Participants were novice and did not achieve an expert level at the end of the trials, it is then possible than other cognitive and visuo-motor processes

are involved in expert practice.

Finally, we showed a benefit of the training in the improvement of the performance but also in the feelings of mastery, familiarity, satisfaction, self-confidence and facility, essential factors of well-being, motivation, accurate performance and new technology acceptance in operating room (Jones & Cale, 1997; Marshall et al., 2001). By all these characteristics, this study encourages the use of bench models in training of surgical skills in parallel to traditional learning.

ETUDE 4

LA QUALITE DU GESTE ET SON EVOLUTION EN FONCTION DES DIMENSIONS PERCEPTIVE ET INSTRUMENTALE

1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'approfondir nos analyses sur la qualité du geste et le type d'erreurs recensées dans l'accomplissement de tâches chirurgicales. Ces données étaient exploitées de manière très générale dans l'article précédent, qui avait pour objectif essentiel d'étudier l'évolution des courbes d'apprentissage d'une tâche complexe chez des sujets novices. L'intérêt d'une étude plus détaillée de l'aspect qualitatif des performances est double.

Tout d'abord, à un niveau théorique, le type d'erreurs et la qualité du geste constituent un aspect de la performance qui nous fournit des renseignements précieux sur le traitement perceptif en cours ; en effet, à partir des erreurs, on peut identifier les processus et indices visuels utilisés par le sujet dans son traitement de l'information bidimensionnelle ou tridimensionnelle quand il interagit avec son environnement (Marotta et al., 1994, 1998 ; Servos & Goodale, 1994).

D'un autre côté, en chirurgie, comme dans de nombreux autres domaines, la qualité du geste est un facteur de qualité essentiel et déterminant qui caractérise parfois mieux la performance que la quantité d'objets traités. Le temps de complétion d'une tâche n'est qu'une des multiples facettes de l'évaluation des habiletés et peut parfois ne refléter qu'une mesure plutôt grossière de la performance. Smith et al. (2001) ont ainsi montré que la courbe d'apprentissage de la vitesse d'exécution était plus rapide que la courbe d'apprentissage de la précision. En outre, la mesure de la précision serait un indicateur plus sensible de l'acquisition des habiletés en laparoscopie que la mesure de la vitesse d'exécution (Smith et al., 2001). Cette conclusion encourage donc à considérer les deux types de variables (vitesse et qualité du geste) lors de développement de modules d'apprentissage et de compétences standard.

2 MÉTHODOLOGIE

Les performances analysées sont celles des sujets qui ont participé à l'étude 3. Cette dernière portait sur les courbes d'apprentissage à partir de l'épreuve des anneaux⁹⁰.

⁹⁰ Pour rappel, dans ce plan expérimental, les sujets devaient, dans un délai de quatre minutes, traverser le plus grand nombre d'anneaux (métalliques) possible, dans l'ordre du parcours, à l'aide d'un fil et d'une aiguille sans faire tomber cette dernière. Les sujets répétaient cette tâche six fois dans une des quatre conditions suivantes : système robotique avec une vue en 3D ou avec une vue en 2D, laparoscopie classique fermée (avec écran 2D) et laparoscopie classique ouverte (avec vue directe). Après ces six essais, les sujets réalisaient deux essais avec la même technique mais dans l'autre condition visuelle

Toutes les performances des sujets ont été intégralement enregistrées par cassettes vidéo. Trois observateurs indépendants ont visionné les cassettes séparément et les analyses statistiques ont été réalisées à partir de la moyenne de leur évaluation. Huber et al. (2003) ont montré l'efficacité et la fidélité inter-juges, qui étaient comparables aux résultats obtenus à partir d'un système d'enregistrement et de mesure informatique. Dans notre étude, la fidélité inter-juges, mesurée par l'alpha de Cronbach, était de 0.86.

Types d'erreurs recensées

Nous avons différencié les erreurs qui peuvent survenir dans les deux composantes du mouvement classiquement répertoriées dans la littérature (Jeannerod, 1984) :

- Erreur dans la perception de la distance (sur le plan vertical ou horizontal). Celle-ci reflète une erreur dans le mouvement dit d'approche ou de transport. Ce dernier dépend d'une représentation égocentrique de l'espace (centrée sur l'observateur, Marr, 1982) et est particulièrement sensible à la perception binoculaire de la profondeur (notamment la vergence, Mon-Williams & Dijkerman, 1999). Dans ce type d'erreur, l'orientation ou la position spatiale adoptée par le sujet n'est pas dans le même axe de profondeur que sa cible (instrument plus bas/haut que l'autre alors que le sujet a l'impression qu'ils sont tous deux à la même hauteur, aiguille plus bas/haut que l'anneau dans lequel elle est destinée à entrer...).
- Erreur de tentative : ce type d'erreur est différent du premier car il ne renvoie pas directement à un problème d'estimation de la distance mais plutôt à un problème de manipulation qui intervient dans l'acte de préhension (le sujet touche l'aiguille mais ne parvient pas à l'attraper, par exemple, parce que son instrument est en position trop horizontale par rapport à la cible...). Ce type d'erreur reflète la deuxième composante du mouvement qui est le mouvement de préhension. Celui-ci se base sur une représentation centrée sur l'objet (qui reprend les caractéristiques intrinsèques de l'objet telles que sa taille, forme, orientation...) et dépend à la fois des indices visuels monoculaires et binoculaires.
- Erreur dans la pression exercée sur l'aiguille : dans ce type d'erreur, les sujets exercent une pression inadaptée sur l'aiguille (trop faible ou trop forte). Ce type d'erreurs constitue en outre un indice de la force de préhension, en renvoyant au sujet un feedback à propos de la force avec laquelle il manipule les instruments :

(transfert perceptif : 2D versus 3D avec la même technique). Finalement, les sujets réalisaient trois essais avec l'autre technique (transfert technique).

- Lorsque la pression est trop faible, l'aiguille tombe : cette erreur survient lorsque le sujet ne tient pas assez fermement l'aiguille. Elle peut toutefois être parfois intentionnelle, le sujet laissant tomber (lâchant) l'aiguille pour la reprendre dans une position plus adéquate.
- Lorsque la pression est trop grande, l'aiguille saute : lors de l'acte de préhension ou lors de l'introduction de l'aiguille dans l'anneau, la pression métallique de l'instrument ou de l'anneau sur le métal de l'aiguille provoque un bond de cette dernière (souvent sur une grande distance⁹¹).
- Erreur de manipulation : dans cette catégorie, sont regroupées les erreurs qui ont trait à des problèmes de manipulation de la caméra et des instruments. Ces types d'erreurs ont été rassemblés car chaque catégorie ne présentait pas à elle seule un nombre d'apparitions suffisant pour être évaluée individuellement. En outre, certaines ne sont rencontrées qu'avec le robot. On a groupé sous cette catégorie :
 - Les tremblements quand ils entravent le bon déroulement de l'action
 - Les fautes ou manques de stratégie quand ils sont invalidants (par exemple, essayer désespérément d'attraper avec l'instrument droit l'aiguille qui se trouve à l'extrémité gauche du champ visuel ; rester avec l'instrument non utilisé devant la caméra, ce qui bloque la vue sur l'instrument en action ; les collisions avec les anneaux qui sont dans l'environnement et qui constituent des obstacles à contourner...)
 - Les mauvaises orientations des instruments et de l'aiguille, ce qui rend impossible son passage dans l'anneau (par exemple, croiser les instruments, cogner les instruments...)
 - Les mouvements antagonistes des deux instruments lors du passage de l'aiguille de l'un à l'autre (par exemple, le sujet ne lâche pas l'aiguille d'un côté et la tire de l'autre)
 - Les déplacements inadéquats ou maladroits de la caméra (si le sujet ne bouge pas la caméra de façon uniforme avec les deux mains, le plan ne correspond plus au plan horizontal sur lequel le sujet agit, ce qui désoriente l'image et empêche une perception correcte de la profondeur, Rock, 2001, p.83)
 - Les erreurs dans l'utilisation des pédales du système robotique (par exemple, le sujet appuie sur la pédale *clutch* ou *focus* au lieu de la pédale caméra)
 - Les gestes d'une trop grande brutalité

⁹¹ Ce qui peut s'avérer très problématique lorsque l'aiguille saute ainsi dans le corps humain.

- Sortie du champ visuel : lorsque les instruments ne sont plus dans le champ visuel du sujet⁹². La prise en compte de ce type d'erreur a une valeur écologique importante quand on sait que les instruments « traumatiques » utilisés en laparoscopie⁹³ peuvent endommager des organes qui se situent en dehors du champ visuel (Cadière & Leroy, 1999).

Nous avons également pris des mesures afin d'évaluer l'impact des dimensions instrumentale (robot - laparoscopie classique) et perceptives (2D-3D) sur le caractère ambidextre des performances. La consigne spécifiait très clairement que l'aiguille ne devait pas tomber et que la stratégie consistait donc à passer l'aiguille d'un instrument à l'autre (et donc à se servir des deux mains). Deux aspects de performance ambidextre ont été évalués et mesurés :

- Nombre de passages d'un instrument à l'autre : celui-ci correspond au nombre de fois que l'aiguille est passée d'un instrument à l'autre que ce soit pour la réceptionner après le passage dans un anneau ou pour la repositionner plus adéquatement à l'aide de l'autre instrument.
- Taux d'utilisation des deux mains lors de l'introduction de l'aiguille dans l'anneau : par ce taux, nous évaluons si le sujet utilise préférentiellement, majoritairement sa main dominante ou au contraire sa main non dominante, ou encore s'il utilise les deux mains avec la même fréquence lorsqu'il introduit l'aiguille dans l'anneau. Ce rapport est obtenu à partir de la formule suivante : soustraction du nombre d'anneaux traversés avec la main dominante et du nombre d'anneaux traversés avec la main non dominante, le tout divisé par le nombre total d'anneaux traversés ($D-ND/n$). Dans cette formule, si l'aiguille a été introduite dans tous les anneaux avec la main dominante, $D=n$ et $ND=0$, le rapport vaut alors 1. Dans le cas contraire, si tous les anneaux ont été traversés à l'aide de la main non dominante, $D=0$ et $n=ND$, le rapport vaut -1. Enfin, si les deux mains sont utilisées à une fréquence équivalente, le rapport sera proche de 0. En résumé, une utilisation plus fréquente de la main dominante produira un rapport proche de 1 ; dans le cas d'une utilisation plus fréquente de la main non dominante, le rapport se rapprochera de -1 et dans le cas d'une performance parfaitement ambidextre, le rapport sera de 0.

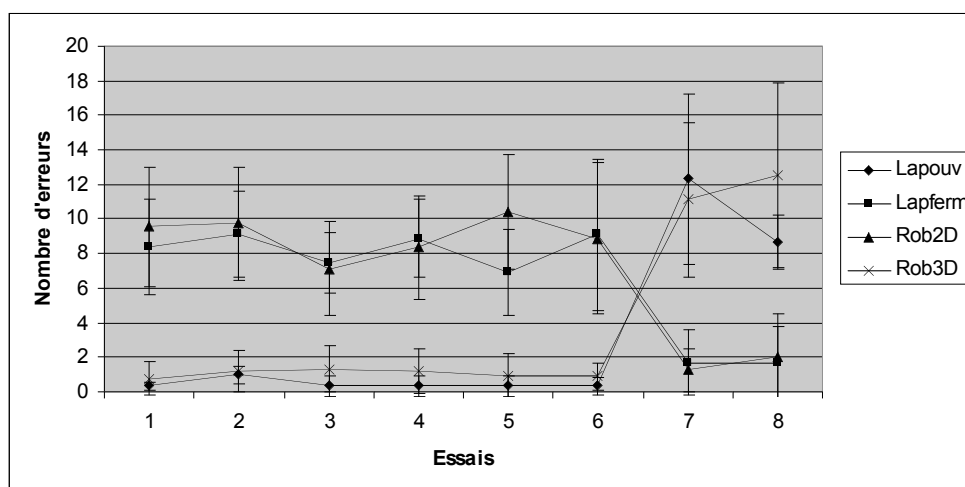
⁹² La consigne précisait explicitement que les instruments devaient rester dans le champ de vision du sujet. Ce critère était spécifique aux conditions utilisant une caméra et n'était donc pas étudié en laparoscopie ouverte puisque dans cette condition expérimentale, le sujet percevait l'entièreté du champ.

⁹³ Par opposition au doigt "atraumatique" utilisé en chirurgie classique ouverte.

3 RÉSULTATS

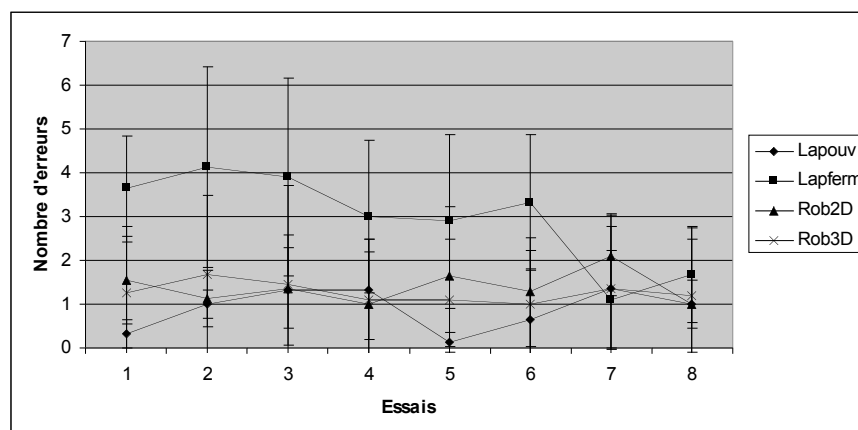
1. Courbes d'apprentissage

Concernant les erreurs liées à l'estimation des distances, seul un effet des conditions est mis en évidence par les analyses ($F=22.44$, $p<0.0000$, voir graphique 1) avec un nombre significativement beaucoup plus élevé d'erreurs en 2D qu'avec la vision en 3D, quelle que soit la dimension instrumentale. En outre, cette différence n'évolue pas au cours des essais.



Graphique 1 : nombre d'erreurs de distance en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

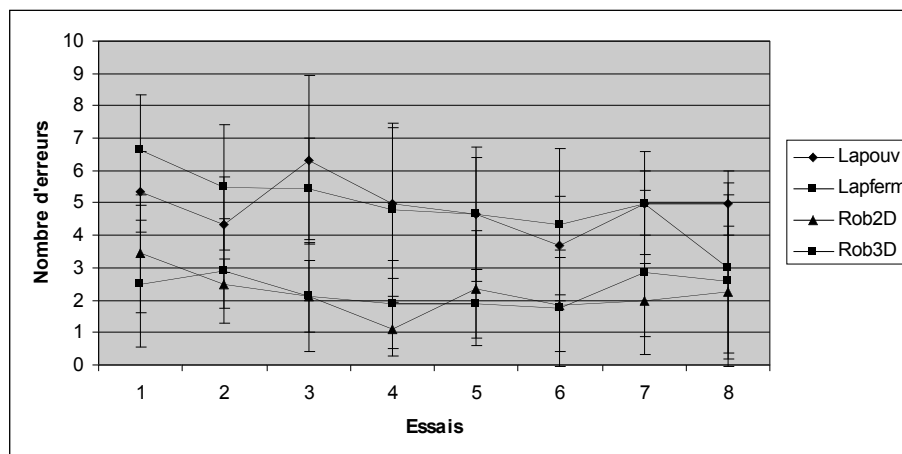
Concernant les tentatives de préhension de l'aiguille, de nouveau, seul un effet des conditions est mis en évidence avec un nombre plus élevé de tentatives de préhension en laparoscopie fermée que dans les autres conditions ($F=9.16$, $p<0.0005$, voir graphique 2).



Graphique 2 : nombre d'erreurs de préhension en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

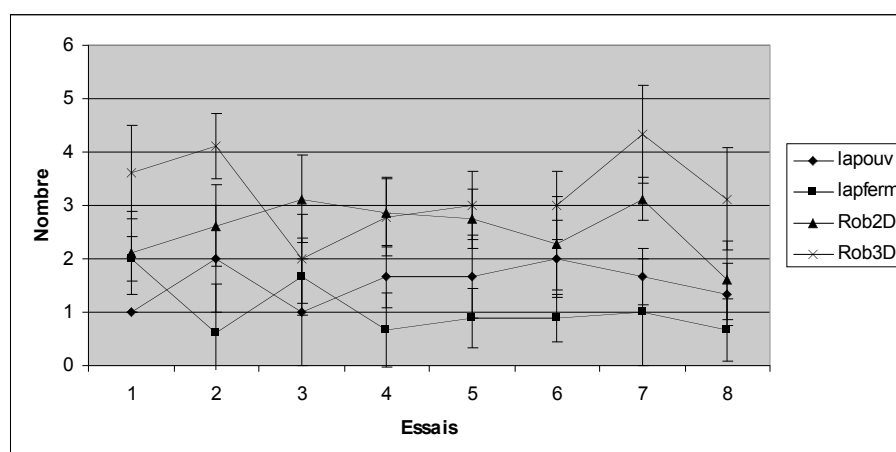
ETUDE 4

Concernant les erreurs de manipulation, nous observons un nombre significativement plus élevé d'erreurs en laparoscopie classique qu'avec le robot, quelle que soit la dimension visuelle ($F= 5.75, p<0.005$, voir graphique 3). Aucune évolution significative au cours des apprentissages n'est mise en évidence par les analyses.



Graphique 3 : nombre d'erreurs de manipulation en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

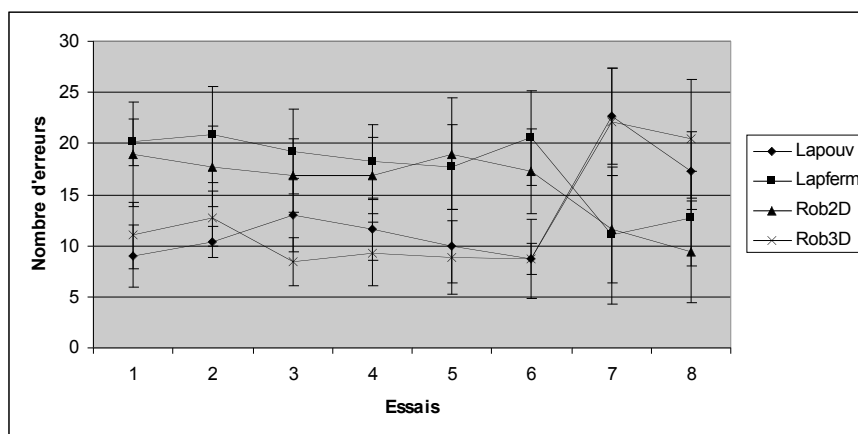
En ce qui concerne les aiguilles tombées, aucune différence n'est observée, que ce soit entre les conditions ou au cours des apprentissages. Par contre, pour les aiguilles qui sautent, nos analyses montrent un effet significatif de la condition ($F=4.89, p<0.01$, voir graphique 4), avec un nombre significativement plus élevé d'erreurs avec le robot (particulièrement en 3D) qu'avec la laparoscopie fermée.



Graphique 4 : nombre de fois que l'aiguille saute en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

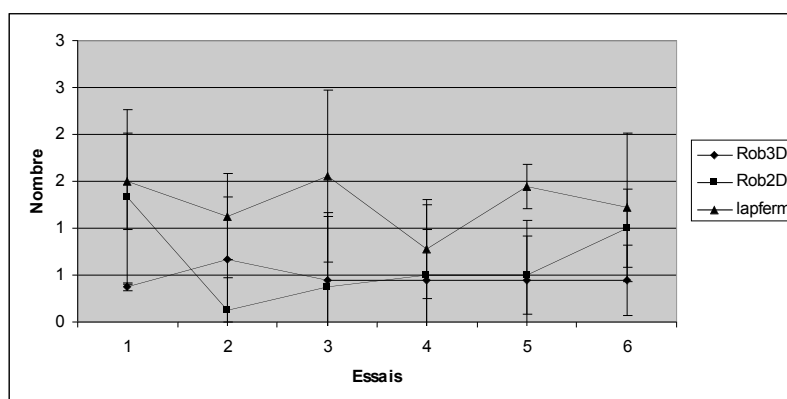
ETUDE 4

De façon générale, quand nous additionnons tous les types d'erreurs, la tendance met en évidence un effet général significatif des conditions ($F=15.83$, $p<0.00001$, voir graphique 5), le nombre total d'erreurs étant significativement plus important en 2D qu'avec une vision 3D, quelle que soit la dimension instrumentale.



Graphique 5 : nombre total d'erreurs en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

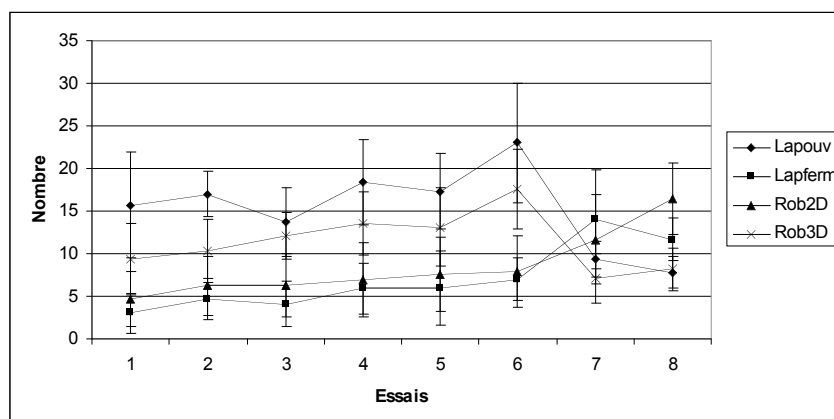
L'analyse appliquée aux données concernant les sorties du champ visuel met en évidence un effet principal de la condition avec des sorties du champ plus fréquentes en laparoscopie classique (fermée⁹⁴) qu'avec le système robotique (2D et 3D, $F=5.01$, $p<0.01$, graphique 6).



Graphique 6 : nombre de sorties du champ visuel en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6)

⁹⁴ L'analyse n'a pas été appliquée à la condition de la laparoscopie ouverte puisque dans cette condition, le sujet n'utilisait pas la caméra et bénéficiait d'une vue complète du champ.

Enfin, au niveau du caractère ambidextre de la performance, nos analyses mettent en évidence que les sujets se montrent plus volontiers ambidextres en 3D qu'en 2D, quelle que soit la dimension instrumentale⁹⁵ ($F=16.06$, $p<0.0000$, voir graphique 7), quant au nombre de passage d'un instrument à l'autre. Cette habileté s'améliore significativement au cours des apprentissages ($F=9.7$, $p<0.0000$), mais l'effet d'interaction significatif ($F=3.56$, $p<0.05$) précise que cette évolution positive ne concerne que les sujets qui bénéficient d'une vue en trois dimensions.

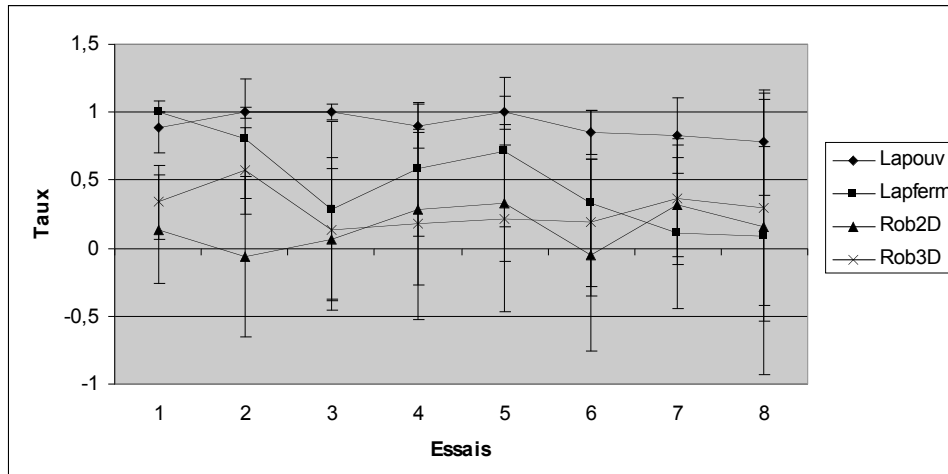


Graphique 7 : nombre de passages d'aiguille entre les deux instruments en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

Si l'on se penche sur le taux d'utilisation de chacune des mains lors de l'introduction de l'aiguille dans l'anneau ($D-ND/n$), nous obtenons un effet principal de la condition ($F=6.57$, $p<0.01$, voir graphique 8) : les sujets utilisent plus souvent la main dominante en laparoscopie classique ouverte, tandis qu'ils utilisent en alternance les deux mains avec le système robotique, quelle que soit la dimension visuelle. La plupart des taux se situent au-dessus de 0 ; les sujets utilisent donc majoritairement leur main dominante.

⁹⁵ Aux deux premiers essais, nous obtenons également une différence entre le robot en 3D et la laparoscopie ouverte, en faveur de cette dernière. À partir du troisième essai, ces deux conditions ne diffèrent plus.

ETUDE 4



Graphique 8 : taux d'utilisation des deux mains pour introduire l'aiguille dans l'anneau en fonction des conditions au cours de la phase d'apprentissage (essais 1 à 6) et après le transfert perceptif (essais 7 et 8)

Une dernière analyse met en évidence des corrélations significatives entre les scores de performance (étude 3) et d'une part, les erreurs (particulièrement pour les erreurs de distances, de tentative et pour le total d'erreurs) et d'autre part, le caractère ambidextre de la performance (voir table 1).

Table 1 : Corrélations entre le score et la précision (type d'erreurs et ambidextérité) pour chaque essai

	<i>distance</i>	<i>manipulation</i>	<i>tentative</i>	<i>tombe</i>	<i>saute</i>	<i>Total erreurs</i>	<i>ambidextre</i>
Trial 1	-,4466*	-,1107	-,3796*	,1859	,0603	-,5279**	,8464***
Trial 2	-,4733*	-,0911	-,3356	-,0950	,2396	-,4794*	,7259***
Trial 3	-,6044**	-,0328	-,4848*	-,1701	-,2260	-,6467***	,8181***
Trial 4	-,5962**	-,3187	-,2933	,0651	,0568	-,6773***	,8605***
Trial 5	-,5377**	-,5539**	-,3573	-,1817	,2387	-,6794***	,8432***
Trial 6	-,5968**	-,4530*	-,4660*	-,2223	,4369*	-,6667***	,8767***
Trial 7	-,5482*	,2335	-,5127*	-,2990	-,3795	-,6749***	,8125***
Trial 8	-,6572**	,0254	,0373	-,0543	-,5192*	-,7616***	,8507***
Trial 9	-,6039**	-,4995*	-,4810*	-,2438	,0687	-,7427***	,7949***
Trial 10	-,6789**	-,1734	-,3197	,2115	,2718	-,6175**	,8077***
Trial 11	-,6715*	-,4800	-,6396*	,1400	,6837*	-,7067*	,7456**

* p<0.05; ** p<0.005; ***p<0.0005

2. Transfert perceptif

Après le transfert perceptif, les performances des sujets s'inversent : le changement de dimension 2D versus 3D provoque une amélioration/détérioration significative des performances au niveau des erreurs de distance ($F=27.78$, $p<0.000001$, voir graphique 1), des tentatives ($F=3.36$, $p<0.05$, voir graphique 2), du total d'erreurs ($F=52.07$,

$p < 0.0000$, voir graphique 5) et du caractère ambidextre des performances ($F=13.74$, $p < 0.0001$, voir graphique 7). Nous n'observons pas de changement au niveau des erreurs de manipulation, ce qui est assez logique puisque ce type d'erreurs semblait surtout dépendre, dans la première phase, de la technique utilisée qui ne change pas dans cette étape.

A chacun des essais qui composent cette phase, nous obtenons un effet de la condition uniquement sur les erreurs de distance ($F=9.7$, $p < 0.001$, voir graphique 1), leur nombre étant significativement plus élevé en 2D qu'en 3D quelle que soit la technique utilisée, sur les aiguilles qui sautent ($F=4.49$, $p < 0.5$, voir graphique 4) et sur le caractère ambidextre de la performance ($F=5.3$, $p < 0.05$, voir graphique 7), les sujets étant plus ambidextres lorsqu'ils utilisent le robot en 3D. Entre les essais 7 et 8, aucune évolution n'est mise en évidence.

3. Transfert technique

Après le transfert technique, les différences de performance entre les techniques restent identiques à celles observées dans les deux phases précédentes. Nous obtenons un effet de la condition :

- pour les erreurs de distance ($F=16.94$, $p < 0.00005$) : nous obtenons un nombre significativement plus élevé d'erreurs en 2D qu'en 3D, quelle que soit la technique utilisée,
- pour les erreurs de manipulation ($F=7.42$, $p < 0.005$) : nous obtenons un nombre d'erreurs plus élevé en laparoscopie classique qu'avec le robot, quelle que soit la dimension visuelle,
- pour le caractère ambidextre de la performance ($F=13.87$, $p < 0.0001$) : celui-ci est plus prononcé pour les sujets en 3D que pour ceux qui agissent à partir d'une image en 2D, quelle que soit la technique utilisée.

Aucun effet d'apprentissage n'est mis en évidence au cours des trois essais réalisés après le transfert technique.

4 DISCUSSION

4.1 Evolution des performances

L'ensemble de ces résultats peut nous interpeller particulièrement par l'absence d'évolution dans le nombre d'erreurs : celui-ci reste constant malgré l'effet d'apprentissage mis précédemment en évidence : le nombre d'anneaux traversés

augmentait en effet au fil des essais (étude 3). Cette constatation générale pourrait être un élément qui confirmerait la thèse de Smith et al. (2001) selon laquelle la courbe d'apprentissage de la précision serait plus lente que la courbe d'apprentissage se rapportant à la vitesse d'exécution. Il nous faut toutefois nuancer la contribution de nos données à cette conclusion en approfondissant notre comparaison du nombre d'anneaux traversés en la mettant en relation avec le nombre d'erreurs commises. Comme nos résultats le précisent, les erreurs sont le plus souvent l'apanage de la vue en 2 dimensions (quel que soit l'aspect instrumental) et c'est particulièrement à ce niveau qu'aucune amélioration n'est mise en évidence. En superposant les deux types de données (nombre d'erreurs et nombre d'anneaux traversés), on peut remarquer que si le nombre d'erreurs ne diminue pas au fil des essais lorsque les sujets ont une vue en 2D du site, le nombre d'anneaux traversés n'augmente pas non plus ou peu par rapport aux sujets qui ont une vue 3D du site (et cela d'autant plus lorsque les sujets opèrent en laparoscopie classique, les problèmes de manipulation étant renforcés). Nous pouvons donc conclure de l'observation des erreurs que nous avons relevées qu'il y aurait un lien entre, d'un côté, la qualité et la précision du geste et de l'autre, le nombre d'anneaux traités.

En outre, si l'on considère le caractère ambidextre de la performance comme un critère de qualité, il est intéressant de souligner que celui-ci croît significativement au fil des essais lorsque les sujets sont en 3D de la même façon que le nombre d'anneaux traversés devient de plus en plus important, alors qu'aucun de ces deux paramètres n'évolue en vision 2D (quelle que soit la dimension instrumentale). Cette constatation permet de relier une fois de plus les aspects qualitatifs de la performance avec le nombre d'anneaux traités.

Enfin, les corrélations significatives que nous obtenons entre les erreurs, le caractère ambidextre et le nombre d'anneaux traversés mettent également en évidence le lien qui existe entre le nombre d'anneaux traités et la précision et qualité de la performance à cette épreuve.

Ces trois aspects renforcent les qualités que nous avons déjà soulignées dans les études précédentes concernant cette tâche des anneaux. Elle semble en effet constituer une tâche adéquate pour entraîner ou évaluer les habiletés, particulièrement avec le système robotique. En matière d'entraînement, elle est peut-être trop complexe pour des sujets novices qui débute en laparoscopie classique.

Au niveau de l'analyse de l'évolution des habiletés, une des limites de notre étude est que nous avons déterminé d'emblée un nombre d'essais fixe⁹⁶ et que nous n'avons pas observé de plateau au bout des six essais. Il est fort probable qu'au-delà du sixième

⁹⁶ En nous basant notamment sur les résultats de la courbe d'apprentissage de l'étude 1 ainsi que sur la littérature dans le domaine (Prasad et al., 2002, Shah et al., 2003).

essai, les performances des sujets s'améliorent en vision 2D. En outre, plusieurs études ont montré l'existence d'une phase intermédiaire correspondant à une période de consolidation de la routine motrice, après une période de latence de plus de 6 heures après la première session d'entraînement et cela, sans pratique supplémentaire (Doyon et al., 2003 ; Karni et Sagi, 1993). D'autres études mettent également en évidence le rôle du sommeil sur la consolidation des apprentissages particulièrement sur le plan procédural (Peigneux et al., 2004 ; pour une revue, Walker & Stickgold, 2004). Si nous avons pu revoir les sujets dans les jours qui ont suivi cette séance, nous aurions peut-être observé une amélioration. Cependant, dans le contexte hospitalier de notre étude, il n'a pas été possible d'aménager un dispositif expérimental de cette ampleur (allonger la séance d'apprentissage⁹⁷ ou revoir les sujets dans les jours qui suivent).

4.2 Les deux composantes du mouvement

Nos données montrent que les erreurs lors du mouvement d'approche sont plus nombreuses en vision 2D qu'en vision 3D, quel que soit l'aspect instrumental. Il semble donc que dans les tâches de chirurgie, ce mouvement dépende fortement de la perception de la profondeur et que la perte des indices visuels binoculaires ait une forte incidence sur sa qualité, indépendamment de l'instrument utilisé. Cette constatation rejoint les données de la littérature concernant cette composante du mouvement, qui se base essentiellement sur la distance égocentrique pour atteindre une cible et qui dépend donc fortement de la perception de la profondeur (Loftus et al., 2004 ; Servos, 2000 ; Watt & Bradshaw, 2000).

Concernant le mouvement de préhension, nos résultats mettent en évidence une intervention combinée des deux aspects perceptifs et instrumentaux : il semble que c'est à la fois la vision en 2 dimensions et les difficultés instrumentales qui sont à l'origine de ce type d'erreurs plus nombreuses en laparoscopie classique fermée.

4.3 Les erreurs de manipulation

Nos résultats mettent en évidence que les erreurs de manipulation sont principalement expliquées par la dimension instrumentale : ce type d'erreurs est en effet relevé en plus grand nombre en laparoscopie qu'avec le système robotique et cela, quelle que soit la dimension visuelle. Ces résultats témoignent de l'impact des difficultés instrumentales inhérentes à la laparoscopie classique chez des sujets novices. Ces dernières sont

⁹⁷ Nos observations montrent également des signes de fatigue chez certains sujets au bout des six essais, allonger la séance n'aurait donc peut-être pas eu l'effet escompté d'améliorer la performance.

palliées par les avancées technologiques du robot (tremblement physiologique filtré, précision et dextérité accrues, réduction automatique de l'amplitude des mouvements), qui apportent un bénéfice considérable à la performance de sujets novices. L'absence d'amélioration au niveau de ces erreurs en laparoscopie témoigne de la difficulté pour les novices de surmonter cet obstacle.

Les difficultés de manipulation, présentes en très grand nombre après le transfert technique, soulignent le risque qui existe lors du passage d'une technique avancée et intuitive (le système robotique) vers une technique qui exige de grandes habiletés motrices.

Un problème de manipulation dû au manque de retour de force est toutefois mis en évidence avec le robot par rapport à la laparoscopie : nous observons en effet une pression trop importante dans le geste de préhension de l'aiguille avec le système robotique (illustré par le nombre de sauts de l'aiguille plus élevé avec le robot qu'en laparoscopie classique).

4.4 Utilité des erreurs de distance dans la perception de la profondeur

Les erreurs dites de « distance » ou erreurs dans le mouvement d'approche sont celles qui apparaissent avec la plus grande fréquence et qui persistent en grand nombre au fil des essais lorsque les sujets ont une vue en 2 dimensions (quel que soit l'instrument utilisé). Notre analyse des performances nous suggère cependant que le qualificatif d'erreurs n'est peut-être pas le plus adéquat pour définir ce type de comportement. En effet, il reflèterait plutôt une stratégie imposée par les conditions visuelles et adoptée par les sujets pour contrôler et corriger leur geste en temps réel. Les erreurs de distance s'apparenteraient ainsi aux ajustements en temps réel, spécifiques à la vision monoculaire, qui sont rapportés dans la littérature (Marotta et al., 1994, 1998 ; Servos & Goodale, 1994).

Ces erreurs de distance produiraient en réalité des indices monoculaires de perception de la profondeur puissants : les indices picturaux de recouvrement, la taille relative de l'aiguille par rapport à l'anneau dans la perspective, le geste de préhension dans le vide sont des feedbacks visuels directs renvoyés au sujet quant au déroulement de son action de préhension ou d'introduction de l'aiguille dans un anneau. Plusieurs études ont en effet montré que les indices picturaux étaient prioritairement utilisés par le système visuo-moteur lorsque les indices binoculaires n'étaient pas disponibles (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1997 ; Kruyer et al., 1997). Ces indices ne sont toutefois pas très efficaces (comme le démontre d'ailleurs notre étude) et ils procurent une information de meilleure qualité s'ils sont combinés à d'autres indices plutôt que pris isolément (Bruce et al., 2003 ; Landy et al., 1995). Par exemple, l'occlusion ne permet

pas d'estimer la profondeur en soi, mais constitue plutôt un indice ordinal de profondeur, c'est-à-dire qu'elle établit un « ordre » de profondeur entre plusieurs objets. Cet indice est dès lors utilisé de façon plus efficiente lorsqu'il est combiné à d'autres pour en diminuer l'ambiguïté que lorsqu'il est pris isolément (Bruce et al., 2003 ; Landy et al., 1995). En outre, l'utilisation adéquate de ces indices requiert un apprentissage et une pratique considérables, qui ne peuvent s'acquérir en une seule séance (Marotta & Goodale, 1998 ; Marotta et al., 1997). Enfin, plusieurs études insistent sur le caractère lent et la nécessité de plusieurs séances d'entraînement dans les processus d'acquisition des habiletés motrices fines (Hernandez et al., 2004 ; Doyon et al., 2003 ; Karni, 1996).

5 CONCLUSION

L'absence d'évolution que nous observons au niveau des erreurs de distance témoigne de la difficulté d'intégrer les indices monoculaires de façon efficiente lors de l'exécution d'une action fine et de leur utilisation quasi explicite dans le contrôle de l'action en vision monoculaire ; c'est par le résultat de son action que le sujet perçoit la profondeur et corrige, en temps réel, son mouvement d'approche. L'action a donc un effet direct sur la perception, en lui procurant des indices visuels qui ne sont habituellement pas utilisés (ou de façon non prépondérante) lors des interactions avec l'environnement en vision 3D. Cette stratégie, imposée par les conditions visuelles en 2D, exige l'intervention de processus plus contrôlés et augmente ainsi la charge mentale. Cette surcharge mentale ne permet pas l'amélioration des autres aspects de l'action tels que le caractère ambidextre qui n'évolue pas ou peu lorsque les sujets ont une vision en 2D, quel que soit l'aspect instrumental, alors que l'amélioration est très positive au fil des essais en 3D.

Si les erreurs de distance permettent une différenciation au niveau perceptif, les erreurs de manipulation s'expliquent, quant à elles, par la dimension instrumentale : la laparoscopie classique utilise des instruments plus complexes et moins intuitifs que le système robotique et crée ainsi des difficultés de manipulation que les sujets novices ne parviennent pas à surmonter lors d'une seule séance d'entraînement dans une tâche complexe.

6 ANNEXE : CAS PARTICULIER DE LA LAPAROSCOPIE CLASSIQUE EN VUE DIRECTE

La taille du champ visuel et les mécanismes d'anticipation et de planification de l'action

Une note spécifique concernant cette condition expérimentale nous semble nécessaire afin de préciser certaines de ses particularités. Cette condition complètement artificielle a été créée dans une perspective exclusivement théorique afin de compléter notre plan expérimental qui différenciait les dimensions perceptives et instrumentales. L'objectif de son insertion était d'étudier l'apport de la vision 3D dans les conditions instrumentales de la laparoscopie classique. Nous montrons que cette condition produit des performances exceptionnellement bonnes et parfois même meilleures qu'avec le robot en 3D qui apporte pourtant des facilités au niveau des mouvements par rapport à la laparoscopie classique. Elle présente cependant deux particularités, autres que la vision 3D, qui méritent d'être mentionnées car elles peuvent intervenir dans l'explication de certains résultats.

Tout d'abord, outre le recouvrement de la vision binoculaire, la laparoscopie en vision directe permet la suppression de l'effet miroir et restaure l'axe œil-main qui est rompu dans la laparoscopie classique, ce qui la rapproche de la position *ergonomique* dont bénéficient les sujets avec le système robotique. Le second aspect lui est totalement propre : la laparoscopie en vision directe est en effet la seule condition dans laquelle les sujets voyaient tout le champ opératoire, pouvant déplacer leur regard afin de visualiser l'entièreté du champ sans en avoir une vision parcellaire, ni devoir manipuler ou demander le déplacement de la caméra. Cette vision intégrale du champ opératoire constitue un élément d'une importance considérable : cette représentation complète du parcours à réaliser permettait en effet aux sujets de visualiser la disposition des anneaux et de planifier à l'avance leur action (direction des mouvements, orientation de l'aiguille...). Le mécanisme d'anticipation est une composante extrêmement importante et déterminante de nos interactions avec l'environnement. Quand nous nous dirigeons vers un objet, notre orientation dans l'espace ainsi que la posture de la main anticipent les caractéristiques de l'objet (taille, forme, orientation) bien avant que le contact ne soit établi (Servos, 2000). La nature du mouvement dépend en effet largement du programme initial qui est conçu avant le mouvement (Servos & Goodale, 1994 ; Jakobson & Goodale, 1991), même s'il peut y avoir des changements ou des corrections au cours du mouvement.

Ces mécanismes d'anticipation et de planification qui sont à l'œuvre en laparoscopie ouverte avec vue directe, constitueraient un avantage qui dépasserait l'apport instrumental fourni par le robot, soulignant ainsi leur importance fondamentale pour l'action, même en vision 3D. Cette remarque rejoint la suggestion de Verwey et al. (2005) qui proposent que, puisque la taille du champ influence les habiletés en laparoscopie, l'apprentissage de cette technique devrait prendre en compte des environnements de tailles différentes afin d'entraîner toutes les sortes d'habiletés.

L'ensemble de ces caractéristiques (restauration de l'axe œil-main, vue intégrale du champ, mécanisme d'anticipation) intègre donc des différences autres que la seule distinction 2D-3D entre la condition de laparoscopie en vision directe et celle de laparoscopie classique (avec vue indirecte par écran), dont il faut également tenir compte dans nos analyses.

ETUDE 5

ETUDES DE TERRAIN

Impact des images en 2D et 3D sur les stratégies opératoires en situation réelle

1 INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre de notre partie expérimentale, notre objectif est d'utiliser un type d'approche différent en élargissant nos recherches sur le traitement des images en 2D et 3D en « situant » les individus et acteurs dans l'ensemble des pratiques qui constituent leur activité quotidienne. Plus concrètement, dans ce chapitre, nous étudions à partir des communications récoltées sur le terrain, l'impact des images en 2D et 3D sur les stratégies opératoires et les activités de coopération et cela, en fonction de l'expertise des sujets dans ce domaine.

La question à laquelle nous voulons répondre est la suivante : dans un environnement hautement complexe et réel au niveau individuel, mais aussi au niveau de la cognition distribuée⁹⁸, quel impact les images en 2D et 3D ont-elles sur l'ensemble des acteurs et sur les stratégies de décision et de coopération ?

La raison d'investiguer la dimension collective de la chirurgie à travers l'analyse des communications est triple.

Tout d'abord, dans le contexte particulier des interventions réalisées avec le robot chirurgical, le chirurgien assis à la console ne voit plus le reste de l'équipe et particulièrement le chirurgien qui l'assiste (et qui se trouve auprès du patient, voir fig. 1 et 2). Cette configuration spatiale les contraint dès lors à utiliser exclusivement la communication verbale, unique canal disponible pour construire et travailler à partir de référents communs. Dans cet environnement, nous ne sommes pas encore à proprement parler dans une communication à distance, puisque tous les acteurs se trouvent dans la même pièce, mais l'absence de contact visuel entre les acteurs et les référents différents à partir desquels ils agissent constituent des éléments caractéristiques des situations de travail à distance⁹⁹. Plus aucun protagoniste n'a de vue globale de la situation, particulièrement le chirurgien assis à la console qui ne voit plus du tout la salle d'opération, ni les autres membres de son équipe. Cette situation peut mener à des distorsions dans la représentation de la situation commune, appelée aussi « conscience de la situation¹⁰⁰ » (Nyssen, 2004, 2001, 2000).

⁹⁸ La cognition distribuée constitue une dimension d'étude selon laquelle des connaissances, souvent différentes, sont partagées par un ensemble d'individus qui coopèrent dans un système (Hutchins, 1995).

⁹⁹ D'autres éléments caractéristiques de la communication ou coopération à distance ne sont pas présents, comme par exemple, le délai.

¹⁰⁰ La conscience de la situation peut être définie comme étant la perception des éléments de l'environnement dans un volume d'espace et de temps, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche (Endsley, 1995).

Deuxièmement, l'analyse des communications dans le travail est aussi motivée par le fait que la communication est une trace de l'activité qui rend compte de la complexité des situations à traiter et qui permet d'approcher l'activité cognitive de l'individu en situation de travail (Grusenmeyer & Trognon, 1997 ; Falzon, 1994). La capacité des échanges verbaux à modifier et structurer les représentations des opérateurs est largement reconnue en psychologie du travail et en ergonomie : la forme des échanges verbaux, leur importance et leurs contenus sont indicatifs de l'existence de référents communs (« grounding », Grusenmeyer & Trognon, 1997). Par l'étude des communications, nous chercherons à identifier ceux-ci.



Fig. 1 : Configuration de la salle d'opération en laparoscopie classique



Fig.2 : Configuration de la salle d'opération lors d'une intervention avec le système robotique

Enfin, l'expertise dans les environnements dynamiques et complexes n'est en général pas le fait d'une personne isolée. L'expertise possède en effet une composante sociale, les compétences se construisant, se manifestant et se modifiant dans un environnement

caractérisé par des interactions entre les sujets, des échanges verbaux et des prises de décision collectives (Navarro & Marchand, 1994).

La communication qui s'établit entre les protagonistes dans leur activité de coopération nous fournira donc des éléments d'analyse pour comprendre comment se construit et évolue la représentation de chacun. De façon plus spécifique, elle nous donnera des indices sur la façon dont les images en 2D et 3D sont traitées par les différents acteurs ainsi que l'influence qu'elles ont sur leurs actions et leur activité de coopération.

2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

L'intérêt général de ce travail étant porté sur le traitement des images en 2D et 3D et leur impact sur les représentations et les stratégies d'action, nous avons concentré nos analyses sur les communications échangées entre le chirurgien manipulant le robot, qui bénéficie d'une vision 3D du site qu'il opère, et le chirurgien assistant qui se trouve auprès du patient et qui doit agir à partir d'une vision en 2D. Les communications relevées lors de l'installation du robot et en dehors de l'utilisation directe de celui-ci ne feront pas ici l'objet d'analyses car elles concernent principalement des aspects organisationnels qui, bien qu'ils soient loin d'être insignifiants, s'éloignent des objectifs de notre thèse. En outre, des études antérieures ont montré que c'était lors de l'intervention elle-même que les communications étaient les plus nombreuses et que leur analyse apportait une réelle contribution à la compréhension des processus d'interaction mis en place par les acteurs lors de l'utilisation du robot chirurgical, les communications antérieures et postérieures à l'intervention n'étant pas spécifiques à la technologie utilisée (Degueldre et al., 2000).

Dans ce cadre, nous avons analysé les communications de 32 opérations avec le robot chirurgical. Les interventions relevaient de trois spécialités : chirurgie gynécologique (reperméabilisation tubaire, n=18), urologique (prostatectomie, n=8) et digestive (cholécystectomie, n=6).

Nos analyses se sont centrées sur deux problématiques particulières:

1. **Modifications provoquées par l'introduction de la chirurgie robotique** évaluées par une comparaison laparoscopie classique - robot dans des opérations en chirurgie urologique et digestive (dans ces deux situations, les équipes et procédures opératoires sont exactement les mêmes, seule la technique utilisée change)

2. **Rôle de l'expertise** par une comparaison expert-novice dans les opérations en chirurgie gynécologique (notre échantillon le plus important qui nous a donné l'occasion d'observer des chirurgiens plus ou moins familiarisés à l'utilisation du robot et de la laparoscopie classique)

Les communications analysées revêtaient un aspect essentiellement fonctionnel, en ce sens qu'elles étaient centrées sur l'exécution de la tâche (Anderson & Boyle, 1994 ; Falzon, 1994). Lors de nos analyses, nous avons distingué six types de communications (reprises notamment de l'étude de Degueldre et al., 2000) :

- *Les communications d'orientation spatiale et de localisation.* Cette catégorie permet de mettre en évidence les problèmes d'orientation spatiale et de localisation provoqués par la vue indirecte reproduite par la caméra. Cette dernière est exclusivement déplacée par le chirurgien au robot, et l'assistant doit suivre la trajectoire et s'orienter à partir d'un écran avec une vue en 2D sans pouvoir contrôler les mouvements de caméra. Cette catégorie reprend les communications sur le traitement perceptif des informations visuelles afférentes (perception des distances, de la profondeur, par exemple « coupe plus court, plus près, avance plus loin », l'orientation spatiale, par exemple « passe au-dessus de ma pince, en dessous de la trompe », la reconnaissance des organes). Cette catégorie fait référence à la dimension perceptive que nous avons identifiée dans notre méthodologie générale.
- *Les communications axées sur les manipulations* des instruments et des organes. Si le chirurgien assistant ne bénéficie que d'une vue en 2D, le chirurgien au robot doit agir en l'absence complète du retour tactile et ne ressent plus la force de préhension des instruments, ni la force qu'il met en œuvre pour serrer un nœud. Par ailleurs, le chirurgien assistant doit réaliser ses actes à l'aide d'instruments qui possèdent un nombre très limité de mouvements. Les communications de cette catégorie mettent en évidence les problèmes liés au geste lui-même et donc aux facteurs efférents (« ouvre ta pince, ferme-là maintenant, serre un peu plus le fil, tourne ton instrument dans l'autre sens »). Cette catégorie renvoie à la dimension instrumentale décrite dans notre plan expérimental général.
- *Les communications relatives à des stratégies opératoires* ou des choix de procédures (planification des procédures, par exemple « donne-moi un fil assez long comme ça, je fais plusieurs nœuds », « il faudrait commencer par la trompe gauche »).

- Les demandes relatives à des actions à entreprendre, telles qu'un ordre donné à un membre du staff (par exemple, « peut-on changer les instruments du robot ? injecter du bleu, s'il vous plait ? »). Degueldre et al. (2000) ont montré que cette catégorie était indispensable au bon déroulement de l'intervention et qu'elle témoignait, par sa présence constante, du rôle central du chirurgien qui manipule le robot, étant l'acteur principal mais aussi le seul à bénéficier d'une vision en réalité augmentée.
- Les confirmations, vu les conditions particulières dans lesquelles les acteurs évoluent et interagissent, il nous a semblé essentiel d'ajouter cette catégorie aux types de communication identifiés par Degueldre et al. (2000). En effet, les protagonistes ne se voient pas et les confirmations leur permettent de s'assurer que leur collègue a entendu et compris l'objet de la communication. Cette catégorie représente une garantie construire un référent d'action commun et augmenter ou conserver une conscience de la situation identique pour tous les sujets.
- Les communications de relâchement en différenciant celles qui expriment le stress et l'énervement de celles qui impliquent l'humour et la détente. Cette catégorie permet de mettre en lumière la dimension humaine et affective qui est présente tout au long des opérations et qui influence les interactions entre les protagonistes.

3 PREMIÈRE ÉTUDE DE TERRAIN

Changements opérés par l'utilisation d'une nouvelle technologie : introduction de la chirurgie robotique au sein d'une équipe habituée à la laparoscopie classique

L'objectif de cette étude était d'analyser les changements provoqués par l'introduction du robot dans les salles d'opération, par rapport à la laparoscopie classiquement utilisée. Ces changements ont été étudiés à partir des communications échangées entre les protagonistes. Notte et al. (2000), qui ont réalisé une première évaluation ergonomique comparant le robot avec la laparoscopie classique, mettaient en évidence que l'introduction de cette nouvelle technologie entraînait l'apparition de nouvelles contraintes ainsi que des modifications dans la nature des activités et l'organisation du travail de l'équipe.

3.1 Méthodologie

Nous avons analysé des opérations tout à fait identiques au niveau de la procédure et des membres de l'équipe, qui ont été réalisées soit avec le robot, soit en laparoscopie classique : en chirurgie urologique (prostatectomie avec le robot, n=7 et en laparoscopie classique, n=4) et en chirurgie digestive (cholécystectomie avec le robot, n=5 et en laparoscopie classique, n=4).

Nos observations portent sur des équipes expertes en laparoscopie classique mais novices en chirurgie robotique. Il ne nous a en effet pas été possible d'observer des équipes expertes à la fois en chirurgie robotique et en laparoscopie classique pour le même type d'intervention et cela pour deux raisons majeures :

(1) Le robot commence seulement à être introduit dans ces deux types de chirurgie (urologique et digestive) ; l'utilisation de la laparoscopie classique y est implantée depuis longtemps et reste majoritairement pratiquée,

(2) Le robot est particulièrement utilisé dans les interventions qui ne peuvent être pratiquées par laparoscopie classique ou qui demandent une grande précision dans un champ opératoire très réduit (par exemple, en chirurgie cardiaque et gynécologique). Dans ces domaines, la chirurgie robotique apporte un tel avantage qu'elle devient l'unique procédure suivie, rendant irréalisable la

comparaison avec les procédures anciennes, qui en outre n'utilisaient pas nécessairement la laparoscopie classique.

Les communications ont été analysées selon les catégories détaillées dans la méthodologie générale de ce chapitre. Pour chaque catégorie, nous avons repris le nombre de communications enregistrées. Nous avons également calculé un ratio pour chacune de nos observations en fonction de la durée des opérations¹⁰¹, celle-ci pouvant influencer le nombre de communications. Les deux types de mesure nous semblent utiles. D'une part, il est logique de penser que la durée de l'opération influence le nombre de communications (une opération plus longue conduisant à un nombre plus élevé de communications), biais que le calcul du ratio supprime. D'autre part, la durée opératoire n'est pas déterminée, dans le cas présent, par un facteur externe (tel qu'un plan expérimental établi), elle est au contraire constitutive de la complexité de la situation dans laquelle évoluent les acteurs. Cette complexité est dès lors également représentée par le nombre (« brut ») de communications qui sont nécessaires aux acteurs pour travailler avec des référents communs. Cet argument nous semble justifier l'intérêt de garder également ce type de mesure.

Les comparaisons entre les communications avec le robot et celles obtenues en laparoscopie classique ont été éprouvées par le test U de Mann-Whitney.

3.2 *Résultats*

Nos résultats montrent que l'introduction du robot a un impact sur les communications dans les deux types d'opérations (voir tables 1 et 2). Tout d'abord, la durée de l'intervention est significativement plus longue lors des opérations avec le robot qu'en laparoscopie classique. Ensuite, le nombre de communications portant sur l'orientation, les manipulations, les stratégies et les confirmations est plus élevé lorsque les chirurgiens utilisent le robot que lorsqu'ils opèrent par laparoscopie classique. Ces tendances sont mises en évidence aussi bien en chirurgie digestive qu'en urologie et aussi bien à partir des données brutes que des ratios (excepté les communications portant sur les aspects de stratégie et les ordres pour la chirurgie digestive).

¹⁰¹ Ratio = nombre de communications/durée de l'opération (en secondes) x 100

Table 1 : nombre et ratio de communications en chirurgie digestive selon le type d'intervention

	<i>Orientation</i> *°	<i>Manipulations</i> *°	<i>Stratégies</i> *	<i>Ordres</i> °	<i>Confirmation</i> *°	<i>Détente</i>	<i>Stress</i>	<i>Durée</i> *
Robot	26.58±7.67	59.52±0.7	40.28±12.63	24.67±0.57	20.09±7.14	2.63±2.12	3.26±2.12	
<i>Ratio</i>	45.83±7.74	86.66±5.61	48.63±0.49	29.36±6.87	23.14±3.85	4.51±5.06	3.17±1.6	82.59±27.3
Laparoscopie classique	5.33±1.15	7.53±2.65	12.33±2.52	4.53±0.89	3.67±0.58	4.67±1.53	1.33±1.05	31.85±9.64
<i>Ratio</i>	18.91±8.25	22.28±1.48	41.93±13.49	15.76±2.82	12.27±2.65	16.73±6.25	4.36±4.18	

* différence significative à p<0.05 pour les données brutes (test U de Mann-Whitney)

° différence significative à p<0.05 pour les ratios (test U de Mann-Whitney)

Table 2 : nombre et ratio de communications en chirurgie urologique selon le type d'intervention

	<i>Orientation</i> *°	<i>Manipulations</i> *°	<i>Stratégies</i> *	<i>Ordres</i> *°	<i>Confirmation</i> *°	<i>Détente</i>	<i>Stress</i>	<i>Durée</i> *
Robot	103.67±8.62	79.33±28.73	35.17±3.46	41.67±9.13	30.67±0.58	12.12±2.12	11.67±4.29	
<i>Ratio</i>	48.9±11.8	35.33±3.23	16.36±3.24	19.49±8.36	14.46±3.39	4.93±1.12	5.08±2.31	221.39±58.79
Laparoscopie classique	22.03±3.61	19.67±4.04	11.67±3.51	10.67±3.78	4.26±2.06	6.33±2.52	1.67±0.52	95.74±11.53
<i>Ratio</i>	23.03±4.53	15.78±3.67	12.15±2.69	11.12±1.74	3.93±1.69	5.69±1.89	1.33±1.32	

* différence significative à p<0.05 pour les données brutes (test U de Mann-Whitney)

° différence significative à p<0.05 pour les ratios (test U de Mann-Whitney)

3.3 Discussion

L'introduction de la chirurgie robotique dans les procédures opératoires provoque un grand nombre de changements au sein du travail d'équipe, changements notamment mis en évidence antérieurement dans l'étude de Notte et al. (2000). L'analyse des communications que nous avons développée procure des données qui vont dans le même sens. Il est intéressant de souligner la portée générale de nos résultats qui montrent, au travers de l'analyse des communications, que ces changements s'opèrent de la même manière dans deux équipes distinctes, composées de membres différents et réalisant des interventions différentes. Les équipes observées étaient expertes en laparoscopie classique et avaient donc l'habitude d'opérer à partir d'une vision en 2 dimensions avec des instruments ayant peu de degrés de liberté. Il serait alors tentant d'attribuer l'augmentation des communications à la seule nouvelle situation du chirurgien installé au robot. Cependant, nos observations permettent d'approfondir cette analyse générale.

A partir des communications relatives à l'orientation, nos résultats montrent que si le chirurgien assistant est habitué à travailler, en laparoscopie classique, à partir d'une vue en 2 dimensions avec des instruments possédant peu de liberté de mouvements, il doit être guidé de façon plus précise dans son évaluation des distances et orienté dans

l'espace par le chirurgien au robot quand cette technique est utilisée (ce qui est montré par un nombre plus important de communications portant sur l'orientation spatiale). Dans ce cas, le chirurgien au robot guide et fait profiter le chirurgien assistant de la vue en 3 dimensions dont il bénéficie afin d'accroître la précision des gestes du chirurgien qui l'assiste. Cette stratégie permet en outre de compenser la perte de la communication non verbale habituellement développée en laparoscopie classique ainsi que la désorientation provoquée par les mouvements de caméra contrôlés par le seul chirurgien au robot.

Par rapport aux communications concernant la manipulation, leur nombre plus élevé lors de l'utilisation du robot témoigne de l'apprentissage que doit réaliser le chirurgien au robot pour exploiter tous les degrés de liberté de mouvements retrouvés avec le robot et pour contrer et inhiber les automatismes acquis avec l'expérience de la manipulation des instruments de laparoscopie classique plus rigides. Ce « ré-apprentissage » rend les aspects de manipulation plus conscients et contrôlés et s'exprime donc par la modalité verbale (qui avait disparu avec les automatismes acquis en laparoscopie classique). Cette étape fait référence au stade cognitif décrit dans le modèle d'Anderson (1985), tout en s'appuyant sur les connaissances déclaratives et procédurales antérieures (Sun et al., 2001 ; Rabardel, 1995).

Le second élément à maîtriser dans l'utilisation du robot est l'absence de retour de force et de contact tactile. Cette privation nécessite l'apprentissage d'un nouveau contrôle de l'action uniquement basé sur la perception visuelle, puisque le chirurgien ne ressent plus la force de préhension des instruments, ni la force investie quand il serre un nœud. Ce contrôle exclusif par la modalité visuelle modifie également l'activité diagnostique et l'identification des organes comme en témoigne l'exemple de dialogue suivant :

- C1 (chirurgien au robot) : « dis-moi si tu as un retour là, car je vois quelque chose de particulier »

- C2 (chirurgien assistant) : « oui, j'ai un retour tactile, c'est dur, c'est un os ». Cet exemple illustre que la perception visuelle seule, même en 3 dimensions, n'est pas toujours suffisante pour procéder à des diagnostics ou identification d'organes, la modalité tactile étant une composante nécessaire à ce type d'activité.

Les communications de stratégies sont plus nombreuses lors des interventions avec le robot mais elles ne diffèrent pas au niveau du ratio. Contrairement aux autres catégories de communication, il semblerait que celle-ci dépende de la durée de l'opération ; plus l'opération est longue, plus les communications portant sur la stratégie et la planification sont nombreuses. Les éléments de planification sont discutés en temps réel, leur nombre augmentant avec l'allongement de la durée opératoire.

Dans un autre registre, l'absence de différence au niveau des communications se rapportant au stress et à la détente suggère que les opérations avec le système robotique

ne génèrent pas de sentiment de stress particulier par rapport à la laparoscopie classique. Le stress est considéré comme étant un élément qui surgit dans les situations considérées comme complexes et difficilement maîtrisables (Hong, 1999 ; Amalberti, 1996). A ce niveau, l'absence de différence entre les deux techniques suggère que l'utilisation du robot n'est pas considérée comme plus complexe que la laparoscopie par les chirurgiens.

Enfin, les communications d'ordres et de confirmations, en nombre plus élevé, permettaient aux chirurgiens de s'assurer, dans une situation peu habituelle pour eux, qu'ils se comprenaient bien l'un l'autre et que les actions étaient bien exécutées tel qu'attendu, ce qui augmentait ainsi leur probabilité de travailler à partir d'un référent commun.

Nos conclusions comportent certaines limites. Les données sont à manipuler avec prudence vu la petite taille de l'échantillon observé. En outre, les équipes observées étaient expertes en laparoscopie classique et novices en laparoscopie robotique. Nos observations ainsi que l'étude de Degueldre et al. (2000) ont montré une importante diminution des communications avec l'expérience, ce qui devrait également être constaté à la longue au sein des deux équipes observées. Il serait intéressant d'analyser le fonctionnement d'une équipe experte utilisant les deux techniques, ce qui nous permettrait d'évaluer les modifications liées à l'introduction du robot sur le long terme. Cependant, ce type d'observations n'était pas possible sur le terrain que nous avons investigué.

4 SECONDE ÉTUDE DE TERRAIN : L'EXPERTISE EN CHIRURGIE ROBOTIQUE

4.1 *Description du contexte et de la procédure opératoire pour les reperméabilisations tubaires*

Cette intervention gynécologique consiste à retirer un clip placé, dans un but contraceptif, sur les trompes de Fallope et à suturer ensuite chacune des trompes afin de leur rendre leur perméabilité et de permettre ainsi à la patiente de recouvrer la fertilité. Ce type d'opération constitue un terrain idéal pour l'étude précise de notre propos. Tout d'abord, cette opération, dite de confort, se pratique sur des patientes saines et donc, hormis les particularités anatomiques, le degré de gravité de la pathologie n'intervient pas dans la durée opératoire. Ensuite, cette intervention se réalise dans un champ opératoire extrêmement ciblé avec une procédure qui comprend une série d'actions très précises toujours reproduites à l'identique et dans le même ordre, ce qui lui confère un caractère assez répétitif, nous permettant ainsi de comparer les opérations entre elles.

De manière plus détaillée, le chirurgien reproduit à deux reprises (pour chacune des trompes) une procédure identique qui comprend comme principales étapes : (1) la dissection autour du clip, la coupe et le retrait de celui-ci, (2) l'anastomose¹⁰² (suture des deux parties de la trompe), et (3) le test de perméabilité de la trompe (avec injection de bleu de méthylène) afin de vérifier la qualité de l'anastomose.

L'anastomose est le moment de l'intervention où les interactions de coopération entre le chirurgien au robot et le chirurgien qui l'assiste sont les plus importantes. Une étude antérieure a d'ailleurs mis en évidence que les pics de communication se concentraient à ce moment, illustrant ainsi la difficulté de s'organiser autour du robot sans se voir ni partager la même vision intracorporelle (Degueldre et al., 2000). Lors de cette étape, la présence du chirurgien assistant est un élément indispensable au bon déroulement de l'activité : en plus d'irriguer le site, il doit à plusieurs reprises passer les différents fils au chirurgien installé au robot et couper ceux-ci après chaque nœud. Le chirurgien assistant ne bénéficiant pas d'autant d'informations de nature visuelle que le chirurgien au robot : c'est ce dernier qui le guide afin que l'acte soit correctement exécuté. Nous avons donc centré nos analyses sur ce moment de coopération intense (l'anastomose) reflétée par une communication abondante, autour d'actions délicates à mener à partir de référents visuels et d'instruments différents. Celles-ci nous ont permis d'étudier précisément l'impact des images en 2D et 3D sur les stratégies d'actions dans une

¹⁰² Anastomose : abouchement chirurgical de deux conduits, canaux ou cavités.

situation dynamique complexe en fonction de l'expertise des sujets. En outre, le fait que cette étape soit reproduite à deux reprises nous a permis d'étudier l'effet d'apprentissage qui existe entre la suture de la première et de la seconde trompe.

4.2 *Hypothèses*

Nous pensons observer plus de communications et un temps opératoire plus long lorsqu'un des (ou les deux) chirurgiens est novice que lorsque les deux chirurgiens sont experts. En effet, deux sujets experts qui ont déjà construit un système de référents communs utiliseraient un langage spécialisé rapide et efficace, dit « opératif » car simplifié sur les plans lexicaux, syntaxiques et sémantiques, et adapté aux situations rencontrées, tandis que le dialogue expert-novice se manifesterait à travers un langage plus abondant et détaillé (Navarro & Marchand, 1994 ; Falzon, 1991). Si l'on se réfère à la notion de script conçu comme un schéma d'action basé sur des enchaînements très probables d'événements (Marchand & Navarro, 1995 ; Abelson, 1981), le script robuste et complet qui existe lors d'une collaboration entre experts rendra le recours à la communication verbale moins indispensable et fréquent, tandis que l'interaction novice-expert, soutenue par un script faible, incomplet voire inexistant, nécessitera une communication plus abondante afin d'ajuster (en temps réel) les actions au fur et à mesure de l'évolution de l'intervention. Plus spécifiquement, nous émettons l'hypothèse que ces différences seront particulièrement marquées pour les communications concernant l'orientation, les manipulations et les stratégies que pour les autres catégories de communications (Savoyant, 1977, 1985).

4.3 *Méthodologie*

Nous avons analysé, à partir des six catégories préalablement décrites, les communications pour chacune des trompes de 18 reperméabilisations tubaires réalisées à l'aide du robot chirurgical en fonction de l'expertise du chirurgien au robot et de l'expertise du chirurgien qui l'assiste. En outre, nous avons mesuré le temps opératoire pour chaque trompe, ce facteur étant un élément central dans la gestion et l'évaluation des procédures chirurgicales.

Vu le nombre restreint d'observations (36) et la diversité d'expertises des protagonistes, l'expertise pour chacun des deux chirurgiens était déterminée selon deux modalités : peu ou pas d'expertise avec le robot (<10) et expertise confirmée avec le robot (>50). Notre échantillon contenait 10 opérations réalisées par deux chirurgiens experts, 4

opérations avec un chirurgien expert au robot et un chirurgien assistant novice¹⁰³ et 4 opérations avec deux chirurgiens novices¹⁰⁴ (voir table 3). Nos données provenant du contexte aléatoire que constituent les études de terrain ne nous ont pas permis d'analyser des opérations avec un chirurgien novice au robot assisté par un chirurgien expert.

Nos données ont été analysées en utilisant le test de Kruskal-Wallis pour comparer les trois groupes de chirurgiens et le test de Wilcoxon pour mesurer l'effet d'apprentissage entre les deux trompes.

		<i>Chirurgien au robot</i>	
		Novice	Expert
<i>Chirurgien assistant</i>	Novice	4	4
	Expert	0	10

Table 3 : nombre d'opérations en fonction de l'expertise des deux chirurgiens (au robot et auprès du patient)

4.4 Résultats

Nos résultats (table 4) montrent que la durée opératoire varie significativement en fonction de l'expertise des chirurgiens : les interventions sont plus longues lorsque les deux chirurgiens sont novices que lorsque le chirurgien au robot est expert. Cette différence de durée nous incite de nouveau à analyser nos données à partir des données brutes et corrigées.

Un constat général peut cependant être établi avant la description plus détaillée des résultats : l'ensemble des communications diminue fortement entre la première et la seconde trompe lorsqu'un des deux chirurgiens (ou les deux) est novice (le test de Wilcoxon n'est cependant significatif que pour les communications de stratégie) tandis qu'il ne change pas lorsque les deux chirurgiens sont experts. En outre, les différences significatives liées à l'expertise disparaissent pour la deuxième trompe pour toutes les communications. Ces données témoignent d'une familiarisation et d'un (premier) apprentissage rapide avec la technique robotique. Seule la durée de l'intervention reste constante entre les deux trompes.

Nos données brutes mettent en évidence un nombre significativement plus important de communications portant sur les stratégies et les manipulations en l'absence complète d'expert. Les communications d'orientation spatiale, de manipulation, d'ordre et de confirmation apparaissent également en plus grand nombre dès que le chirurgien qui

¹⁰³ Le chirurgien novice dans ce cas est un chirurgien novice en général (un assistant en formation ou le technicien peu habitué à être en première ligne dans les opérations), dans tous les types de chirurgie.

¹⁰⁴ Le chirurgien novice au robot étant un chirurgien confirmé en laparoscopie classique et en chirurgie ouverte, l'emploi du terme novice est, dans ce cas, en rapport avec l'utilisation du robot.

assiste est novice (les manipulations augmentant d'autant plus si le chirurgien au robot est novice aussi).

Lorsque nous observons les analyses obtenues à partir des données « corrigées » (ratio), les différences persistent, mais se déplacent et mettent en évidence un ratio de communications significativement plus élevé pour le couple expert-novice (dans les communications d'orientation, manipulation, stratégie, ordre, et confirmation) qui est rejoint par le couple novice-novice pour les communications de manipulations et de stratégies. Le couple expert-expert n'obtient toutefois pas systématiquement le plus petit ratio : ce dernier est en effet plus élevé que celui du couple novice-novice pour les communications se rapportant à des ordres et des confirmations (se rapprochant à ces deux niveaux du couple novice-expert). Toutes ces différences s'estompent lors de la suture de la deuxième trompe.

Table 4 : nombre de communications en fonction de l'expertise du chirurgien au robot

	<i>Orientation</i>	<i>Manipulations</i>	<i>Stratégies</i>	<i>Ordres</i>	<i>Confirmation</i>	<i>Détente</i>	<i>Stress</i>	<i>Durée</i>
Expert-expert (N=10)								
Trompe 1	6±4	8±4.61	7.57±4.12	8.57±2.64	6.57±3.2	3.86±3.43	1.71±1.03	25.85±8.66
Ratio	27.86±11.49	31.22±16.1	28.17±16.73	35.56±11.3	30.78±15.88	14.44±12.64	5.04±3.97	
Trompe 2	8.37±7.11	10.75±6.56	5.75±3.41	7.37±5.62	6±4	3.87±2.16	3.25±1.46	25.37±10.22
Ratio	33.38±29.33	38.21±18.58	23.23±12.87	25.93±14.81	24.79±18.33	18.27±14.23	10.13±4.7	
Expert-novice (N=4)								
Trompe 1	16.83±7.09	18.17±8.32	13.17±5.23	14.67±5.98	14.83±5.33	4.83±3.18	5.67±5.39	32.67±10.46
Ratio	50.39±26.42	55.42±14.65	44.74±12.48	46.45±17.19	47.21±15.12	17.09±12.16	14.47±12.14	
Trompe 2	8.33±4.84	9.5±3.5	7.33±3.72	12.5±6.09	8.67±3.33	4.83±3.65	1.98±1.26	33.33±6.74
Ratio	27.01±15.06	29.38±11.75	22.95±13.17	39.55±19.28	27.77±13.14	15.02±11.64	3.02±2.71	
Novice-novice (N=4)								
Trompe 1	16.89±8.48	30±9.79	29.5±7.84	13.06±2.82	13.28±6.89	6.76±1.41	0.35±0.23	58.37±5.66
Ratio	28.43±17.4	53.64±19.36	52.36±15.71	22.75±7.09	16.68±7.95	10.27±1.44	0.01	
Trompe 2	10.53±3.36	24±5.66	13±1.41	11.64±4.24	10.79±4.76	9.87±6.48	1.23±0.46	70.05±3.54
Ratio	14.68±6.29	33.88±6.32	18.41±1.08	14.47±5.24	14.63±6.29	12.48±11.41	1.47±0.24	
Stat de Kruskal Wallis H(2)								
Trompe 1	6.41*	7.17*	6.64*	3.97	3.37	1.09	4.67	6.18*
Ratio	6.39*	6.24*	6.48*	6.47*	6.49*	0.18	4.62	
Trompe 2	0.63	4.11	4.91	3.17	2.12	0.77	1.01	7.14*
Ratio	3.39	1.04	0.29	4.75	1.22	0.36	2.11	
Test Wilcoxon								
Trompe	0.55	0.61	2.08*	0.8	1.44	1.34	-0.35	0.52
Ratio	1.74	1.03	2.06*	1.03	0.51	1.03	-0.31	

*différence significative à p<0.05 (statistique de Kruskal Wallis et test de Wilcoxon)

4.5 *Discussion*

Comme nous l'attendions, nos résultats montrent que la proportion de communications varie significativement selon l'expertise des sujets. Les communications reflétant d'une certaine façon l'activité cognitive de sujets engagés dans une tâche de coopération, leur analyse nous donne des éléments d'information sur la façon dont sont traitées et utilisées les images en 2D et 3D dans un environnement dynamique et complexe en fonction de l'expertise des sujets. L'activité dans laquelle étaient engagés les sujets demandait une grande coordination et coopération de leur part. Nous avons donc systématiquement étudié le couple de sujets plutôt que de procéder à des analyses individuelles, l'interaction entre les deux sujets faisant émerger une dynamique particulière qui n'est pas appréhendable quand on examine les sujets individuellement.

a) Analyse à partir des données brutes

Le couple expert-novice occupe une place intermédiaire dans les communications de stratégie. Celles-ci sont particulièrement nombreuses lors de la première trompe pour le couple novice-novice ; en effet, dans cette situation, les sujets doivent planifier en temps réel une procédure à laquelle ils sont, tous deux, peu ou pas habitués. Cet aspect semble assez vite maîtrisé au regard de la forte diminution observée pour ce type de communication lors de la deuxième trompe.

A l'inverse, les problèmes liés aux manipulations sont toujours très présents pour la deuxième trompe (même si la différence n'est plus significative) et semblent plus difficiles à surmonter lorsque les deux chirurgiens sont novices. Lorsque le chirurgien au robot est expert, le nombre de communications sur les manipulations est moins élevé dès le départ et décroît pour la seconde trompe au point de rejoindre le nombre de communications obtenu dans le couple expert-expert.

Hormis ces deux catégories, les couples expert-novice et novice-novice présentent en général un pattern de communications similaires et en plus grand nombre que le couple expert-expert. Dans le cas des communications d'orientation (dans une moindre mesure d'ordres et de confirmations), il semblerait que l'expertise du chirurgien qui assiste influe sur leur nombre. Ainsi, les communications concernant l'orientation spatiale sont plus nombreuses lorsque le chirurgien qui assiste est novice, quelle que soit l'expertise du chirurgien au robot. Ce résultat témoigne de l'importance, pour les aspects perceptifs, de l'expertise du chirurgien qui assiste et qui doit éventuellement être guidé, pour obtenir une perception correcte de la profondeur, par le chirurgien au robot qui dispose d'une vue en 3 dimensions.

Les données obtenues lors de la suture de la première trompe suggèrent que les aspects de manipulation et par conséquent, la dimension instrumentale, sont particulièrement

influencés par l'expertise du chirurgien au robot tandis que l'orientation spatiale et la dimension perceptive sont particulièrement sensibles à l'expertise du chirurgien qui assiste et qui doit estimer des distances à partir d'une vue en 2 dimensions. Ces observations mettent à nouveau en évidence l'importance de l'expertise dans le traitement des images bidimensionnelles. Nos résultats montrent cependant que ce problème perceptif est rapidement compensé puisque les communications d'orientation diminuent déjà pour la seconde trompe.

Le nombre d'ordres et de confirmations légèrement plus élevé avec les chirurgiens assistants novices qu'avec les chirurgiens assistants experts, renforce l'hypothèse que la dynamique d'interaction entre deux chirurgiens experts et habitués à travailler ensemble, même si c'est à partir de référents différents, est régie par un contrôle mutuel devenu implicite et est sous-tendue par un ensemble de comportements basés sur des mécanismes d'anticipation, ne rendant plus nécessaire le recours à des communications de type ordre et confirmation.

b) Analyse à partir des ratios

La dynamique mise en évidence à partir de l'analyse des ratios est intéressante et légèrement différente de celle obtenue à partir des données brutes, même si elles ne sont pas toutes deux en contradiction complète et montrent des tendances communes. Ainsi, contrairement à l'analyse précédente, nous n'observons pas une diminution systématique du ratio de communications dans le couple expert-expert par rapport aux deux autres couples. Par exemple, les chirurgiens experts conservent un ratio de communications portant sur les ordres et les confirmations relativement élevé, ce qui s'accorde notamment avec les données issues de la littérature (Degueldre et al., 2000) qui montrent que la catégorie des ordres reste très présente même avec la pratique. Ces deux catégories (ordres et confirmations) semblent en effet essentielles afin d'assurer une bonne compréhension mutuelle et une coopération adéquate dans des actions exécutées à partir de référents différents, sans aucun autre canal de communication que la modalité verbale. Le chirurgien expert au robot intensifie d'ailleurs ces deux types de communication lorsqu'il est assisté par un chirurgien novice dont il doit guider l'action (ce qui est également mis en évidence par un nombre plus élevé de communications d'orientation spatiale). La faible proportion de ces trois types de communications (ordres, confirmations et orientation spatiale) dans le couple novice-novice peut être liée au fait que les communications entre les deux chirurgiens novices sont plus centrées sur des aspects de stratégies et de manipulation que sur les autres types de communication. Les chirurgiens novices, préoccupés par la stratégie opératoire à suivre et les demandes instrumentales, utiliseraient moins les communications d'orientation, d'ordre et de

confirmation pourtant destinées à guider l'action du chirurgien assistant et à construire un référent commun, avec le risque de mener éventuellement à des représentations différentes et à des ruptures dans l'activité collective.

4.6 *Conclusions*

Nos analyses mettent en évidence la place et le rôle que joue chaque acteur et soulignent que la façon de l'assurer dépend non seulement de sa propre expertise mais aussi de celle du partenaire avec lequel il est engagé dans l'action. Les résultats obtenus lorsque les chirurgiens sont tous deux experts et qu'ils ont de surcroît l'habitude de travailler ensemble, illustrent de façon concrète la notion de compétence collective, formulée par De Montmollin (1984), qui naît lorsque les opérateurs ont l'habitude de fonctionner ensemble et qui est caractérisée par l'échange d'informations, l'uniformisation des représentations, l'articulation des savoir-faire et l'élaboration commune des raisonnements et des stratégies. Ainsi, lorsque les chirurgiens fonctionnent en synergie depuis longtemps, la faible proportion des communications liées aux aspects stratégiques, de manipulation et d'orientation suggère l'existence d'une certaine homogénéité des représentations, d'une compatibilité des stratégies et d'un contrôle implicite qui s'est instauré au fil du temps (tel que supposé par Navarro et Marchand, 1994). La relation expert-expert n'est toutefois pas, comme nous l'avons montré dans la seconde analyse, exclusivement caractérisée par une diminution pure et simple du nombre de communications. En effet, nous avons pu remarquer que certaines catégories de communications essentielles et utiles restent proportionnellement fort présentes entre experts.

Lors d'interventions réalisées à la fois avec des novices et des experts, les interactions témoignent de problèmes liés à des décalages de représentation initiale, à une coordination délicate, problèmes compensés par le recours accru à la communication verbale portant sur les stratégies d'actions, d'orientation et de manipulation. Les différences observées apparaissent quasi exclusivement lors de la suture de la première trompe et s'estompent fortement lors de la deuxième trompe, ce qui témoigne d'une familiarisation et d'une maîtrise assez rapides aussi bien lorsque les deux chirurgiens sont novices que lorsqu'un expert interagit avec un sujet novice. Cette réduction générale au niveau des communications pour la seconde trompe n'a cependant pas d'effet au niveau de la durée opératoire qui reste identique pour les deux trompes.

Enfin, il est utile de préciser que si le chirurgien assistant est novice, il a déjà plusieurs interventions chirurgicales à son actif et donc une certaine pratique (même si celle-ci est encore fort réduite). Il nous faut également rappeler que le chirurgien « novice » au

robot est déjà expert en chirurgie. En outre, nos résultats, s'ils présentent l'avantage et l'intérêt d'étudier une situation naturelle, complexe et réelle, doivent être considérés avec prudence vu la taille réduite de l'échantillon.

5 CONCLUSION

En conclusion, nos résultats montrent que l'introduction de la robotique chirurgicale provoque de profondes modifications au sein d'une équipe chirurgicale. Tout d'abord, nos données mettent en évidence une augmentation du temps opératoire lors de l'utilisation du robot chirurgical par rapport à la laparoscopie classique, cette observation est similaire à celle obtenue dans d'autres études cliniques (Brunaud et al., 2003 ; Cadière et al., 2000). Il nous faut toutefois nuancer ce résultat puisqu'il est obtenu auprès d'équipes novices dans l'utilisation du robot. La durée opératoire avec le robot est en effet également fonction de l'expertise du chirurgien (comme nous le montre notre seconde étude de terrain dans laquelle la présence d'un chirurgien habitué à la manipulation du robot chirurgical diminue fortement le temps opératoire¹⁰⁵).

Nos observations montrent également que le nombre de communications augmente considérablement lors de l'utilisation du robot chirurgical par rapport à la laparoscopie classique (première étude de terrain). Celles-ci semblent nécessaires à la construction de référents d'action communs alors que les intervenants agissent à partir d'images et d'instruments de qualités différentes. Elles contribuent également à la préservation d'une conscience de la situation identique pour tous les protagonistes. Nos données obtenues chez les sujets experts mettent en évidence que les différentes catégories de communications n'ont pas toutes la même fonction et ne perdurent pas toutes avec la même intensité (seconde étude de terrain). Nous pouvons ainsi opérer une distinction entre deux types de communications qui contribueraient et seraient sensibles à des aspects différents de la situation :

- les communications relatives aux manipulations et à l'orientation spatiale, qui reflètent respectivement les dimensions instrumentale et perceptive. Ces communications semblent sensibles aux effets de l'apprentissage (elles diminuent de façon drastique entre la première et la deuxième trompe en gynécologie chez des sujets novices) et de l'expertise (on en observe moins chez les experts). Elles contribueraient au processus d'appropriation collectif de l'instrument et diminueraient une fois que les différents acteurs ont construit des référents d'action communs à partir desquels ils peuvent opérer.
- Les communications d'ordre et de confirmation restent quant à elles présentes de façon constante en dépit de l'expertise ou des processus

¹⁰⁵ Ce qui est d'ailleurs classiquement rapporté dans la littérature chirurgicale en général (Hernandez et al., 2004 ; Hamilton et al., 2002)

d'apprentissage. Ces deux catégories de communication seraient en effet indispensables au maintien d'un travail coopératif de qualité et d'une conscience de la situation identique et partagée par les différents acteurs.

Des modifications ultérieures peuvent encore apparaître avec le temps, cette nouvelle technologie du robot n'étant qu'à ses débuts. En effet, les nouvelles technologies modifient les connaissances, savoir-faire et modes opératifs dans la durée. C'est donc sur le long terme que des modifications peut-être importantes seront mises en évidence.

PARTIE V : DISCUSSION GENERALE

1 RAPPEL DU CADRE THÉORIQUE

Au début de cette thèse, nous présentons les différents types d'indices perceptifs et modèles théoriques qui expliquent l'intégration de l'information visuelle par l'homme. Cette revue de la littérature a mis en évidence que le fonctionnement humain et les interactions avec l'environnement différaient selon le type de vision utilisé (monoculaire ou binoculaire). Ainsi, la vision en 3 dimensions permet un traitement de l'information plus rapide, sans intervention des mécanismes conscients et se fonde essentiellement sur des indices binoculaires, qualifiés d'indices « physiologiques », qui sont traités rapidement et de manière automatique (Greenwald et al., 2005). Selon les différents modèles théoriques, l'information en 3D est soit capturée à partir d'éléments saillants caractéristiques de l'environnement qui provoquent l'action (nommés affordances, par Gibson, 1979), soit traitée par une voie neuronale, la voie dorsale, qui sous-tendrait le système visuo-moteur et serait utilisée dans le contrôle visuel de l'action (Goodale & Milner, 1992 ; Milner & Goodale, 1993, 1995 ; Jeannerod & Rossetti, 1993 ; Schneider, 1969). La vision en 2D requiert, au contraire, un traitement plus lent, conscient et coûteux en ressources, se basant sur des indices qualifiés de « cognitifs », acquis (même s'ils apparaissent très tôt dans le développement) et sensibles au phénomène d'apprentissage (Marotta et al., 1998). Contrairement à la vision en 3D, l'information bidimensionnelle ne permettrait pas les affordances (Gibson, 1979) et serait traitée par la voie ventrale, spécialisée dans le traitement de l'information visuelle consciente, qui sous-tendrait les processus d'identification et de catégorisation visuelle. Notre étude de la littérature a également souligné que le rôle et l'apport de la vision binoculaire étaient particulièrement importants dans l'espace d'action du sujet (Mon-Williams & Dijkerman, 1999 ; Glennester et al., 1998 ; Previc, 1998 ; Cutting, 1997 ; Rogers & Bradshaw, 1993 ; Servos et al., 1992 ; Foley, 1980). De même, l'avantage de la vision en 3 dimensions par rapport à la vision en 2 dimensions était démontré de manière particulièrement manifeste, constante et systématique lorsque le sujet se trouvait dans une situation d'interaction dynamique et naturelle avec son environnement ; à l'inverse, cet avantage était nettement moins évident lorsqu'il était demandé au sujet de porter un jugement ou une estimation verbale, activités moins naturelles qui reposent plus sur des mécanismes conscients peu utilisés dans la vie courante (Loomis & Knapp, 2003 ; Falk et al., 2001 ; Servos, 2000 ; Pagano & Bingham, 1998 ; Loomis et al., 1992 ; Foley, 1977).

Dans ce contexte théorique, l'objectif de notre thèse était d'étudier la façon dont les images en 2D et en 3D influençaient les actions dans un environnement complexe dans lequel des interfaces sont insérées entre le sujet et l'objet sur lequel celui-ci agit. Plus spécifiquement, notre recherche portait sur la façon dont certains facteurs contextuels pouvaient influencer les différences entre le 2D et le 3D classiquement rapportées dans la littérature. Le terrain investigué était le domaine particulier de la chirurgie minimale invasive, ce contexte nous assurant ainsi de la validité écologique de nos observations. Nos études ont cherché à répondre à trois questions théoriques sur l'implication de facteurs contextuels provenant d'une situation complexe réelle, domaine peu exploré dans la littérature classique :

- quelle est l'influence de la complexité d'une tâche sur la différence 2D-3D (étude 1) ?
- les experts traitent-ils l'information en 2D et 3D de la même manière que les novices (étude 2) ?
- comment la différence 2D-3D évolue-t-elle lors du processus d'acquisition des habiletés (études 3 et 4) ?

Outre ces trois questions, nous avons également étudié l'impact des images en 2D et 3D sur

- les impressions subjectives des sujets (degrés de confiance, satisfaction et difficulté)
- la dimension collective du travail (étude 5)

L'évaluation de ces différentes variables a été réalisée à partir de l'étude de la différence de performances entre la vision 2D et la vision 3D. Cependant, en plus de cette dimension perceptive (différence 2D-3D), un niveau d'analyse supplémentaire a été introduit dans le plan expérimental afin d'affiner l'examen de nos données : la dimension instrumentale, composante efférente, qui permettait ainsi la prise en compte du degré de liberté de mouvement des instruments et qui constituait la principale différence entre le système robotique et la laparoscopie classique.

En matière de recherche fondamentale, ce plan expérimental, représenté par un tableau à deux entrées (voir table 1), nous a offert des éléments de réponse quant à l'intervention et l'influence de l'aspect instrumental (et moteur) sur les différences 2D et 3D. Sur un plan plus appliqué, il nous a permis d'évaluer de manière plus précise l'influence des nouvelles technologies sur la performance chirurgicale, et particulièrement, de répondre à cette question : l'impact du système robotique s'explique-il par le bénéfice de la vue en 3D (auquel cas, on observera de manière prépondérante l'effet de la dimension perceptive, et donc une différence entre 2D et 3D) ? Ou au contraire, s'explique-t-il par

la récupération de la dextérité et de la liberté de mouvement des instruments (dans ce cas, on observera de manière prépondérante l'effet de la dimension instrumentale, et donc une différence entre le système robotique et classique) ?

TABLE 1 : Les deux dimensions de notre plan expérimental investiguées dans nos différentes études

		<i>Dimension instrumentale</i>	
		Laparoscopie classique	Système robotique
<i>Dimension perceptive</i>	2D	Etudes 1, 2, 3, 4, 5	Etudes 1, 2, 3, 4
	3D	Etudes 3, 4	Etudes 1, 2, 3, 4, 5

2 RÉSUMÉ DES RÉSULTATS

Avant d'examiner de façon détaillée l'implication théorique et pratique des résultats de nos études, il est utile de les résumer brièvement.

La première étude avait pour objectif majeur d'évaluer *l'impact de la complexité des tâches sur la performance de sujets novices* répartis dans trois conditions expérimentales (laparoscopie classique, système robotique en 2D et système robotique en 3D). Ces derniers réalisaient dans un premier temps une phase de familiarisation, suivie de l'exécution de quatre tâches de complexité croissante¹⁰⁶ et terminaient la séance en effectuant une seconde fois la dernière tâche (la plus complexe) avec la technique qu'ils n'avaient jamais utilisée. Les trois phases de cette étude montrent les résultats suivants :

Tout au long de la phase de familiarisation, les sujets ont montré une meilleure performance en laparoscopie classique qu'avec le système robotique (2D et 3D), malgré les avantages du système robotique (dextérité accrue des instruments et vision binoculaire dans la condition 3D). Ce résultat peut être en partie expliqué par la nature de la tâche de familiarisation qui, si elle n'exigeait pas une grande dextérité et une gestualité très précise, nécessitait de nombreux déplacements de caméra afin d'explorer l'ensemble du site, déplacements qui forment, en soi, une tâche supplémentaire complexe.

Dans la première tâche de complexité croissante, les sujets qui travaillaient avec le système robotique en 3D ont obtenu de meilleures performances que les sujets placés

¹⁰⁶ Complexité croissante établie selon plusieurs études (Scott et al., 2000 ; Derossis et al., 1998)

dans les deux autres conditions expérimentales. Le résultat à cette première épreuve met en évidence le rôle important joué par la vision binoculaire dans le mécanisme de préhension mais également dans le processus d'identification des chiffres et des lettres. Ce résultat rejoint notamment les données de Rabin (1995) qui montrait, dans une tâche de lecture similaire à la nôtre (des lettres noires sur fond blanc), une augmentation de la sensibilité aux contrastes et de l'acuité visuelle et donc de la performance en vision binoculaire. La seconde tâche (passage d'une aiguille dans un parcours d'anneaux) s'est montrée la plus sensible pour différencier les trois conditions expérimentales : la performance des sujets était significativement meilleure avec le robot en 3D qu'avec le robot en 2D et les moins bonnes performances étaient obtenues en laparoscopie classique. La troisième épreuve (découpage du cercle) a produit une distinction 2D-3D en ce qui concerne le diamètre découpé (le robot en 3D procurant de meilleurs résultats que le robot en 2D et la laparoscopie classique) et différenciait les trois conditions en ce qui concerne la qualité de la découpe (robot en 3D permettant un découpage plus précis que le robot en 2D, la laparoscopie classique produisant le découpage de moins bonne qualité). Enfin, lors de la dernière tâche (suture et nœud), le robot (2D et 3D) permettait une meilleure performance que la laparoscopie classique. Lors de ces quatre tâches de complexité croissante, la satisfaction, la confiance et les impressions de difficulté des sujets mettaient en évidence, pour chaque tâche, des différences similaires entre les conditions.

Dans la troisième et dernière phase de l'étude, le changement de technique pour la tâche la plus complexe met en évidence une meilleure performance avec le système robotique en 3D qu'avec la laparoscopie classique, aucune de ces deux conditions ne présentant de différence significative avec le système robotique en 2D.

Le rôle de l'expertise sur les performances à partir d'images en 2D et 3D était l'objet de la **seconde étude**, qui reprenait les mêmes phases (excepté la troisième) et conditions expérimentales que l'étude précédente. La population d'experts étudiée était constituée d'un groupe de chirurgiens experts en laparoscopie classique et d'un groupe de chirurgiens experts à la fois en laparoscopie classique et en chirurgie robotique. Les performances de ces deux groupes d'experts étaient comparées à celles obtenues auprès de sujets complètement novices dans le domaine (étudiants en médecine). Outre le résultat évidemment attendu et trivial qui montrait une meilleure performance des experts par rapport aux novices pour toutes les tâches, nos données ont mis en évidence une sensibilité variable à la différence provoquée par la vision en 2D et 3D selon le degré et le type d'expertise. Ainsi, les sujets novices étaient particulièrement sensibles à la différence entre les images 2D et 3D (leurs performances étant de manière générale meilleures en 3D qu'en 2D et meilleures avec le robot qu'avec la laparoscopie

classique). Les chirurgiens experts en laparoscopie montraient au contraire des performances similaires dans les trois conditions : avec le robot en 2D, en 3D et en laparoscopie classique. Dans le troisième groupe expérimental, composé des chirurgiens experts à la fois en laparoscopie classique et en chirurgie robotique, une différence de performance en faveur de la vision 3D réapparaissait dans certaines tâches, notamment dans la tâche qui était la plus sensible pour différencier les conditions expérimentales (le parcours d'anneaux).

Les deux études suivantes s'intéressaient spécifiquement au *processus d'acquisition des habiletés en fonction des dimensions perceptive (2D-3D) et instrumentale* (robot-laparoscopie). Les courbes d'apprentissage étaient étudiées à partir de la réalisation d'une tâche complexe chez 40 sujets novices répartis dans quatre conditions expérimentales (laparoscopie classique avec vue directe (3D) ou indirecte (2D, écran), système robotique en 2D ou en 3D). Cette étude était composée de trois phases successives : la première dans laquelle les sujets répétaient à six reprises la tâche dans une même condition ; ensuite, les sujets réalisaient la tâche avec la même technique mais dans l'autre condition visuelle (*switch*¹⁰⁷ perceptif : 2D-3D) pour deux essais ; enfin, les sujets effectuaient la tâche à trois reprises avec l'autre technique (*switch* technique : robot-laparoscopie classique).

Lors de la première phase, l'examen des courbes d'apprentissage nous montre que les performances avec une vue 3D étaient meilleures qu'en vision 2D, quel que soit l'aspect instrumental (robot ou laparoscopie classique). En vision 2D par contre, les performances étaient meilleures avec le robot qu'en laparoscopie classique, l'aspect instrumental apportant ainsi une contribution significative à la performance quand les sujets devaient opérer en vision 2D. En outre, nous avons montré que l'écart entre les performances en vision 2D et 3D s'accroissait au fil des essais, quelle que soit la dimension instrumentale. Les impressions de maîtrise, satisfaction, certitude et difficulté évoluaient parallèlement avec l'apprentissage et étaient de manière générale moins bonnes pour la laparoscopie classique en vision indirecte (2D) que pour les autres conditions (excepté pour le sentiment de satisfaction qui ne différait pas entre les conditions).

Le *switch* perceptif, qui suivait cette période d'apprentissage, provoquait une forte perturbation de la performance de nos sujets : le passage d'une vision en 2D vers une vision en 3D augmentait considérablement les performances, tandis que la perte

¹⁰⁷ Afin d'éviter toute ambiguïté terminologique dans la discussion, nous utiliserons le terme anglais *switch* pour désigner la procédure expérimentale, mise en place dans nos études, qui consiste à changer de dimension perceptive (2D-3D) ou de technique (laparoscopie classique – robot) au cours de la séance d'expérimentation (études 1, 3 et 4) et nous réserverons le terme « transfert » aux discussions concernant les processus cognitifs impliqués dans le transfert d'habiletés ou d'expertise.

soudaine des indices binoculaires lors du passage d'une vision 3D vers une vision 2D provoquait la chute immédiate et très prononcée de la performance. Lors des deux essais réalisés après ce *switch* perceptif, les performances étaient toujours meilleures en vision 3D qu'en vision 2D, quelle que soit la technique utilisée. L'effet provoqué par le *switch* perceptif montrait la même tendance au niveau des sentiments de maîtrise, familiarité, satisfaction et certitude.

Enfin, le *switch* technique a eu pour effet de ramener les performances des sujets à des scores équivalents à ceux obtenus lors du tout premier essai, aucun transfert d'habileté n'étant mis en évidence lors du passage d'une technique à l'autre. En outre, les performances après le *switch* technique n'évoluaient pas au fil des essais, excepté pour la laparoscopie ouverte où la performance s'est améliorée significativement jusqu'à dépasser celle du robot en 3D. Les impressions subjectives différaient de manière générale entre le robot et la laparoscopie.

Le cinquième et dernier volet de notre partie expérimentale adoptait une approche différente et était consacré à deux *études de terrain* destinées à enrichir l'ensemble de nos conclusions au moyen de données récoltées en salles d'opération. Ces dernières nous montrent que l'introduction de la chirurgie robotique modifie profondément les procédures : la durée opératoire augmente considérablement ainsi que le nombre de communications. Ces dernières seraient indispensables afin d'opérer à partir de référents d'action communs et de conserver une conscience de la situation identique pour les différents acteurs. Ces résultats s'observent particulièrement dans les premiers moments d'utilisation du robot et s'atténuent progressivement avec la pratique. Nos données précisent que les communications relatives aux dimensions instrumentale (portant sur les aspects de manipulation) et perceptive (orientation spatiale) seraient liées à l'apprentissage et à l'expertise¹⁰⁸ (et donc vouées à s'atténuer), tandis que les communications relatives aux ordres et confirmations seraient plus stables et resteraient nécessaires, quel que soit le degré d'expertise des chirurgiens.

¹⁰⁸ Nous montrons en effet une importante et rapide diminution des communications liées aux manipulations et orientations entre la première et la deuxième trompe en gynécologie avec des chirurgiens peu experts en chirurgie robotique, ainsi qu'une faible proportion de ce type de communication chez des chirurgiens experts.

3 IMPLICATIONS THÉORIQUES ET PRATIQUES DE NOS RÉSULTATS

Nos études ont mis en évidence, de manière générale, l'existence d'une différence entre la vision 2D et 3D dans le domaine complexe que constitue la chirurgie minimale invasive. Cependant, cette différence est sujette à des changements, des évolutions et même, dans certains cas, à une disparition sous l'influence de certains facteurs combinés ou pris isolément. De l'identification de ces facteurs et de leur effet, il découle un certain nombre d'implications théoriques et pratiques qui font l'objet de notre discussion.

3.1 *Le rôle de la complexité des tâches dans les différences entre la vision 2D et 3D*

Nos études montrent que la complexité de la tâche intervient dans la mise en œuvre de plusieurs mécanismes perceptifs et influence la manière dont les informations en 2D et 3D sont traitées pour l'action.

a) Rôle de la complexité dans la mise en œuvre de mécanismes de compensation en vision 2D

La mise en place et l'utilisation de mécanismes de compensation efficaces à partir des indices monoculaires est un processus lent qui demande une réorganisation importante du système visuo-moteur (Marotta et al., 1998, 1995). Certains auteurs montrent même que de tels mécanismes ne sont pas toujours développés (Mazyn et al., 2004). Deux de nos études (études 1 et 3) nous permettent d'analyser le rôle de la complexité de la tâche dans la mise en place de mécanismes destinés à compenser la perte de profondeur binoculaire en vision 2D. Dans la première étude, les sujets répétaient dix fois une même tâche (lors de la phase de familiarisation) ; si au premier essai, la performance des sujets au robot était meilleure en vision 3D qu'en vision 2D, cette différence entre la vision 2D et 3D sur le robot disparaissait dès le second essai, témoignant d'une compensation rapide de la perte des indices binoculaires en 2D dans cette tâche assez simple. A l'inverse, dans la troisième étude où la tâche était plus complexe, les courbes d'apprentissage en 2D et en 3D s'éloignaient au fil des essais : la performance s'améliorait nettement en vision 3D (quelle que soit la dimension instrumentale) tandis qu'elle ne progressait que très peu en vision 2D.

Le contraste est vif entre ces deux études, puisque l'on observe d'un côté, dans une tâche simple, une compensation rapide de la perte des indices binoculaires en vision 2D, alors que de l'autre, dans une tâche plus complexe, l'écart entre la vision 2D et 3D s'agrandit au fil des essais (contraste qui est illustré par les deux graphiques à la figure 1).

Il semble donc que lors de l'apprentissage d'une tâche simple, les ressources encore disponibles sont consacrées à la compensation progressive de la perte des indices binoculaires en 2D, ce qui permet à la performance en vision 2D de rejoindre rapidement celle de la vision 3D. Lors de l'apprentissage d'une tâche complexe par contre, les ressources sont massivement impliquées dans la réalisation gestuelle de la tâche et entravent ainsi la mise en place de mécanismes de compensation efficaces en 2D¹⁰⁹ : ce partage des ressources a pour effet d'augmenter le fossé qui se creuse entre, d'un côté, les performances en vision 2D où les ressources doivent être partagées entre deux traitements coûteux (la réalisation de la tâche complexe et la compensation de la perte de la vision binoculaire) et, de l'autre côté, les performances en 3D où les ressources peuvent être essentiellement impliquées dans la réalisation motrice de la tâche (le traitement perceptif en 3D étant plus automatique et moins coûteux en ressources).

En résumé, il semble que l'acquisition de mécanismes de compensation en 2D est liée aux ressources disponibles pour les mettre en place, ressources qui dépendent en partie de la complexité de la tâche.

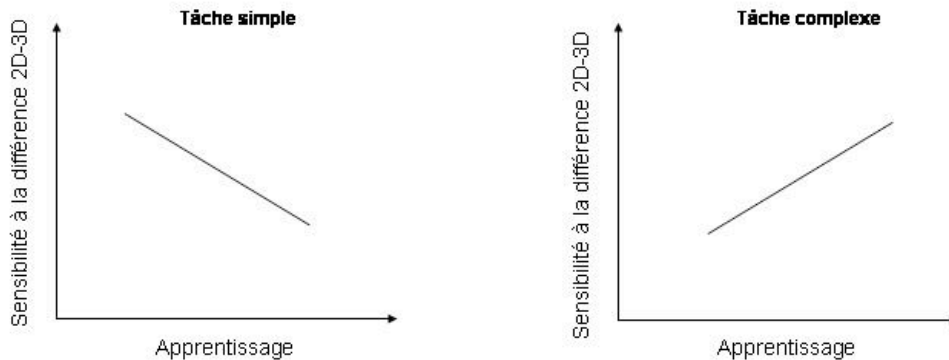


Figure 1¹¹⁰ : **Illustration de l'effet de l'apprentissage sur la différence 2D-3D en fonction de la complexité de la tâche** dans nos études 1 et 3. Quand la tâche est simple, l'apprentissage semble réduire rapidement les différences de performance entre le 2D et le 3D (étude 1), tandis que lorsque la tâche nécessite l'acquisition d'habiletés plus complexes, l'apprentissage augmente les différences de performances entre le 2D et le 3D chez des sujets novices (étude 3).

¹⁰⁹ Comme en témoigne également le nombre important d'erreurs de distance en vision 2D qui ne diminuent pas au fil des essais (étude 4).

¹¹⁰ Tous les graphiques introduits dans la discussion sont exclusivement destinés à illustrer notre propos et les tendances que nous avons mises en évidence.

b) Rôle de la complexité lors du switch perceptif

L'examen des conséquences du switch perceptif (aux études 1 et 3) nous permet de mettre à nouveau en évidence l'importance de la complexité de la tâche et son impact sur les capacités de compensation des sujets novices. Dans la première étude, dans une tâche simple, le changement de vision 2D-3D (opéré après le cinquième essai) ne produit aucun effet sur la performance (qui reste donc identique malgré la perte ou le gain des indices binoculaires). Dans la troisième étude au contraire, lors de l'apprentissage d'une tâche complexe, le passage d'une vision en 2D vers une vision en 3D (après le sixième essai) augmente considérablement les performances, tandis que la perte soudaine des indices binoculaires lors du passage d'une vision 3D vers une vision 2D provoque la chute immédiate et très prononcée de la performance.

La tâche simple de l'étude 1 était rapidement maîtrisée par les sujets novices (comme en témoigne l'effet plancher rapidement obtenu) et demandait peu de ressources, lesquelles étaient dès lors directement disponibles pour compenser la perte des indices binoculaires de profondeur lors du passage 3D-2D, ce qui n'était pas le cas lors de la réalisation de la tâche plus complexe (étude 3). En effet, dans cette situation, les ressources étaient massivement investies dans la réalisation de la tâche complexe et ne pouvaient être mises à profit pour compenser la perte soudaine des indices binoculaires de profondeur.

La portée de cette conclusion doit cependant être tempérée par une observation technique : la tâche simple nécessitait en effet un déplacement important de la caméra, créant ainsi un indice monoculaire de profondeur particulièrement efficace, la parallaxe de mouvement, sur laquelle les sujets se basaient peut-être pour contrôler leurs mouvements (et cela, même en vision 3D). Cette stratégie acquise dans les premiers essais leur aurait permis de conserver de façon efficace l'utilisation de cet indice monoculaire lors du passage 3D-2D dans l'étude 1 et de diminuer ainsi l'effet du switch perceptif¹¹¹.

En résumé, il semble que les perturbations provoquées par un changement perceptif (passage 2D-3D ou 3D-2D) soient liées aux caractéristiques de la tâche et notamment, à sa complexité.

¹¹¹ Cette hypothèse doit être elle-même relativisée par les données de plusieurs études qui suggèrent que la parallaxe de mouvement serait un indice visuel de profondeur particulièrement efficace dans l'espace plus lointain que celui du champ d'action direct (Rock, 2001 ; Marotta et al., 1995 ; Durgin et al., 1995).

c) Rôle de la complexité dans l'évaluation subjective de la performance

Nos différentes études mettent également en évidence que la complexité des tâches influence les impressions subjectives de nos sujets. Ainsi, dans l'étude 1, l'évolution progressive de la complexité se marque également au niveau de l'évaluation subjective des sujets par une diminution (ou stagnation) des sentiments de confiance, de satisfaction et de difficulté¹¹². A ce niveau, nous observons de nouveau une différence dans l'évaluation subjective de la complexité entre le 2D et le 3D : en vision 3D, les sujets ne rapportent pas de différence significative entre les tâches de complexité croissante tandis que les sujets qui sont en 2D (et particulièrement en laparoscopie classique) s'estiment moins confiants et plus en difficulté dans les tâches complexes que dans les autres tâches.

d) Conclusion : limites du rôle de la complexité des tâches

Malgré les différents effets mis en évidence ci-dessus, nos résultats suggèrent également qu'il faut réévaluer la notion de complexité de la tâche : celle-ci n'a pas nécessairement et de manière objective un caractère complexe ou simple. Le degré de complexité de la tâche est en effet intimement lié à la technologie mise en œuvre pour la résoudre ; les contraintes propres à chacune des technologies peuvent en altérer significativement l'efficacité : par exemple, dans la première étude, la manipulation de la caméra, qui ne semble pas contraignante en laparoscopie classique, affecte significativement la performance lors de l'utilisation du système robotique chez des sujets novices. Cet exemple illustre l'influence des nouvelles technologies sur la recomposition de l'activité en fonction de l'apparition de nouvelles tâches et de la disparition d'anciennes (Rabardel, 1995). Ceci souligne l'importance de choisir une technique parfaitement appropriée à l'exécution d'une tâche donnée : dans cette optique, la dimension instrumentale revêt une importance capitale qui, comme nous l'avons montré au travers de nos résultats, influence la dimension perceptive et ne doit donc pas passer au second plan.

3.2 Le rôle de la dimension instrumentale

L'ensemble de nos résultats montre que si la performance est généralement meilleure avec une image en 3 dimensions, cette supériorité n'est pas systématique et dépend de la

¹¹² Cette différence se marque particulièrement entre la tâche 1 et les suivantes.

nature de la tâche ainsi que des moyens instrumentaux mis à la disposition du sujet. S'il semble en effet que la différence de performance entre le 2D et le 3D a tendance à croître avec la complexité de la tâche, d'autres facteurs tels que les aspects instrumentaux interviennent et modulent également l'effet de la vision en 3D (voir graphique de la figure 2).

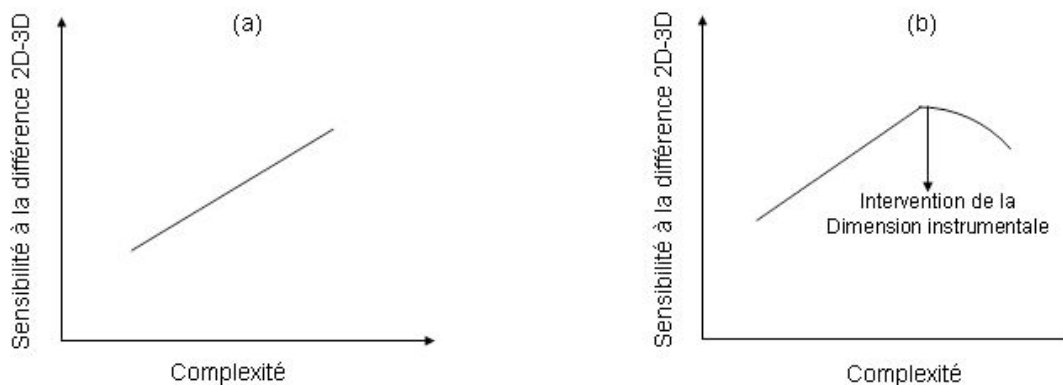


Figure 2 : **Rôle de la complexité dans la sensibilité à la différence 2D-3D en fonction de la dimension instrumentale.** Si nos résultats ainsi que la plupart des études en psychologie cognitive et en chirurgie minimale invasive s'accordent sur l'existence d'un accroissement de la différence entre les performances en 2D et 3D en fonction de la complexité, nos études montrent que celui-ci ne semble pas linéaire (a) mais est sensible à l'intervention d'autres facteurs, tels que la dimension instrumentale, qui, dans notre schéma, diminue l'effet de la complexité sur la différence 2D-3D mais qui pourrait également l'augmenter (b).

a) Au niveau de la performance

Les résultats de plusieurs de nos études mettent en évidence le rôle de la dimension instrumentale sur la différence 2D-3D au niveau de la performance des sujets.

Ainsi, dans la première étude, lors de la réalisation de la suture (tâche souvent définie comme extrêmement complexe pour ses exigences en termes de précision et de dextérité requises), l'apport instrumental du robot est tel que la différence entre la vision 2D et 3D avec le robot devient insignifiante par rapport aux difficultés instrumentales posées par la laparoscopie classique.

Dans la troisième étude, si les performances avec une vue 3D ne diffèrent pas selon l'instrument utilisé (robot ou laparoscopie classique¹¹³), en vision 2D par contre, elles sont meilleures avec le robot qu'en laparoscopie classique, l'aspect instrumental apportant ainsi une contribution significative à la performance quand les sujets doivent

¹¹³ Dans ce cas, il semble que l'apport du 3D est tel qu'il libère suffisamment de ressources pour supplanter la différence instrumentale qui existe entre le robot et la laparoscopie ouverte.

opérer en vision 2D¹¹⁴. Cette différence au niveau de la vision en 2D (entre la laparoscopie classique et le robot en 2D) trouve un élément d'explication sur le plan instrumental : le robot offre plus de facilités dans la manipulation des instruments et permet au sujet de consacrer plus de ressources au traitement de l'information visuelle en 2D et d'améliorer ainsi (légèrement) sa performance au fil des essais, ce qui est plus difficile en laparoscopie classique où les ressources attentionnelles sont majoritairement tournées vers la résolution des problèmes de manipulation. Ces problèmes de manipulation sont d'ailleurs mis en évidence par l'analyse détaillée des performances réalisée dans l'étude 4 qui montre un nombre plus important d'erreurs de manipulation en laparoscopie qu'avec le robot, quelle que soit la dimension perceptive.

b) Au niveau des composantes du mouvement

Deux composantes du mouvement sont classiquement distinguées lors d'une interaction avec un objet : le mouvement d'approche (ou dit de transport) dans lequel le membre se dirige vers l'objet, et le mouvement de préhension dans lequel la main (dans notre cas, l'instrument) est ouverte et orientée en vue de faciliter la préhension de l'objet (Loftus et al., 2004 ; Servos, 2000 ; Jeannerod, 1984). Notre analyse détaillée des performances à l'étude 4 montre que si les erreurs dans le mouvement d'approche sont principalement expliquées par la dimension perceptive (le nombre d'erreurs étant plus élevé en 2D qu'en 3D quel que soit l'instrument utilisé), les erreurs dans le mouvements de préhension sont quant à elles à la fois liées à la dimension perceptive et instrumentale : en effet, lors du mouvement de préhension, les erreurs sont significativement plus nombreuses en laparoscopie classique 2D que dans les trois autres conditions. L'aspect instrumental aurait donc une influence significative sur le mouvement de préhension, geste d'une importance considérable en chirurgie, notamment quand il s'agit de manipuler avec précision des instruments traumatiques qui peuvent endommager les tissus fragiles.

c) Au niveau de l'évaluation subjective

Les aspects instrumentaux ne contribuent pas seulement à l'explication de la performance objective de la tâche, ils interviennent également au niveau de l'évaluation subjective de la difficulté des tâches. Ainsi, dans la première étude, la tâche jugée la

¹¹⁴ Le même résultat est observé dans la tâche des anneaux à l'étude 1 où les sujets obtiennent une meilleure performance avec le robot en 2D qu'en laparoscopie classique.

plus complexe n'est pas la même selon que les sujets opéraient en laparoscopie classique ou avec le système robotique : les sujets se trouvant dans la première situation considéraient la dernière tâche (la suture et le nœud) comme étant la plus difficile, tandis que les sujets installés au robot estimaient que la tâche la plus complexe était le parcours d'anneaux (particulièrement les sujets qui opéraient avec le robot en vision 2D). L'impression subjective de complexité des tâches diffère donc d'une technologie à l'autre et cela, notamment en fonction de la dimension instrumentale.

La dimension instrumentale a été également mise en évidence quand les sujets ont comparé les deux techniques (laparoscopie classique et robot dans les études 1 et 3) après le *switch* technique : les sujets ont en effet souligné un certain nombre d'avantages en faveur du système robotique par rapport à la laparoscopie classique (performance générale, temps de réalisation de la tâche, précision des gestes, clarté de l'image, vision du site, utilisation aisée des instruments, orientation spatiale, confort, visibilité des actions, anticipation des effets des actions, complexité de la tâche et qualité des gestes).

d) Conclusion : le rôle de la dimension instrumentale par rapport à la dimension perceptive

L'ensemble de ces données met en évidence l'importance de la dimension instrumentale. En plus de la complexité « objective » de la tâche, l'instrument utilisé pour la réaliser augmentera ou diminuera la difficulté, aussi bien lors de son accomplissement que lors de son évaluation subjective. L'effet de l'apport instrumental n'est cependant pas constant :

dans certains cas, il est totalement absent et dominé par la dimension perceptive (par exemple, dans la tâche 1 de l'étude 1 ou lors du *switch* perceptif dans l'étude 3, où l'apport du 3D est tel que les aspects instrumentaux n'ont aucune influence),

dans d'autres cas, son effet est indépendant et s'additionne à celui de la dimension perceptive (par exemple, dans la tâche des anneaux de l'étude 1, où les deux dimensions interviennent chacune à leur niveau et procurent une différence entre les trois conditions, laparoscopie classique, robot 2D et robot 3D),

dans un troisième cas de figure, son effet est combiné à celui de la dimension perceptive (par exemple, dans le cas du *switch* technique de l'étude 1 où une seule des deux dimensions ne suffit pas à différencier les performances mais où la présence des deux dimensions est nécessaire pour procurer une différence),

dans un quatrième cas enfin, son effet domine celui de la dimension perceptive (par exemple, lors de la suture dans l'étude 1 où le robot procure la meilleure performance quelle que soit la dimension perceptive).

Ces résultats insistent à nouveau sur le fait que le bénéfice d'une technologie ne se révèle qu'en lien direct avec la tâche et ses caractéristiques. Cette perspective, qui se rapproche de l'orientation écologique de Gibson (1979), suggère que les propriétés mêmes de la tâche induisent le type de traitement de l'information qui sera appliqué et donc le choix de la technique qui devra être utilisée. Ces conclusions doivent cependant être nuancées à la lumière des données nous provenant des sujets experts.

3.3 *Rôle de l'expertise*

Jusqu'à présent, notre discussion s'est centrée sur l'apport théorique de nos données retirées de l'examen des performances de sujets novices. Chez ceux-ci, des mécanismes compensant la perte d'indices binoculaires étaient mis en œuvre lors de l'accomplissement des tâches simples en 2D mais pas pour des tâches complexes. Nous avons également mis en évidence le rôle de la dimension instrumentale qui intervenait particulièrement dans les tâches complexes qui demandaient une grande précision gestuelle. Or, nous n'obtenons pas les mêmes tendances chez les chirurgiens experts, ce qui nous mène à discuter d'un troisième facteur qui intervient dans le traitement de l'information visuelle en 2D et 3D et qui est l'expertise.

Nos résultats à l'étude 2 (qui analyse la performance d'experts) montrent en effet que, si les sujets novices sont sensibles à la différence 2D-3D, les chirurgiens experts en laparoscopie classique y sont nettement moins sensibles, tandis que ceux qui sont experts à la fois en laparoscopie classique et en robotique redeviennent sensibles à la différence 2D-3D pour certaines tâches. La sensibilité à la différence 2D-3D n'est cependant pas similaire chez les novices et les chirurgiens experts en robotique : ces derniers ont des performances similaires aux autres experts quand ils sont en 2D (leur performance n'est donc pas moins bonne que les autres en 2D), mais ils augmentent encore leur performance lorsqu'ils se trouvent en 3D, exploitant ainsi au maximum les avantages du robot (dont ils connaissent très bien la manipulation). Cette tendance est également marquée au niveau des impressions subjectives des sujets, particulièrement pour les chirurgiens experts en robotique qui rapportent de manière générale une plus grande confiance, facilité et satisfaction lorsqu'ils sont en 3D qu'en 2D. Cette sensibilité variable à la vision 2D et 3D, qui évolue selon le type d'expertise, peut être schématiquement illustrée par une courbe en U telle qu'illustrée par le graphique de la figure 3.

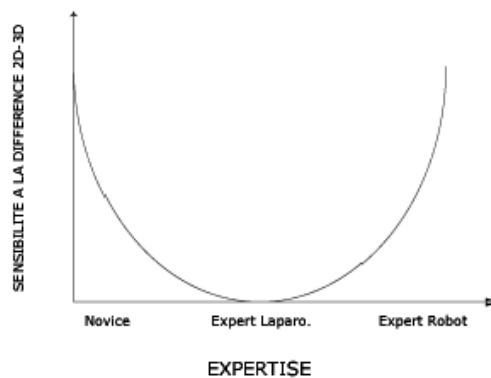


Figure 3 : **Illustration de la sensibilité à la différence 2D-3D selon le degré et le type d'expertise.** Ce graphique illustre, de façon schématique, les résultats que nous avons obtenus lors de l'étude 2 dans laquelle les sujets novices et les experts en chirurgie robotique montraient des performances différentes en 2D et 3D tandis que les chirurgiens experts en laparoscopie classique ne montraient pas (ou peu) de différences entre le 2D et le 3D.

Ces données retirées de l'étude de l'expertise nous permettent d'avancer plusieurs constatations qui ont des implications à un niveau à la fois théorique et pratique.

a) Compensation de la perte de profondeur en 2D chez les experts quelle que soit la complexité de la tâche

Tout d'abord, la faible sensibilité à la différence 2D-3D chez les experts en laparoscopie classique témoigne de l'acquisition et de l'utilisation de mécanismes de compensation efficaces leur permettant d'opérer à partir d'une image dépourvue d'indices binoculaires de profondeur. Ce résultat contraste avec certaines études qui ne montraient pas la mise en œuvre de tels mécanismes de compensation quand l'information binoculaire était absente (même chez des patients dépourvus de stéréoscopie depuis la naissance, Mazyn et al., 2004).

Ces données peuvent sembler en contradiction avec les résultats discutés au point 3.1. : on y montrait en effet que les sujets novices ne mettaient pas en place des processus de compensation dans des tâches complexes, lors de l'acquisition d'habiletés motrices (étude 3). Cette divergence apparente met au contraire en évidence la richesse et l'apport écologique de l'étude d'experts réels qui ont une pratique qui s'étend sur plusieurs années et qui n'est en rien comparable à un apprentissage « artificiel » tel que réalisé dans les études de laboratoire. Plusieurs auteurs ont en effet montré que l'utilisation efficiente des indices monoculaires requiert un apprentissage et une pratique considérables (Hernandez et al., 2004 ; Marotta et al., 1998 ; Chan et al., 1997), particulièrement dans des environnements complexes (Jackson et al., 1997). Nos études 2 (avec les experts) et 3 (avec les novices) illustrent ce propos de façon très contrastée : elles montrent d'un côté, une bonne utilisation des indices monoculaires chez les

experts et, de l'autre, une absence d'amélioration en vision 2D chez les novices. Ces résultats confirment donc la nécessité d'un long processus de formation pour parvenir à compenser la perte de l'information binoculaire en vision 2D.

Cette compensation nécessite la construction et l'utilisation d'une représentation qui pallierait le manque d'indices de profondeur utiles à l'action ; les résultats de l'étude 4 (qui analysait les types d'erreurs) suggèrent que cette représentation à partir d'une image 2D se construirait à travers l'action par essai et erreur¹¹⁵, par l'utilisation notamment des indices monoculaires picturaux, qui impliquent des processus de traitement conscients et donc coûteux en ressources.

Enfin, si ces mécanismes de compensation sont certes très efficaces et permettent une performance de qualité, ils ne mènent pas la performance des chirurgiens à son plus haut niveau, puisque celle-ci s'améliore encore avec une vision en 3D lorsque ces derniers sont experts en chirurgie robotique¹¹⁶.

b) Persistance des mécanismes de compensation acquis en 2D

Nos données montrent que cette pratique qui consiste à opérer à partir d'images en 2D est à ce point ancrée chez les chirurgiens experts en laparoscopie classique, que l'apport du 3D n'améliore pas significativement leurs performances (excepté pour une tâche). Ce résultat de prime abord surprenant témoigne de l'adoption d'une stratégie efficace mais conservatrice qui utilise majoritairement les indices monoculaires de profondeur : les indices binoculaires n'améliorent pas, dans notre étude, les performances des chirurgiens experts en laparoscopie classique. Au contraire, chez les chirurgiens experts en robotique, qui maîtrisent et exploitent tout d'abord beaucoup mieux les particularités instrumentales du robot que les autres, le retour d'une image en 3D les amène à réutiliser les indices binoculaires de profondeur, améliorant ainsi leur performance par rapport à la vision 2D. Cette différence qui réapparaît entre le 2D et le 3D chez les sujets experts en robotique est riche d'enseignement. Si la construction et l'utilisation d'une représentation efficace pallient les inconvénients de la vision 2D chez les experts en laparoscopie, le traitement de l'information en 2D reste toujours plus lent et moins efficace que celui de la vision 3D. Ce dernier est dès lors privilégié dès que les sujets recommencent à travailler à partir d'une image tridimensionnelle.

¹¹⁵ En tout cas, dans un premier temps, avec des sujets novices impliqués dans une tâche complexe.

¹¹⁶ Ces résultats rejoignent les conclusions d'autres études qui montrent que si les indices monoculaires permettent d'atteindre une bonne performance, celle-ci n'est cependant pas optimale (Mazyn et al., 2004).

Cette réutilisation significative des indices binoculaires dans l'action ne semble toutefois pas automatique, ni rapide, puisque les experts en laparoscopie classique n'en font que peu usage dans le laps de temps de la séance d'expérimentation¹¹⁷.

Par rapport aux différents modèles théoriques, le processus de compensation robuste mis en place par les chirurgiens experts pourrait trouver une illustration dans l'approche qui distingue les deux voies de traitement de l'information visuelle. Plusieurs auteurs ont en effet montré que le traitement de l'information visuo-motrice n'était pas l'apanage de la seule voie dorsale mais que la voie ventrale intervenait également dans le contrôle de l'action dans certaines conditions et particulièrement, dans les mouvements *mémorisés* (Jackson et al., 1997 ; Goodale et al., 1994¹¹⁸). Les chirurgiens experts en laparoscopie possèdent de nombreux gestes ou mouvements mémorisés (construits à partir d'une image 2D, de plus), qui dépendraient de la voie ventrale, laquelle est, en outre, spécialisée dans le traitement de l'information monoculaire. Leur performance serait plus guidée par des mécanismes *top down* (à partir des connaissances et des représentations pour l'action mémorisées), tandis que les sujets novices utiliseraient des processus *bottom up* et seraient plus influencés par la qualité de leur perception. En d'autres termes, l'action chez les experts en laparoscopie classique serait essentiellement dirigée et contrôlée de façon efficace par la voie ventrale, tandis que chez les sujets novices, les voies ventrale et dorsale seraient chacune respectivement activées en fonction du type d'information visuelle (2D ou 3D) et cela, de manière plus ou moins efficace. Les experts et les novices n'agiraient pas à partir d'une même représentation, ce qui rejoint notamment l'hypothèse de Castiello et al. (1998) selon laquelle il existerait deux représentations différentes, une en 2D et une en 3D, et que les actions menées en 2D et 3D seraient différentes pour arriver cependant à un même but.

c) Transfert des compétences acquises en laparoscopie vers le système robotique

En dépit de l'absence de différence entre le 2D et le 3D chez les experts en laparoscopie classique, ces derniers obtiennent des résultats similaires à ceux des chirurgiens experts en chirurgie robotique en vision 2D et meilleurs que ceux des sujets novices. Il

¹¹⁷ Une remarque méthodologique pourrait suggérer l'existence d'un biais selon lequel les chirurgiens experts en robotique connaissent et maîtrisent mieux le système que les autres, ce qui interviendrait dans les tendances que nous observons. Cependant, cette meilleure exploitation du système par les chirurgiens experts au robot doit s'exprimer aussi bien à travers de la performance en 2D qu'en 3D et ne remet donc pas en question les constats que nous émettons dans notre comparaison entre experts en laparoscopie classique et robotique.

¹¹⁸ Pour une explication plus détaillée, voir chapitre 2 de la partie théorique.

semblerait donc que les compétences acquises en laparoscopie classique puissent être en partie transférées pour l'utilisation du robot. Il est en effet reconnu que si l'expertise est finalisée et spécifique à un domaine (Leplat, 1991), elle possède également un caractère généralisable et peut être facilement transférable et étendue à des situations nouvelles (Gauthier et al., 1998), tendance que nous observons pour les experts en laparoscopie classique.

A ce niveau, il semblerait de nouveau que ce soit la « véritable » expertise qui permette un transfert adéquat des compétences : en effet, nos résultats aux études 1 et 3 avec des sujets novices montrent que ces derniers ne parviennent pas (ou difficilement) à transférer leurs habiletés nouvellement acquises vers une autre technique. En outre, leurs performances ne s'améliorent plus après un *switch* technique (étude 3) : les sujets montrent des difficultés pour s'adapter aux spécificités de la nouvelle technique et adoptent une stratégie conservatrice qui les empêche de progresser. Cette différence entre experts et novices au niveau du transfert des habiletés d'une technique à l'autre, met en évidence, d'un côté, la fragilité et le caractère circonstancié de l'apprentissage chez les novices et d'un autre côté, la généralisation des compétences à toutes sortes d'environnements chez les experts.

Toutefois, ce transfert d'expertise mis en évidence dans l'étude 2 peut être nuancé par les données provenant des études de terrain (étude 5) qui montrent que la généralisation de l'expertise dans une situation réelle, dynamique et donc plus complexe, pose plus de difficultés et demande un temps d'adaptation plus important, qui n'est pas observé lors de l'exécution de tâches en dehors de la salle d'opération (comme en témoignent le temps opératoire plus long, les communications plus nombreuses en chirurgie robotique ou l'adoption de stratégies conservatrices dans les manipulations mises en évidence par nos études de terrain et par Nyssen, 2004, 2000 et Notte, 2000). Dans le cas présent, la nuance suggérée par les études de terrain souligne l'intérêt de coupler recherches à caractère expérimental, qui permettent un contrôle des paramètres, et études de terrain afin d'enrichir et d'affiner les conclusions de tout travail de recherche.

d) Conclusion : la double expertise ou l'expertise à deux niveaux : la tâche et l'instrument

Cette analyse de la performance experte a mis en évidence l'existence de mécanismes de compensation en 2D et celle de capacités de transfert d'habiletés chez les experts. Cependant, une question fondamentale émerge à la lumière de nos données : comment l'expertise des chirurgiens experts en robotique se différencie-t-elle de celle des

chirurgiens experts en laparoscopie ? Se situe-t-elle au niveau de l'exécution de la tâche ou de l'utilisation de l'instrument ?

Nos données montrent que les chirurgiens experts en robotique et les chirurgiens experts en laparoscopie ont des performances similaires en laparoscopie classique, ce qui témoigne d'une expertise commune quant à la réalisation de la tâche, à la compensation de la perte des indices binoculaires et à l'utilisation des instruments de laparoscopie classique (cette expertise s'exprime notamment par une meilleure performance de l'ensemble des chirurgiens par rapport aux sujets novices en laparoscopie classique).

Par contre, lorsqu'ils utilisent le robot en 3D, les chirurgiens experts en robotique obtiennent de meilleurs résultats que les chirurgiens experts en laparoscopie. Cette différence observée avec le robot en 3D, alors qu'elle était absente en laparoscopie classique, témoigne de l'acquisition d'une expertise instrumentale spécifiquement liée à l'utilisation du robot : les chirurgiens experts en robotique se sont approprié l'instrument et ont développé une expertise supplémentaire complexe et spécifique au robot. En outre, nos données montrent que cette expertise liée à l'instrument dépend fortement des conditions habituelles d'utilisation de celui-ci (dans le cas présent, la vision 3D) : en effet, si les conditions habituelles ne sont pas remplies (par exemple, si le robot est en vision 2D), les performances des chirurgiens experts en robotique rejoignent celles des chirurgiens experts en laparoscopie, leur expertise liée à l'instrument disparaissant.

Par ailleurs, nos résultats montrent également que, malgré l'utilisation d'un instrument qu'ils ne connaissent pas, les experts en laparoscopie conservent une meilleure performance que les sujets novices quand ils utilisent le robot, ce qui témoigne d'une acquisition de compétences transversales exportables à différents instruments.

Avec la complexification des instruments, nous assistons donc à la création d'une double expertise : une liée au domaine et à la tâche à réaliser (qui permet notamment le transfert d'habiletés d'une technique à l'autre), et une autre relative à l'appropriation et à l'utilisation optimale de l'instrument. Cette dernière semble par ailleurs dépendre fortement des conditions habituelles d'utilisation de l'instrument (dans notre cas, la vision 3D). Enfin, cette expertise liée à l'instrument se construit et se développe dans un contexte bien précis en relation avec l'accomplissement de tâches spécifiques qui lui assurent un contenu.

3.4 *Les impressions subjectives des sujets*

La prise en compte des facteurs que sont la confiance (ou certitude), la satisfaction et la difficulté, est utile pour compléter notre analyse et enrichit celle-ci principalement à trois niveaux :

a) L'incertitude perceptive (Loftus, 2004)

Nos différentes études confirment que les sujets qui se trouvent dans une situation dépourvue d'indices binoculaires de profondeur et qui doivent agir à partir d'une vision en 2D, se sentent moins sûrs d'eux et ceci, quel que soit leur niveau d'expertise (les chirurgiens experts de notre échantillon montrant également une différence 2D-3D avec le robot¹¹⁹). En outre, nous montrons que la perte soudaine des indices binoculaires de profondeur provoque une chute importante de la confiance en soi lors du *switch* perceptif 3D-2D (étude 3). Par contre, le passage du 2D vers le 3D au robot ne procure aucune amélioration significative des impressions subjectives alors que la performance motrice s'améliore considérablement, témoignant ainsi de la prégnance du sentiment d'incertitude une fois qu'il est acquis¹²⁰ (persistance mise également en évidence par Muir et Moray, 1996).

Enfin, nos résultats précisent que le niveau d'incertitude ne dépend pas uniquement de la dimension perceptive (2D-3D) mais est aussi lié à la dimension instrumentale et à la connaissance et maîtrise qu'ont les sujets de la technologie qu'ils utilisent (métaconnaissances) : ainsi, l'ensemble des chirurgiens attribue un même niveau de certitude pour le robot en 3D et la laparoscopie, ce qui témoigne de l'existence d'une confiance dans les techniques qu'ils ont l'habitude d'utiliser (ce qui correspond à la notion de « confiance exocentrée », définie par Amalberti, 1996). En corollaire, nos résultats mettent en évidence la perte de cette assurance lorsqu'un changement substantiel survient et modifie la situation habituelle (par exemple, la vision 2D avec le robot à laquelle les chirurgiens experts en robotique ne sont pas habitués provoque une chute très importante de leurs sentiments de confiance, satisfaction et facilité, détérioration qui, en outre, est également observée au niveau des performances objectives).

¹¹⁹ Les chirurgiens experts en robotique sont ceux qui rapportent la plus grande différence en faveur de la vision 3D pour les sentiments de confiance, facilité et satisfaction. Ce sont eux également qui obtiennent les meilleurs scores au robot en vision 3D. Ces deux constatations confirment l'utilisation efficiente des métaconnaissances chez les sujets experts (Kruger et Dunning, 1999, 2002).

¹²⁰ Cette situation n'est pas rencontrée lors du passage 2D-3D en laparoscopie classique où l'amélioration des impressions est significative. Cependant, comme nous l'avons déjà souligné, les deux conditions en laparoscopie diffèrent par d'autres aspects qu'uniquement une différence 2D-3D (alors que les conditions 2D-3D du robot ne diffèrent que par la dimension perceptive).

b) La prise de risque

La confiance et les facteurs qui s'y rapportent (difficulté et satisfaction) sont des éléments fondamentaux qui contribuent à l'évaluation du risque par le sujet et donc, de manière générale, à la sécurité d'un système (Amalberti, 1996). La sensation de difficulté constitue en effet une prise de conscience globale, de la part du sujet, d'un risque de mise en échec du fait de la saturation de ses ressources cognitives (Amalberti, 1996). Elle émerge lorsque le sujet ne peut utiliser une procédure de traitement ou de conduite qu'il maîtrise. Nos résultats concernant la confiance discutés au paragraphe précédent mettent en évidence cette incertitude et difficulté, qui témoignent de la prise de conscience du risque face à des environnements inhabituels ou inconnus (que ce soit chez les experts ou les novices). Contrairement aux études qui n'obtiennent qu'une faible relation entre les mesures objectives et l'évaluation personnelle par le sujet de la difficulté (Burson et al., 2006), nous observons, même chez les sujets novices¹²¹, un lien de corrélation significatif entre leurs évaluations subjectives et leurs performances motrices ; ceci suggère une appréciation adéquate de la situation, en termes d'évaluation des compétences et de prise de risque.

c) L'acceptation d'une nouvelle technologie

Ce processus, qui peut sembler de prime abord être une préoccupation principalement commerciale, a pourtant un impact direct sur la performance des protagonistes et par la suite, sur leur bien-être ainsi que sur le fonctionnement et la sécurité d'un système (Carter et al., 2005 ; Marshall et al., 2001 ; Jones & Cale, 1997 ; Muir & Moray, 1996). A ce niveau, nos résultats montrent une acceptation généralement bonne du système robotique et cela, particulièrement lorsqu'il est en vision 3D. La différence d'appréciation entre la vision 2D et 3D témoigne que l'évaluation positive du système robotique dans le cadre de notre étude ne s'explique pas uniquement par un effet de nouveauté du robot mais qu'elle est aussi liée à la performance réelle, laquelle est, de manière générale, meilleure en 3D qu'en 2D.

¹²¹ Pourtant réputés pour surestimer leurs performances à cause de leur manque de métaconnaissances (Kruger et Dunning, 1999, 2002).

3.5 *Le robot chirurgical comme outil de formation ?*

Pour des raisons essentiellement économiques, éthiques et légales, de nombreux auteurs insistent sur la nécessité d'organiser des programmes de formation en dehors des salles d'opération, afin d'offrir aux futurs chirurgiens des environnements adéquats qui leur permettent d'acquérir les habiletés complexes que requiert la pratique chirurgicale (Vassiliou et al., 2005 ; Moorthy et al., 2003 ; Chiasson et al., 2003 ; Hamilton et al., 2002 ; Rattner et al., 2001 ; Haluck & Krummel, 2000 ; Scott et al., 2000). A ce sujet, plusieurs questions se sont posées quant à la place et à la fonction que pouvait remplir le robot *da Vinci* en matière de formation : ainsi, certains auteurs ont suggéré de l'utiliser comme nouvel instrument d'apprentissage (Yohannes et al., 2002). Nos différentes études peuvent procurer quelques éléments de réponse à cette problématique.

a) Transfert des habiletés

Nos études montrent que le transfert des habiletés nouvellement acquises chez des sujets novices ne s'opère pas sans difficultés lors du passage d'une technique de laparoscopie à une autre technique et cela, particulièrement lorsque le passage se réalise du système robotique vers la laparoscopie classique¹²². Cette dernière est en effet plus difficile à utiliser pour résoudre la plupart des tâches. A l'inverse, le robot (en 3D, particulièrement) bénéficie d'une telle transparence fonctionnelle qu'il permet une acquisition beaucoup plus rapide des habiletés.

Nos résultats mettent en évidence de très mauvaises performances après le *switch* technique, non seulement au niveau du score (études 1 et 3), mais également au niveau de la manipulation des instruments (étude 4, où des problèmes de manipulation importants surviennent en laparoscopie classique, quelle que soit la dimension visuelle). Au vu de ces données, il nous semble que le système robotique ne peut être utilisé comme unique outil de formation. Les habiletés les plus difficiles à acquérir sont en effet spécifiques aux instruments et mode de vision de la laparoscopie classique ; les séances d'entraînement devraient donc être prioritairement axées sur les habiletés requises en laparoscopie classique¹²³. Cette situation illustre la problématique plus générale de l'introduction et de l'adoption des nouvelles technologies, qui deviennent

¹²² Cette constatation est évidemment réalisée au niveau individuel, pour l'acquisition des compétences principalement visuo-motrices du chirurgien. Nous avons vu qu'au niveau organisationnel, le passage de la laparoscopie classique vers la chirurgie robotique pose de sérieuses difficultés dont il faut tenir compte en situation réelle.

¹²³ Les bonnes performances des chirurgiens experts en laparoscopie classique lorsqu'ils utilisent le système robotique (en simulation (étude 2) et en situation réelle (étude 5), vont d'ailleurs dans ce sens et témoignent du passage relativement aisé (avec quelques difficultés mineures et d'ordre surtout organisationnel) de la laparoscopie classique vers la robotique.

source de problèmes (et de risques) importants lorsque la situation impose un retour en arrière et l'utilisation d'une technique moins perfectionnée pour laquelle les habiletés, plus exigeantes et différentes (sur le plan perceptivo-moteur, du raisonnement et/ou des connaissances), ne sont pas ou plus maîtrisées.

Enfin, si la transparence fonctionnelle du robot chirurgical le rend facilement utilisable, nos résultats mettent en évidence le développement d'une véritable expertise liée à l'instrument et pas seulement à la réalisation des tâches (que ce soit en situation expérimentale, étude 2, ou en situation réelle, étude 5) : les chirurgiens experts en robotique (en 3D) ont en effet de meilleures performances dans cette condition que les autres, témoignant ainsi de l'existence d'une expertise spécifique dans l'utilisation du robot chirurgical. Cette observation souligne la nécessité d'introduire aussi des formations avec cette nouvelle technologie. Par ailleurs, nos observations sur le terrain et les difficultés organisationnelles liées à l'introduction du système robotique renforcent l'utilité de procéder à des formations sur le terrain pour le chirurgien mais aussi pour l'ensemble de l'équipe.

b) Bien-être des sujets

Nos études réalisées en situation expérimentale mettent toutes en évidence une amélioration dans l'impression de maîtrise et de progression chez les sujets novices. Dans l'étude 3, notamment, la confiance, la satisfaction et l'impression de facilité évoluent positivement avec l'apprentissage. Les réponses aux questions ouvertes montrent majoritairement la satisfaction des étudiants en médecine d'avoir participé à ces simulations expérimentales. L'ensemble de nos données confirme les conclusions des études qui insistent sur l'apport bénéfique des séances de simulation dans le cadre des formations (Hamilton et al., 2002 ; Issenberg et al., 1999 ; Nyssen, 1997 ; Melvin et al., 1996 ; Moray et al., 1995).

c) Tâches expérimentales adéquates

Une des difficultés majeures, à laquelle se heurte toute entreprise de formation dans un domaine complexe, est de trouver des tâches pertinentes et adaptées au public visé. Ces dernières ne doivent être ni trop faciles, ni trop complexes. Dans le cas de la chirurgie minimale invasive, cette difficulté est encore augmentée par le fait qu'une même tâche ne présente pas le même degré de complexité avec les différentes techniques et n'entraîne pas nécessairement les mêmes habiletés (par exemple, notre tâche de

familiarisation de l'étude 1 était trop simple en laparoscopie classique alors qu'elle présentait un certain degré de complexité avec le robot).

Nos tâches étaient issues et validées par différentes études (Scott et al., 2000, Derossis et al., 1998). Elles reprenaient un ensemble d'habiletés de base considérées comme élémentaires en chirurgie (« tâches primitives », Stone & McCloy, 2004 ; Gallagher & Satava, 2002 ; Derossis et al., 1998). Nous avons montré qu'elles étaient toutes sensibles à l'expertise chirurgicale (les experts étant meilleurs que les novices dans toutes les tâches), ce qui leur confère une certaine validité quant à leur rapport avec la pratique chirurgicale. Les résultats obtenus dans nos études suggèrent que les tâches et le type d'apprentissage doivent être différents et fonction de la technique chirurgicale utilisée. Nos observations mettent également en évidence la nécessité d'utiliser différents types de tâches pour exercer les diverses habiletés indispensables à la pratique chirurgicale. Dans le même ordre d'idées, Verwey et al. (2005) préconisent d'utiliser notamment des tâches avec des champs de tailles différentes. Cette suggestion rejoint notre commentaire concernant la condition de laparoscopie ouverte, que nous avons introduite dans notre plan expérimental (études 3 et 4), dans laquelle la vision complète du champ permettait une anticipation et planification de l'action qui n'était pas réalisable dans les autres conditions et qui participait ainsi à l'excellente performance enregistrée dans cette condition expérimentale.

4 RÉSUMÉ ET CONCLUSION DES IMPLICATIONS DE NOS RÉSULTATS

Notre étude a principalement mis en évidence que si les images en 3D procurent de manière générale de meilleures performances, ainsi qu'une plus grande confiance en soi, satisfaction et facilité, la sensibilité à la profondeur lors de l'interaction avec un environnement complexe n'est pas constante et dépend de l'intervention de plusieurs facteurs qui modifient (en réduisant ou en amplifiant) l'apport de la vision 3D. Les facteurs qui influencent le traitement de l'information de profondeur lors d'actions émises à partir d'images en 2D et 3D sont notamment la complexité de la tâche, l'expertise du sujet, l'instrument utilisé pour réaliser l'action, les mécanismes d'apprentissage et la taille du champ visuel (qui permet la mise en place de stratégies d'anticipation et de planification).

En résumé, des différents points abordés dans notre discussion, nous pouvons tirer des conclusions importantes qui relèvent à la fois des sphères théorique et pratique.

Sur le plan perceptif :

1° il existe des mécanismes qui permettent de compenser la perte des indices binoculaires lorsque l'image est en deux dimensions ; cependant, leur mise en œuvre efficace dépend des ressources disponibles (et donc en partie de la complexité de la tâche ainsi que des aspects instrumentaux mis à la disposition du sujet) et nécessite un long processus d'apprentissage (à travers l'action notamment par une pratique par essai et erreur¹²⁴).

2° les mécanismes de compensation mis en place à partir d'une image en 2D peuvent être tellement robustes que l'information tridimensionnelle n'apporte pas d'amélioration significative par rapport à la vision 2D.

Sur le plan instrumental :

1° la complexité d'une tâche ne dépend pas seulement de la nature de celle-ci mais aussi des caractéristiques de l'instrument utilisé et de l'environnement dans lequel l'action prend place

¹²⁴ Dans un premier temps, chez les novices en tout cas.

2° la nature de la tâche peut déterminer le choix et l'utilité d'une technique (par exemple, une tâche nécessitant de nombreux déplacements de caméra dans un site vaste n'a pas les mêmes exigences instrumentales qu'une tâche de microchirurgie qui demande une très grande précision et peu de mouvements de caméra)

3° avec la complexification des technologies, il se crée une double expertise lors des interactions avec un instrument, une liée à la tâche qui permet l'acquisition de compétences transversales utilisables avec différents instruments et une liée à l'utilisation d'un outil spécifique qui permet d'en exploiter au maximum tous les avantages et qui, contrairement au premier type d'expertise, dépend fortement des conditions habituelles d'utilisation de l'instrument.

5 LIMITES ET PERSPECTIVES DE NOTRE ÉTUDE

Notre recherche avait pour objectif de mettre en évidence les facteurs contextuels qui modulaient les différences de traitement des images en 2D et 3D pour l'action dans l'environnement complexe que représente la chirurgie minimale invasive. Notre étude comporte cependant une série de limites. En effet, plusieurs facteurs, autres que ceux que nous avons mis en évidence, doivent intervenir dans le traitement de l'information visuelle en 2D et 3D.

5.1 *Ecologie des tâches*

Les tâches que nous avons construites avaient pour caractéristique principale de porter sur les habiletés motrices élémentaires en chirurgie laparoscopique. Validées par d'autres études (Scott et al., 2000 ; Derossis et al., 1998), elles présentaient l'avantage d'être complètement identiques pour tous les sujets. Elles comportaient cependant plusieurs faiblesses.

Tout d'abord, si nos tâches étaient validées dans d'autres études et se sont montrées sensibles à l'expertise, nous n'avons toutefois pas procédé à une évaluation précise de leur validité. Nous n'avons pas non plus étudié le transfert de compétences qu'elles pouvaient amener en situation réelle, ni avec un autre matériel se rapprochant plus du corps humain (des organes d'animaux, par exemple).

Si nous avons essayé de construire les tâches les plus écologiques possibles, celles-ci ne représentaient pas toute la richesse et la complexité qui définissent la compétence chirurgicale. Cette dernière implique en effet un très grand nombre d'autres habiletés et

processus cognitifs de haut niveau qui n'ont pas été étudiés au sein de ce travail (tels que réaliser un diagnostic, prendre des décisions quant aux gestes à réaliser, identifier des organes, séparer des tissus...).

L'environnement expérimental de nos études réduisait considérablement la complexité de l'acte chirurgical en situation réelle. Plusieurs auteurs suggèrent à ce propos que les indices qui se trouvent dans l'environnement réel sont souvent plus nombreux, riches et efficaces que ceux reproduits en condition expérimentale (Watt & Bradshaw, 2000). Il se peut donc que les images réelles en laparoscopie procurent un plus grand nombre d'indices visuels et de points de repères que nos tâches inanimées (la texture, la couleur, les ombres...) et que certaines différences observées en situation expérimentale disparaissent alors en situation réelle.

5.2 *Les facteurs subjectifs et de personnalité*

Nous avons étudié les impressions subjectives des sujets mais cette investigation est restée assez générale ; elle ne comprend pas des notions également très importantes telles que la motivation et la personnalité. Il est en effet fort probable que des facteurs motivationnels ou de personnalité aient pu intervenir dans les performances que nous avons enregistrées. Ainsi, lors des sessions, certains sujets se sont présentés avec beaucoup d'entrain et d'enthousiasme à l'idée de pouvoir manipuler une nouvelle technologie ou à l'idée de participer à une étude. A l'inverse, d'autres sont venus contraints et se sont montrés d'emblée moins attirés par la manipulation de ces nouvelles technologies. Il se peut que cet aspect motivationnel ait joué sur leurs performances¹²⁵.

La personnalité a pu également jouer un rôle important : par exemple, nous avons remarqué que les sujets qui semblaient plus calmes, plus introvertis parvenaient parfois à maîtriser plus facilement le robot que des sujets plus vifs ou impulsifs. Les études sur l'influence des traits de personnalité sur l'erreur ou la performance ont montré des résultats assez décevants jusqu'à présent. Certaines composantes de personnalité telles que les styles cognitifs (avec des traits comme réflexion/impulsivité, fluidité/rigidité, dépendance/indépendance du champ) sont susceptibles de procurer un apport utile au domaine de la psychologie ergonomique (Leplat, 1997). Cependant, ce champ d'investigation n'est pas encore étudié.

¹²⁵ La motivation est un facteur multidimensionnel, difficilement appréhendable et qui ne peut être atteint qu'indirectement. L'absence de consensus autour d'une définition opérationnelle de ce concept explique notamment la méfiance entretenue par la psychologie ergonomique à l'égard des études sur la motivation (Leplat, 1997).

5.3 *L'influence des troubles perceptifs et les différences individuelles*

Dans l'ensemble de nos études, nous n'avons retenu que la performance de sujets ne présentant aucun déficit visuel¹²⁶. Il existe cependant de larges différences individuelles dans l'habileté à utiliser l'information de stéréoscopie pour évaluer la profondeur (Knill & Saunders, 2003 ; Westerman & Gribbin, 1998) et une partie de la population qui n'a pas de vision stéréoscopique interagit avec l'environnement à partir des indices monoculaires (Bingham & Pagano, 1998). Plusieurs auteurs ont ainsi étudié l'influence que pouvaient avoir certains troubles visuels sur le traitement de l'information monoculaire ou binoculaire : certains ont démontré la mise en place de mécanismes de compensation (Komachi et al., 1996 ; Marotta et al., 1995) alors que d'autres n'en ont montré aucune chez des sujets présentant des déficits dans la vision stéréoscopique (Mazyn et al., 2004). Les études examinaient cependant la performance de patients atteints de déficits très divers, ce qui peut expliquer ces résultats contradictoires. La difficulté de trouver une population homogène de sujets présentant des déficits visuels similaires et isolés constitue en effet l'obstacle majeur de ce type d'investigation.

Dans notre travail, l'investigation des mécanismes de compensation a été menée à partir de l'étude de la performance experte, qui constitue une autre méthode pour comprendre certains aspects du fonctionnement humain à partir des différences observées entre novices et experts.

5.4 *La dimension collective du travail*

L'étude des nouvelles technologies utilisées dans un milieu de travail complexe ne peut être réalisée au seul niveau de l'individu. La dimension écologique d'une recherche n'a pas pour unique objet les interactions de ce dernier avec l'instrument ; elle doit également prendre en considération l'environnement global. Cette analyse à un échelon supérieur constitue souvent une source d'information pertinente qui permet de nuancer ou d'enrichir des conclusions obtenues dans les conditions expérimentales « appauvries ». A ce propos, nos études à partir des communications nous révèlent que, contrairement à la laparoscopie classique, l'interface du robot ne semble plus se situer entre le chirurgien et le patient (notamment en raison de la facilité de manipulation et de la vision en 3D qui permet la réutilisation de mécanismes naturels d'interaction avec l'environnement) mais qu'elle s'est déplacée et reportée à un autre endroit : entre le chirurgien et le reste de l'équipe (plus particulièrement, le chirurgien qui l'assiste). Si la

¹²⁶ Nous avons contrôlé l'acuité visuelle, la stéréoscopie, les phories, la fusion d'images avec deux appareils de vision, le Visuotest et l'Ergovision d'Essilor®.

laparoscopie classique pose des problèmes majeurs au niveau des aspects perceptifs et instrumentaux¹²⁷, le robot, qui réduit fortement ces inconvénients et augmente les performances individuelles du chirurgien, introduit une distance entre les acteurs. Cette mise à distance provoque des modifications importantes au sein de la dynamique de l'équipe, comme en témoigne notre analyse des communications, qui ont des répercussions notamment au niveau de la conscience de la situation collective (Nyssen, 2001, 2000). Les sujets ont recours à la communication verbale, seul canal encore disponible avec le robot, pour construire une stratégie d'action commune à partir de référents visuels et d'instruments différents. Nous montrons dans nos études de terrain que si les acteurs utilisent intensivement ce canal quand ils ne sont pas encore habitués au système robotique, les communications de manipulation et d'orientation (liées à l'apprentissage) diminuent après une période d'adaptation tandis que les communications relatives aux ordres et confirmations restent fort présentes afin d'assurer une conscience de la situation commune.

Cependant, si nous avons abordé la dimension collective du travail au sein de la dernière étude, ce n'est que (trop) brièvement, cette approche étant, comme nous l'avons déjà soulignée, très enrichissante mais très complexe à appréhender et à exploiter. En outre, nos conclusions portent sur une nouvelle technologie complexe qui n'est encore utilisée que depuis peu et par un petit nombre de chirurgiens. Les nouvelles technologies modifient les connaissances, savoir-faire et modes opératifs dans la durée. Les évolutions futures (opérations à distance, le patient et le chirurgien ne se trouvant plus dans la même pièce, mouvements automatiques préenregistrés...) et l'utilisation plus massive de ce système peuvent conduire à des nouveaux problèmes typiquement associés à la réalité virtuelle ou à l'automatisation des processus (tels que la maladie de l'immersion, l'isolement, les difficultés de communication, l'absence de référents communs, l'absence de contrôle des processus, Nyssen, 2000, 2001), qui peuvent être à l'origine de nouvelles formes d'erreur humaine.

5.5 *Généralisation des résultats*

Enfin, la limite la plus importante de notre étude, qui constitue en même temps sa richesse, est qu'elle a été conduite dans un contexte très particulier, la chirurgie minimale invasive, et donc que la généralisation de nos résultats ne peut être opérée sans une grande prudence.

¹²⁷ Comme nous le montrons au travers de nos études ainsi que dans la large littérature chirurgicale qui y est consacrée (Hernandez et al., 2004).

La plupart de nos conclusions constituent en fait des pistes de recherches futures à exploiter avec un plus grand nombre de sujets (notamment pour l'étude concernant les experts), avec des variables et mesures complémentaires (par exemple, des systèmes d'enregistrement des mouvements afin d'en évaluer plus précisément la vitesse en décomposant les phases d'accélération, de réajustements...) et dans des contextes d'étude variés (comme l'aviation ou le domaine de l'architecture, par exemple).

PARTIE VI : CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'introduction du système Da Vinci, qui se distinguait par la possibilité d'opérer avec une vue en 3 dimensions, tout en bénéficiant d'une interface et de conditions de maniabilités très ergonomiques, a posé des questions très importantes auxquelles nous nous sommes efforcée de répondre dans cette étude. L'essentielle était, de manière très générale : dans le domaine chirurgical, le robot apporte-t-il de substantiels bénéfices ? La réponse sera nuancée, selon les aspects envisagés :

1° Dans les procédures opératoires, la littérature a démontré que le robot apportait incontestablement de grands bénéfices au patient par la précision du geste qu'il offre au chirurgien.

2° Le robot n'est toutefois pas un instrument de formation idéal et exclusif : si des impératifs techniques obligent des experts en robotique à abandonner cette condition pour retourner à la laparoscopie classique, on observe une chute des performances très significative. Ceci plaide pour une formation globale qui intègrera la familiarisation avec le robot, mais ne négligera pas pour la cause les techniques plus traditionnelles comme la laparoscopie classique.

3° Le robot s'est avéré un excellent médium pour améliorer notre connaissance de l'impact des facteurs perceptifs sur l'action, ainsi que des facteurs contextuels qui médiatisent ces derniers et les corrigent. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence que, si la différence 2D-3D pesait d'un poids fort lourd sur des sujets novices appelés à résoudre une tâche d'une certaine complexité, elle était nettement moins perceptible chez des chirurgiens experts en 2D qui savaient compenser la perte des indices binoculaires ; de même, la complexité de la tâche a une influence prépondérante, particulièrement sur des sujets novices dont les ressources attentionnelles sont absorbées par la résolution du problème, ce qui les empêche de mettre en œuvre des stratégies de compensation de la perte de la profondeur, comme la parallaxe de mouvement. Enfin, nos travaux ont permis de montrer que les bénéfices instrumentaux du robot ont parfois été plus grands que ceux apportés par la 3D : la facilité de manipulation du robot a été un facteur déterminant qui explique sa supériorité sur la laparoscopie classique.

Au final, le robot présente d'incontestables avantages et ouvre de nouvelles voies en matière opératoire (qualité des soins), en matière d'investigation (recherche fondamentale) et éventuellement de formation. Il serait prématuré d'affirmer que la chirurgie robotique sera la seule qui sera empruntée dans le futur ; à l'heure actuelle, la

CONCLUSION GENERALE

connaissance des techniques plus traditionnelles, comme celle de la laparoscopie classique ou celle de la chirurgie ouverte, continue en tout cas de s'imposer dans la formation actuelle des chirurgiens.

Nul doute qu'en matière chirurgicale, le robot Da Vinci ne représente encore qu'un pas timide dans des directions bien plus audacieuses, comme celle des opérations à distance, avec des opérateurs parfois séparés par des milliers de kilomètres et médiatisés par des technologies de pointe. Ces innovations sont sans aucun doute potentiellement prometteuses mais elles ne pourront pleinement déployer leurs bénéfices qu'au prix d'une analyse rigoureuse des implications ergonomiques et cognitives induites par les changements des conditions introduits dans le milieu du travail ou dans la boucle perception-action, selon le point de vue adopté.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abelson, R.P. (1981). Psychological status of the script concept. *American Psychologist*, 7, 715-729.
- Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception*, 30(2), 233-252.
- Aglioti, S., DeSouza, J. F., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, 5(6), 679-685.
- Allport, A. (1987). Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. In H. Heuer & A.F. Sanders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 395-419). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Paris : PUF.
- Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4(3), 324-330.
- Anastakis, D. J., Regehr, G., Reznick, R. K., Cusimano, M., Murnaghan, J., Brown, M., & Hutchison, C. (1999). Assessment of technical skills transfer from the bench training model to the human model. *American Journal of Surgery*, 177(2), 167-170.
- Anderson, J. (1982). Acquisition of cognitive skills. *Psychological Review*, 89, 386-406.
- Anderson, J. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. (1985). *Cognitive Psychology and its Implications*. New York: Freeman.
- Anderson, J. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, A.H., & Boyle, E.A. (1994). Forms of introduction in dialogues: their discourse context and communicative consequences. *Language and Cognitive Process*, 9, 101-122.
- Andreu, J.M., Cadière, G.B., & Gernay, O. (1999). Chirurgie laparoscopique en Afrique noire : L'appel de Dakar. *Le journal de Coelio-Chirurgie*, 31.
- Arditi, A., Holtzam, J., Kosslyn, S. (1988). Mental imagery and sensory experience in congenital blindness. *Neuropsychologia*, 26, 1-12.
- Arnold, P., Farrell, M. J., Pettifer, S., & West, A. J. (2002). Performance of a skilled motor task in virtual and real environments. *Ergonomics*, 45(5), 348-361.
- Aslin, R. N., & Jackson, R. W. (1979). Accommodative-convergence in young infants: Development of a synergistic sensory-motor system. *Canadian Journal of Psychology*, 33(4), 222-231.
- Atkins, J. E., Jacobs, R. A., & Knill, D. C. (2003). Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, 43(25), 2603-2613.
- Baber, C. (2006). Cognitive aspects of tool use. *Applied Ergonomics*, 37(1), 3-15.
- Bach-y-Rita, P., Tyler, M.E., & Kaczmarek, K.A. (2003). Seeing with the brain. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 15, 285-295.

BIBLIOGRAPHIE

- Backer Cave, C.B., Bost, P.R., & Cobb, R.E. (1996). Effects of color and pattern on implicit and explicit picture memory. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22 (3), 639-653.
- Badani, K. K., Bhandari, A., Tewari, A., & Menon, M. (2005). Comparison of two-dimensional and three-dimensional suturing: is there a difference in a robotic surgery setting? *Journal of Endourology*, 19(10), 1212-1215.
- Bannon, L. J. (1997). Activity theory. *Activity Reports Cotcos*, 7 p.
- Bannon, L. J., & Bodker, S. (1991). Beyond the interface: Encountering artifacts in use. In J.M. Carroll (Ed). *Designing interaction: Psychology at the human computer interface* (pp. 227 253). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Behrmann, M., & Ewell, C. (2003). Expertise in tactile pattern recognition. *Psychological Science*, 14(5), 480-486.
- Berber, E., & Siperstein, A.E. (2001). Understanding and optimizing laparoscopic videosystems. *Surgical Endoscopy*, 15, 781-787.
- Berry, D., & Broadbent, D. (1988). Interactive tasks and the implicit-explicit distinction. *British Journal of Psychology*, 79, 251-272.
- Biederman, I., & Cooper, E.E. (1992). Size invariance in visual object priming. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 18, 121-133.
- Biguer, B., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1984). The coordination of eye, head, and arm movements during reaching at a single visual target. *Experimental Brain Research*, 55, 462-469.
- Bingham, G. P., & Pagano, C. C. (1998). The necessity of a perception-action approach to definite distance perception: monocular distance perception to guide reaching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24(1), 145-168.
- Bingham, G. P., & Stassen, M. G. (1994). Monocular egocentric distance information generated by head movement. *Ecological Psychology*, 6(3), 219-238.
- Birkett, D.H., Josephs, L.G., & Este-McDonald, J. (1994). A new 3-D laparoscope in gastrointestinal surgery. *Surgical Endoscopy*, 8, 1448-1451.
- Blandin, Y., Proteau, L., & Alain, C. (1994). On the cognitive processes underlying contextual interference and observational learning. *Journal of Motor Behavior*, 26(1), 18-26.
- Boccasanta, P., Venturi, M., Reitano, M. C., Salamina, G., Rosati, R., Montorsi, M., Fichera, G., Strinna, M., & Peracchia, A. (1999). Laparotomic vs. laparoscopic rectopexy in complete rectal prolapse. *Digestive Surgery*, 16(5), 415-419.
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, 382, 252-255.
- Breedveld, P. & Wentink, M. (2001). Eye-hand coordination in laparoscopy – an overview of experiments and supporting aids. *Minimal Invasive Therapy and Allied Technology*, 10 (3), 155-162.
- Brenner, E., & Smeets, J. B. (1996). Size illusion influences how we lift but not how we grasp an object. *Experimental Brain Research*, 111(3), 473-476.

BIBLIOGRAPHIE

- Bridgeman, B., Lewis, S., Heit, G., & Nagle, M. (1979). Relation between cognitive and motor-oriented systems of visual position perception. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 5(4), 692-700.
- Bridges, M., & Diamond, D.L. (1999). The financial impact of teaching surgical residents in the operating room. *American Journal of Surgery*, 210, 118-121.
- Broderick, T. J., Harnett, B. M., Doarn, C. R., Rodas, E. B., & Merrell, R. C. (2001). Real-time Internet connections: implications for surgical decision making in laparoscopy. *Annals of Surgery*, 234(2), 165-171.
- Bruce, V., Green, P.R., & Georgeson, M.A. (1997). *Visual perception : Physiology, psychology, and ecology* (3rd ed.). Psychology Press.
- Bruce, V., Green, P.R., & Georgeson, M.A. (2003). *Visual perception : Physiology, psychology, and ecology* (4th ed.). Psychology Press.
- Brunaud, L., Bresler, L., Ayav, A., Tretou, S., Cormier, L., Klein, M., & Boissel, P. (2003). Quels sont les avantages de l'utilisation du système robotique DaVinci pour réaliser une surrenalectomie unilatérale ? Résultats préliminaires. *Annales de Chirurgie*, 128(8), 530-535.
- Bruno, N., & Cutting, J. E. (1988). Minimodularity and the perception of layout. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(2), 161-170.
- Brydges, R., Carnahan, H., & Dubrowski, A. (2005). Surface exploration using laparoscopic surgical instruments: the perception of surface roughness. *Ergonomics*, 48(7), 874-894.
- Burson, K. A., Larrick, R.P., & Klayman, J. (2006). Skilled or Unskilled, but Still Unaware of It: How Perceptions of Difficulty Drive Miscalibration in Relative Comparisons. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1, 60-77.
- Cadeddu, J.A., Stoianovici, D., & Kavoussi, L. R. (1997). Robotics in urologic surgery. *Urology*, 49(4), 501-507.
- Cadière, G.B. (1996). Chirurgie coelioscopique et tiers-monde. In J. Mouiel (Ed.), *Actualités Digestives Médico-Chirurgicales* (pp.183-185). Masson : Paris.
- Cadière, G.B., & Fernandez, H. (1995). Points de vue sur la Chirurgie Coelioscopique dans le Tiers-monde. *Annales de chirurgie*, 10, 875-877.
- Cadière, G.B., Fourtanier, G., Himpens, J., Rooze, M., Germa, O., & Martin, C. (1998). Anatomie laparoscopique virtuelle de la jonction oesogastrique. *Chirurgie*, 123, 580-587.
- Cadière, G.B., Himpens, J., & Bruyns, J. (1996). Laparoscopic surgery and the third world. *Surgical Endoscopy*, 10, 957-958.
- Cadière, G.B., Himpens, J., Germa, O., Izizaw, R., Degueldre, M., Vandromme, J., Capelluto, E., & Bruyns, J. (2001). Feasibility of robotic laparoscopic surgery: 146 cases. *World Journal of Surgery*, 25(11), 1467-1477.
- Cadière, G.B., Himpens, J., Germa, O., Lupinc, N., Degueldre, M., Vandromme, J., Izizaw, & Bruyns J. (2000). Chirurgie laparoscopique par robot : Faisabilité. A propos de 78 cas. *Le Journal de Coelio-Chirurgie*, 33, 42-48.

BIBLIOGRAPHIE

- Cadière, G.B., & Leroy, J. (1999). Principes généraux de la chirurgie laparoscopique. *Encyclopédie Médicale de Chirurgie* (Elsevier: Paris), Techniques chirurgicales – Appareil digestif, 40-050, 9p.
- Camarillo, D. B., Krummel, T. M., & Salisbury, J. K., Jr. (2004). Robotic technology in surgery: past, present, and future. *American Journal of Surgery*, 188(4A Suppl), 2S-15S.
- Campos, J.J., Langer, A., & Krowitz, A. (1970). Cardiac responses on the visual cliff in prelocomotor human infants. *Science*, 170, 196-197.
- Cao, C.G.L., & Milgram, P. (2000). Disorientation in minimal access surgery : a case study. *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*, 4, 169-172.
- Carey, D. P., Dijkerman, H. C., & Milner, A. D. (1998). Perception and action in depth. *Consciousness and Cognition*, 7(3), 438-453.
- Carpentier, A., Loulmet, D., Aupecle, B., Berrebi, A., & Relland, J. (1999). Computer-assisted cardiac surgery. *Lancet*, 353(9150), 379-380.
- Carter, M. B., Wesley, G., & Larson, G. M. (2005). Didactic lecture versus instructional standardized patient interaction in the surgical clerkship. *American Journal of Surgery*, 189(2), 243-248.
- Carthey, J., de Leval, M. R., & Reason, J. (2000). Understanding excellence in complex, dynamic medical systems. *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*, 4, 136-139.
- Castiello, U., Paulignan, Y., & Jeannerod, M. (1991). Temporal dissociation of motor responses and subjective awareness. *Brain*, 114, 2639-2655.
- Castiello, U., Bonfiglioli, C., & Bennett, K. (1998). Prehension movements and perceived object depth structure. *Perception & Psychophysics*, 60(4), 662-672.
- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environments. *Ergonomics*, 40(1), 28-50.
- Chan, A.C.W., Chung, S.C.S., Yim, A.P.C., Lau, J.Y.W., Ng, E.K.W., & Li, A.K.C. (1997). Comparison of two-dimensional vs three dimensional camera systems in laparoscopic surgery. *Surgical Endoscopy*, 11, 438-440.
- Chase, W.G., & Simon, H.A. (1973). The mind's eye in chess. In W.G. Chase (Ed.), *Visual information processing*. NY: New York Academic.
- Chiasson, P. M., Pace, D. E., Schlachta, C. M., Mamazza, J., & Poulin, E. C. (2003). Minimally invasive surgery training in Canada: A survey of general surgery. *Surgical Endoscopy*, 17, 371-377.
- Chitwood, W., & Krummel, T. M. (2004). Introduction: robotic surgery today and tomorrow. *The American Journal of Surgery*, 188, 1S.
- Collewijn, H., & Erkelens, C. J. (1990). Binocular eye movements and the perception of depth. *Review of Oculomotor Research*, 4, 213-261.
- Coull, J., Weir, P. L., Tremblay, L., Weeks, D. J., & Elliott, D. (2000). Monocular and binocular vision in the control of goal-directed movement. *Journal of Motor Behavior*, 32(4), 347-360.

BIBLIOGRAPHIE

- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999). Action for perception: A motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(6), 1673-1692.
- Crosthwaite, G., Chung, T., Dunkley, P., Shimi, S., & Cuschieri, A. (1995). Comparison of direct vision and electronic two- and three-dimensional display systems on surgical task efficiency in endoscopic surgery. *British Journal of Surgery*, 82, 849-851.
- Cuschieri, A. (1991). Minimal access surgery and the future of interventional laparoscopy. *American Journal of Surgery*, 161(3), 404-407.
- Cuschieri, A. (1995). Whither minimal access surgery: tribulations and expectations. *American Journal of Surgery*, 169(1), 9-19.
- Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 29(1), 27-36.
- Cutting, J. E., & Bruno, N. (1988). Additivity, subadditivity, and the use of visual information: A reply to Massaro (1988). *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(4), 422-424.
- Cutting, J. E., Bruno, N., Brady, N. P., & Moore, C. (1992). Selectivity, scope, and simplicity of models: a lesson from fitting judgments of perceived depth. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(3), 364-381.
- Darzi, A., Datta, V., & Mackay, S. (2001). The challenge of objective assessment of surgical skill. *American Journal of Surgery*, 181(6), 484-486.
- Dawson, S.L. & Kaufman, J.A. (1998). The imperative for medical simulation. *Proceedings of the IEEE*, 86(3), 479-483.
- Decortis, F., Noirfalise, S., & Saudelli, B. (2000). Activity theory, cognitive ergonomics and distributed cognition: Three views of a transport company. *International Journal of Human Computer Studies*, 53(1), 5-33.
- Degueldre, M., Vandromme, J., Notte, D., & Mimouna, R. (2000). La téléchirurgie : Quels impacts au niveau ergonomique. *Conférence Ergo-IA*, 365-379.
- Degueldre, M., Vandromme, J., Huong, P.T., & Cadière, G.B. (2000). Robotically assisted laparoscopic microsurgical tubal reanastomosis: a feasibility study.. *Fertility and sterility*, 74(5), 1020-1023.
- Deibert, E., Kraut, M., Kremen, S., & Hart, J., Jr. (1999). Neural pathways in tactile object recognition. *Neurology*, 52(7), 1413-1417.
- De Keyser, V. & Nyssen, A.S. (1993). Les erreurs humaines en anesthésie. *Le Travail humain*, 56 (2,3), 243-266.
- De Montmollin, M. (1984). *L'intelligence de la tâche. Eléments d'ergonomie cognitive*. Berne: Peter Lang.
- Derossis, A.M., Fried, G.M., Abrahamowicz, M., Sigman, H.H., Barkun, J.S., & Meakins, J.L. (1998). Development of a model for training and evaluation of laparoscopic skills. *The American Journal of Surgery*, 175, 482-487.
- De Terssac, G., & Soubie, J.L. (1988). Des experts aux systèmes experts. *Le Travail Humain*, 51(2), 113-124.

BIBLIOGRAPHIE

- Didierjean, A. & Marmèche, E. (2005). Anticipatory representation of visual basketball scenes by novice and expert players. *Visual Cognition*, 12(2), 265-283.
- Dijkerman, H.C., Milner, A.D., & Carey, D.P. (1996). The perception and prehension of objects oriented in the depth plane. 1. Effects of visual form agnosia. *Experimental Brain Research*, 112, 442-451.
- Dion, Y.M., & Gaillard, F. (1997). Visual integration of data and basic motor skills under laparoscopy: Influence of 2-D and 3-D vide-camera systems. *Surgical Endoscopy*, 11, 995-1000.
- Domingez, C.O. (2001). Expertise in laparoscopic surgery : Anticipation and affordances. In E. Salas & Klein G. (Eds), *Linking expertise and naturalistic decision making*. (pp. 287-301). London : Lawrence Erlbaum Associates.
- Donini, A., Baccarani, U., Terrosu, G., Corno, V., Ermacora, A., Pasqualucci, A., & Bresadola, F. (1999). Laparoscopic vs open splenectomy in the management of hematologic diseases. *Surgical Endoscopy*, 13(12), 1220-1225.
- Doyon, J., Penhume, V., & Ungerleider, L.G. (2003). Distinct contributions of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41, 252-262.
- Dubois, E. (2001). *Chirurgie augmentée, un cas de réalité augmentée. Conception et réalisation centrées sur l'utilisateur*. Thèse de doctorat non publiée, Grenoble, France : Université de Grenoble I.
- Durgin, F. H., Proffitt, D. R., Olson, T. J., & Reinke, K. S. (1995). Comparing depth from motion with depth from binocular disparity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(3), 679-699.
- Easton, R. D., Greene, A. J., & Srinivas, K. (1997). Transfer between vision and haptics: Memory for 2-D patterns and 3-D objects. *Psychonomic Bulletin and Review*, 4(3), 403-410.
- Edelman, S., & Weinshall, D. (1991). A self-organizing multiple-view representation of 3D objects. *Biological Cybernetics*, 64(3), 209-219.
- Eimer, M. (2001). Crossmodal links in spatial attention between vision, audition, and touch: Evidence from event-related brain potentials. *Neuropsychologia*, 39(12), 1292-1303.
- Ellis, S. R., & Menges, B. M. (1998). Localization of virtual objects in the near visual field. *Human Factors*, 40(3), 415-431.
- Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 65-84.
- Eriksson, E. S. (1974). A theory of veridical space perception. *Scandinavian Journal of Psychology*, 15(3), 225-235.
- Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance. Its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49(8), 725-747.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term Working memory. *Psychological Review*, 102 (2), 211-245.

BIBLIOGRAPHIE

- Ericsson, K. A., Krampe, R. Th., & Tesch-Römer, Cl.(1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100 (3), 363-406.
- Ericsson, K. A., & Lehman, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints . *Annual Review of Psychology*, 47, 273-305.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (1991). Prospects and limits of the empirical study of expertise: An introduction. In K.A. Ericsson, J. Smith (Eds.). *Towards a General Theory of Expertise* (pp. 1-38). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429-433.
- Fahle, M., & Henke-Fahle, S. (1996). Interobserver variance in perceptual performance and learning. *Investigation in Ophthalmological Vision Science*, 37(5), 869-877.
- Falcone, T., Goldberg, J. M., Margossian, H., & Stevens, L. (2000). Robotic-assisted laparoscopic microsurgical tubal anastomosis: a human pilot study. *Fertility and Sterility*, 73(5), 1040-1042.
- Falk, V., Mintz, D., Grünenfelder, J., Fann, J.I., & Burdon, T.A. (2001). Influence of three-dimensional vision on surgical telemanipulator performance. *Surgical Endoscopy*, 15, 1282-1288.
- Falzon, P. (1991). Les activités verbales dans le travail. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.). *Modèles en analyse du travail* (pp. 229-249). Liège : Mardaga.
- Falzon, P. (1994). Dialogues fonctionnels et activités collectives. *Le Travail Humain*, 57, 299-312.
- Farrington-Darby, T., & Wilson, J.R. (2006). The nature of expertise : A review. *Applied Ergonomics*, 37, 17-32.
- Faul, P. (1993). Video TUR: raising the gold standard. New aspects, techniques and tendencies to minimize invasiveness. *European Urology*, 24(2), 256-261.
- Fernandas, B.-H. R., Mills, J.-F., & Fleury, M.-T.-L. (2005). Resources that drive performance: An empirical investigation. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 54(5-6), 340-354.
- Ferris, S.H. (1972). Motion parallax and absolute distance. *Journal of Experimental Psychology*, 95, 258-263.
- Flach, J.M., & Holden, J.G. (1998). The reality of experience: Gibson's way. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1), 90-95.
- Flückiger, M. & Klaue, K. (1991). *La perception de l'environnement*. Neuchâtel-Paris : Delachaux et Niestle.
- Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1981). How direct is visual perception? Some reflections on Gibson's "ecological approach." *Cognition*, 9(2), 139-196.
- Foley, J. M. (1977). Effect of distance information and range on two indices of visually perceived distance. *Perception*, 6(4), 449-460.
- Foley, J. M. (1978). Primary distance perception. In R. Held, H. Leibowitz & L. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology* (Vol. 8). Berlin: Springer-Verlag.

BIBLIOGRAPHIE

- Foley, J. M. (1980). Binocular distance perception. *Psychological Review*, 87(5), 411-434.
- Foley, J. M., & Held, R. (1972). Visually directed pointing as a function of target distance, direction, and available cues. *Perception and Psychophysics*, 12(3), 263-268.
- Foley, J. M., Ribeiro-Filho, N. P., & Da-Silva, J. A. (2004). Visual perception of extent and the geometry of visual space. *Vision Research*, 44(2), 147-156.
- Foley, J. M., & Richards, W. (1972). Effects of voluntary eye movement and convergence on the binocular appreciation of depth. *Perception and Psychophysics*, 11(6), 423-427.
- Forbes, T.L., DeRose, G., Kribs, S.W., & Harris, K.A. (2004). Cumulative sum failure analysis of the learning curve with endovascular abdominal aortic aneurysm repair. *Journal of Vascular Surgery*, 39, 102-108.
- Gabrieli, J. D. E., Corkin, S., Mickel, S. F., & Growdon, J. H. (1993). Intact acquisition and long-term retention of mirror-tracing skill in Alzheimer's disease and in global amnesia. *Behavioral Neuroscience*, 107(6), 899-910.
- Gaillard, J.P. (1993). Analyse fonctionnelle de la boucle de commande en télémanipulation. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 161-181). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).
- Gallagher, A.G., Cowie, R., Crothers, I., Jordon-Black, J.A., & Satava, R.M. (2003). PicSOR: An objective test of perceptual skill that predicts laparoscopic technical skill in three initial studies of laparoscopic performance. *Surgical Endoscopy*, 17, 1468-1471.
- Gallagher, A.G., McClure, N., McGuigan, J., Crothers, I., & Browning, J. (1999). Virtual reality training in laparoscopic surgery: a preliminary assessment of minimally invasive surgical trainer virtual reality (MIST VR). *Endoscopy*, 31(4), 310-313.
- Gallagher, A.G., Ritter, E.M., & Satava, R.M. (2003). Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surgical Endoscopy*, 17, 1525-1529.
- Gallagher, A.G., & Satava, R. M. (2002). Virtual reality as a metric for the assessment of laparoscopic psychomotor skills. Learning curves and reliability measures. *Surgical Endoscopy*, 16(12), 1746-1752.
- Garcia-Ruiz, A., Gagner, M., Miller, J.H., Steiner, C.P., & Hahn, J.F. (1998). Manual vs robotically assisted laparoscopic surgery in the performance of basic manipulation and suturing tasks. *Archive of Surgery*, 133, 957-961.
- Gauthier, I., & Tarr, M. J. (2002). Unraveling mechanisms for expert object recognition: Bridging brain activity and behavior. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(2), 431-446.
- Gauthier, I., Williams, P., Tarr, M., & Tanaka, J. (1998). Training greeble experts : A framework for studying expert object recognition processes. *Vision Research*, 38(15-16), 2401-2428.

BIBLIOGRAPHIE

- Geis, W.P. (1996). Head-mounted video monitor for global visual access in mini-invasive surgery. *Surgical Endoscopy*, *10*, 768-770.
- Gentilucci, M., Daprati, E., Gangitano, M., Saetti, M. C., & Toni, I. (1996). On orienting the hand to reach and grasp an object. *Neuroreport*, *7*(2), 589-592.
- Gentilucci, M., Roy, A. C., & Stefanini, S. (2004). Grasping an object naturally or with a tool: are these tasks guided by a common motor representation? *Experimental Brain Research*, *157*(4), 496-506.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glennerster, A., Rogers, B. J., & Bradshaw, M. F. (1998). Cues to viewing distance for stereoscopic depth constancy. *Perception*, *27*(11), 1357-1365.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1998). Expert chess memory: Revisiting the chunking hypothesis. *Memory*, *6*(3), 225-255.
- Gogel, W. C., & Tietz, J. D. (1973). Absolute motion parallax and the specific distance tendency. *Perception and Psychophysics*, *13*(2), 284-292.
- Gogel, W. C., & Tietz, J. D. (1979). A comparison of oculomotor and motion parallax cues of egocentric distance. *Vision Research*, *19*(10), 1161-1170.
- Goodale, M. A., & Haffenden, A. (1998). Frames of reference for perception and action in the human visual system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *22*(2), 161-172.
- Goodale, M. A., & Humphrey, G. K. (1998). The objects of action and perception. *Cognition*, *67*(1-2), 181-207.
- Goodale, M. A., & Humphrey, G. K. (2001). Separate visual systems for action and perception. In E. B. Goldstein (Ed), *Blackwell Handbook of sensation and perception* (pp. 311-343). Padstow: Blackwell Publishing: Handbooks of experimental psychology.
- Goodale, M.A., Jacobson, L.S., & Keillor, J.M. (1994). Differences in the visual control of pantomimed and natural grasping movements. *Neuropsychologia*, *32*(10), 1159-1178.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20-25.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, *349*(6305), 154-156.
- Goodale, M. A., Pelisson, D., & Prablanc, C. (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature*, *320*(6064), 748-750.
- Gordon, F.R., & Yonas, A. (1976). Sensitivity to binocular depth information in infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *22*, 413-422.
- Greenwald, H. S., Knill, D. C., & Saunders, J. A. (2005). Integrating visual cues for motor control: a matter of time. *Vision Research*, *45*(15), 1975-1989.
- Gregory, R.L. (1963). Distorsion of visual space as inappropriate constancy scaling. *Nature*, *199*, 678-691.

BIBLIOGRAPHIE

- Gregory, R.L. (1970). *The intelligent eye*. New York: McGraw Hill.
- Grimbergen, K.A. (1997). Minimally invasive surgery : Human-machine aspects and engineering approaches, 223-231.
- Grosjean, M., & Prinz (2005). Interactions between perception and action. *Proceedings of 9th European Congress of Psychology*, 3-8 July, Granada, Spain.
- Grusenmeyer, C., & Trognon, A. (1997). Les mécanismes coopératifs en jeu dans les communications de travail: un cadre méthodologique. *Le Travail Humain*, 60(1), 5-31.
- Grusser, O.J. (1983). Multimodal structure of the extrapersonal space. In A. Hein & M. Jeannerod (Eds.), *Spatially oriented behavior* (pp. 327-352). Cambridge, MA : MIT Press.
- Haluck, R. S., & Krummel, T. M. (2000). Computers and virtual reality for surgical education in the 21st century. *Archives of Surgery*, 135(7), 786-792.
- Hamilton, E.C., Scott, D.J., Fleming, J.B., Rege, R.V., Laycock, R., Bergen, P.C., Tesfay, S.T., & Jones, D.B. (2002). Comparison of video trainer and virtual reality training systems on acquisition of laparoscopic skills. *Surgical Endoscopy*, 16, 406-411.
- Hamilton, R.H., & Pascual-Leone, A. (1998). Cortical plasticity associated with braille learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 168-174.
- Hanna, G.B., Shimi, S. M., & Cuschieri, A. (1997). Influence of direction of view, target-to-endoscope distance and manipulation angle on endoscopic knot tying. *British Journal of Surgery*, 84(10), 1460-1464.
- Hanna, G.B., Shimi, S.M., & Cuschieri, A. (1998). Randomised study of influence of two-dimensional versus three-dimensional imaging on performance of laparoscopic cholecystectomy. *Lancet*, 351, 248-51.
- Heller, M.A. (2002). Tactile picture perception in sighted and blind people. *Behavioral Brain Research*, 135, 65-68.
- Hernandez, J. D., Bann, S. D., Munz, Y., Moorthy, K., Datta, V., Martin, S., Dosis, A., Bello, F., Darzi, A., & Rockall, T. (2004). Qualitative and quantitative analysis of the learning curve of a simulated surgical task on the da Vinci system. *Surgical Endoscopy*, 18(3), 372-378.
- Hillis, J. M., Ernst, M. O., Banks, M. S., & Landy, M. S. (2002). Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between, senses. *Science*, 298(5598), 1627-1630.
- Hillis, J. M., Watt, S. J., Landy, M. S., & Banks, M. S. (2004). Slant from texture and disparity cues: Optimal cue combination. *Journal of Vision*, 4(12), 967-992.
- Hommel, B., Musseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849-937.
- Hommel, B., & Schneider, W. X. (2002). Visual attention and manual response selection: Distinct mechanisms operating on the same codes. *Visual cognition*, 9(4/5), 392-420.

BIBLIOGRAPHIE

- Hong, E. (1999). Test anxiety, perceived test difficulty, and test performance: temporal patterns of their effects. *Learning and Individual Differences, 11*(4), 431-447.
- Howard, I.P. (2002). *Seeing in depth, Volume 1: Basic mechanisms*. Toronto, Canada: I Porteous.
- Howard, I.P., & Rogers, B.J. (1995). *Binocular vision and stereopsis*. New York: Oxford University Press.
- Howard, I.P., & Rogers, B.J. (2002). *Seeing in Depth, Volume 2: Depth Perception*. Toronto, Canada: I. Porteous.
- Hubens, G., Coveliers, H., Balliu, L., Ruppert, M., & Vaneerdeweg, W. (2003). A performance study comparing manual and robotically assisted laparoscopic surgery using the da Vinci system. *Surgical Endoscopy, 17*, 1595-1599
- Huber, J.W., Taffinder, N., Russell, R.C.G., & Darzi, A. (2003). The effects of different viewing conditions on performance in simulated minimal access surgery. *Ergonomics, 46*(10), 999-1016.
- Humphreys, G. W., Forde, E.M.E., Francis, D., Carlson, R.A., Son, M.H., & Burgess, P.W. (2000). Control of multistep tasks. In S. Monsell & J. Driver (Eds.). *Control of cognitive processes: Attention and performance XVIII* (pp. 425-472). Cambridge, MA, US: MIT Press. Xvi.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (2001). Detection by action : Evidence for affordances in search in neglect. *Nature Neuroscience, 4*, 84-88.
- Humphreys, G. W., Riddoch, M. J., Forti, S., & Ackroyd, K. (2004). Action influences spatial perception: Neuropsychological evidence. *Visual Cognition, 11*(2-3), 401-427.
- Hunter, J.G. (2001). Clinical trials and the development of laparoscopic surgery, *Surgical Endoscopy, 15*, 1-3.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge, MA:MIT Press.
- Issenberg, S. B., McGaghie, W.-C., Hart, I.-R., Mayer, J.-W., Felner, J.-M., Petrusa, E.-R., Waugh, R.-A., Brown, D.-D., Safford, R.-R., Gessner, I.-H., Gordon, D.-L., & Ewy, G.-A. (1999). Simulation technology for health care professional skills training and assessment. *JAMA: Journal of the American Medical Association, 282*(9), 861-866.
- Jackson, S. R., Jones, C. A., Newport, R., & Pritchard, C. (1997). A kinematic analysis of goal-directed prehension movements executed under binocular, monocular, and memory-guided viewing conditions. *Visual Cognition, 4*(2), 113-142.
- Jakobson, L. S., & Goodale, M. A. (1991). Factors affecting higher-order movement planning: a kinematic analysis of human prehension. *Experimental Brain Research, 86*(1), 199-208.
- James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Servos, P., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2002). Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia, 40*(10), 1706-1714.
- Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior, 16*, 235-254.

BIBLIOGRAPHIE

- Jeannerod, M., Decety, J., & Michel, F. (1994). Impairment of grasping movements following a bilateral posterior parietal lesion. *Neuropsychologia*, 32(4), 369-380.
- Jeannerod, M., & Jacob, P. (2005). Visual cognition: A new look at the two-visual systems model. *Neuropsychologia*, 43(2), 301-312.
- Jeannerod, M., & Rossetti, Y. (1993). Visuomotor coordination as a dissociable visual function: experimental and clinical evidence. *Baillieres Clin Neurol*, 2(2), 439-460.
- Johansson, G. (1973). Monocular movement parallax and near-space perception. *Perception*, 2, 135-246.
- Johnson-Frey, S. H. (2003). What's so special about human tool use? *Neuron*, 39(2), 201-204.
- Johnston, E.B. (1991). Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, 31, 1351-1360.
- Jones, G. (1990). A cognitive perspective on the processes underlying the relationship between stress and performance in sport. In G. Jones, & L. Hardy, (Eds.) *Stress and performance in sport* (pp. 17-42). Chichester, UK: Wiley.
- Jones, D.B., Brewer, J.D., & Soper, N.J. (1996). The influence of three-dimensional video systems on laparoscopic task performance. *Surgical Endoscopy*, 6, 191-197.
- Jones, G., & Cale, A. (1997). Goal difficulty, anxiety and performance. *Ergonomics*, 40(3), 319-333.
- Jones, R., & VanLehn, K. (1994). Acquisition of children's addition strategies : a model of impasse-free knowledge-level learning. *Machine Learning*, 16, 11-36.
- Judge, S. J., & Bradford, C. M. (1988). Adaptation to telestereoscopic viewing measured by one-handed ball-catching performance. *Perception*, 17(6), 783-802.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. Oxford, England: Chicago Press.
- Kaptelinin, V., Kuutti, K., & Bannon, L. (1995). Activity theory: Basic concepts and applications. In B. Blumenthal, J. Gornostaev & C. Unger (Eds). *Proceedings of the 5th Internation Conference EW HCI'95* (pp.189-201). Berlin: Springer.
- Karni, A. (1996). The acquisition of perceptual and motor skills: A memory system in the adult human cortex. *Cognitive Brain Research*, 5(1-2), 39-48.
- Karni, A., & Sagi, D. (1993). The time course of learning a visual skill. *Nature*, 365, 250 – 252.
- Karmiloff-Smith, A. (1986). From meta-processes to conscious access: evidence from children's metalinguistic and repair data. *Cognition*, 23, 95-147.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J., & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 356-369.
- Knill, D. C., & Kersten, D. (2004). Visuomotor Sensitivity to Visual Information About Surface Orientation. *Journal of Neurophysiology*, 91(3), 1350-1366.
- Knill, D. C., & Saunders, J. A. (2003). Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant? *Vision Research*, 43(24), 2539-2558.

BIBLIOGRAPHIE

- Koffka, K. (1935). *Principles of gestalt psychology*. London, UK: Routledge & Kegan.
- Komachi, Y., Miyazaki, K., Murata, T., Nagata, S., & Kani, K. (1996). Stereopsis with normal and reversed binocular parallax using a head mounted display in normal and strabismic subjects. *Ergonomics*, 39(11), 1321-1329.
- Kruger, J., & Dunning, D. (1999). Unskilled and unaware of it: How difficulties in recognizing one's own incompetence lead to inflated self-assessments. *Journal of Personality and Social Psychology*, 77(6), 1121-1134.
- Kruger, J., & Dunning, D. (2002). Unskilled and unaware--but why? A reply to Krueger and Mueller (2002). *Journal of Personality and Social Psychology*, 82(2), 189-192.
- Kruyer, A., Marotta, J.J., & Goodale, M.A. (1997). Scene-based binocular cues improve grip trajectory accuracy. *Investigation in Ophthalmological Vision Science*, 38, 988.
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35(3), 389-412.
- LaPietra, A., Grossi, E. A., Derivaux, C. C., Applebaum, R. M., Hanjic, C. D., Ribakove, G. H., Galloway, A. C., Bittenheim, P. M., Steinberg, B. M., Culliford, A. T., & Colvin, S. B. (2000). Robotic-assisted instruments enhance minimally invasive mitral valve surgery. *Annals of Thoracic Surgery*, 70(3), 835-838.
- Lederman, S.J., & Klatzky, R.L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 342-368.
- Lederman, S.J., Thorne, G., & Jones, B. (1986). Perception of texture by vision and haptics: Multidimensionality and intersensory integration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 169-180.
- Lee, D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Leontiev, A. (1974). The problem of activity in psychology. *Soviet Psychology*, 13(2), 4-33.
- Leplat, J. (1991). Compétences et ergonomie. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.). *Modèles en analyse du travail* (pp. 229-249). Liège : Mardaga.
- Leplat, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail. Contribution à la psychologie ergonomique*. Paris : PUF (Le Travail Humain).
- Lessard, N., Pare, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, 395(6699), 278-280.
- Lewicki, P., Hill, T., & Czyzewska, M. (1992). Nonconscious acquisition of information. *American Psychologist*, 47(6), 796-801.
- Lo, K. W., & Yuen, P. (1999). Mortality following laparoscopic surgery. *Gynecologic and Obstetric Investigation*, 48(3), 203-204.
- Lobb, H. (1965). Vision versus touch in form discrimination. *Canadian Journal of Psychology*, 19(3), 157-187.
- Lobb, H. (1970). Asymmetrical transfer of form discrimination across sensory modalities in human adults. *Journal of Experimental Psychology*, 86, 350-354.

BIBLIOGRAPHIE

- Loftus, A., Servos, P., Goodale, M. A., Mendarozqueta, N., & Mon-Williams, M. (2004). When two eyes are better than one in prehension: monocular viewing and end-point variance. *Experimental Brain Research*, *158*(3), 317-327.
- Loomis, J. M., da Silva, J. A., Fujita, N., & Fukusima, S. S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception, and Performance*, *18*(4), 906-921.
- Loomis, J., & Knapp, J. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In L.J. Hettinger & M.W. Haas (Eds.). *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues* (pp. 21-46). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates.
- Macaluso, E., & Driver, J. (2001). Spatial attention and crossmodal interactions between vision and touch. *Neuropsychologia*, *39*(12), 1304-1316.
- Macaluso, E., & Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions: A window onto functional integration in the human brain. *Trends in Neurosciences*, *28*(5), 264-271.
- Mac-Mahon, M., Sheahan, N., Malone, J. F., & Coakley, D. (1994). Relation between aortic atherosclerosis and blood pressure. *Lancet*, *343*(8905).
- Marchal, F., Rauch, P., Vandromme, J., Laurent, I., Lobontiu, A., Ahcel, B., Verhaeghe, J. L., Meistelman, C., Degueldre, M., Villemot, J. P., & Guillemin, F. (2005). Telerobotic-assisted laparoscopic hysterectomy for benign and oncologic pathologies: initial clinical experience with 30 patients. *Surgical Endoscopy*, *19*(6), 826-831.
- Marchand, P., & Navarro, C. (1995). Dialog organization and functional communication, in a medical assistance task by phone. *Perceptual and Motor Skills*, *81*, 451-461.
- Marescaux, J., Leroy, J., Gagner, M., Rubino, F., Mutter, D., Vix, M., Butner, S. E., & Smith, M. K. (2001). Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, *413*(6854), 379-380.
- Marescaux, J., Leroy, J., Rubino, F., Smith, M., Vix, M., Simone, M., & Mutter, D. (2002). Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. *Annals of Surgery*, *235*(4), 487-492.
- Marotta, J. J., Behrmann, M., & Goodale, M. A. (1997). The removal of binocular cues disrupts the calibration of grasping in patients with visual form agnosia. *Experimental Brain Research*, *116*(1), 113-121.
- Marotta, J. J., DeSouza, J. F. X., Haffenden, A. M., & Goodale, M. A. (1998). Does a monocularly presented size-contrast illusion influence grip aperture? *Neuropsychologia*, *36*(6), 491-497.
- Marotta, J. J., & Goodale, M. A. (1998). The role of learned pictorial cues in the programming and control of grasping. *Experimental Brain Research*, *121*(4), 465-470.
- Marotta, J. J., Kruyer, A., & Goodale, M. A. (1998). The role of head movements in the control of manual prehension. *Experimental Brain Research*, *120*(1), 134-138.
- Marotta, J.J., Perrot, T.S., Nicolle, D., & Goodale, M. A. (1995a). The development of adaptative head movements following enucleation. *Eye*, *9*, 333-336.

BIBLIOGRAPHIE

- Marotta, J.J., Perrot, T.S., Nicolle, D., Servos, P., & Goodale, M.A. (1995b). Adapting to monocular vision: grasping with one eye. *Experimental Brain Research*, 104(1), 107-114.
- Marr, D. (1982). *Vision : A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. San Francisco : W.H. Freeman and Co.
- Marshall, R.L., Smith, J.S., Gorman, P.J., Krummel, T.M., Haluck, R.S., & Conney, R.N. (2001). Use of a human patient simulator in the development of resident trauma management skills. *Journal of Trauma*, 51, 17-21
- Martin, T. A., Keating, J. G., Goodkin, H. P., Bastian, A. J., & Thach, W. T. (1996). Throwing while looking through prisms. II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain*, 119(Pt 4), 1199-1211.
- Maurer, D., Le Grand, R., & Mondloch, C.J. (2002). The many faces on configural processing. *Trends in Cognitive Science*, 6, 255-260.
- Mazyn, L. I., Lenoir, M., Montagne, G., & Savelsbergh, G. J. (2004). The contribution of stereo vision to one-handed catching. *Experimental Brain Research*, 157(3), 383-390.
- McKee, S. P., Levi, D. M., & Bowne, S. F. (1990). The imprecision of stereopsis. *Vision Research*, 30(11), 1763-1779.
- Melvin, W. S., Johnson, J. A., & Ellison, E. C. (1996). Laparoscopic skills enhancement. *American Journal of Surgery*, 172(4), 377-379.
- Meulemans, T., & Van der Linden, M. (2003). Implicit learning of complex information in amnesia. *Brain & Cognition*, 52(2), 250-257.
- Milner, A.D., & Goodale, M.A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in Brain Research*, 95, 317-337.
- Milner, A. D., Perrett, D. I., Johnston, R. S., Benson, P. J., Jordan, T. R., Heeley, D. W., Bettucci, D., Mortara, F., Mutani, R., Terazzi, E., & et al. (1991). Perception and action in 'visual form agnosia'. *Brain*, 114(Pt 1B), 405-428.
- Mon-Williams, M., & Dijkerman, H. C. (1999). The use of vergence information in the programming of prehension. *Experimental Brain Research*, 128(4), 578-582.
- Mon-Williams, M., & Tresilian, J. R. (1999). Some recent studies on the extraretinal contribution to distance perception. *Perception*, 28(2), 167-181.
- Mon-Williams, M., Tresilian, J. R., McIntosh, R. D., & Milner, A. D. (2001). Monocular and binocular distance cues: insights from visual form agnosia I (of III). *Experimental Brain Research*, 139(2), 127-136.
- Mon-Williams, M., Tresilian, J. R., Plooy, A., Wann, J. P., & Broerse, J. (1997). Looking at the task in hand: vergence eye movements and perceived size. *Experimental Brain Research*, 117, 501-506.
- Mon-Williams, M., & Wann, J. P. (1998). Binocular virtual reality displays: When problems do and don't occur. *Human Factors*, 40(1), 42-49.

BIBLIOGRAPHIE

- Moorthy, K., Munz, Y., Dosis, A., Hernandez, J., Martin, S., Bello, F., Rockall, T., & Darzi, A. (2004). Dexterity enhancement with robotic surgery. *Surgical Endoscopy*, 18(5), 790-795.
- Moray, N.P., Hisques, D., Lee, J., & Muir, B.M. (1995). Trust and human intervention in automated systems. In J.-M. Hoc, P.C. Cacciabue & E. Hollnagel (Eds.), *Expertise and Technology*. Hillsdale: Erlbaum.
- Muir, B. M. (1994). Trust in automation. Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems, *Ergonomics*, 37, 1905-1922.
- Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in automation: II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, 39(3), 429-460.
- Müsseler, J., & Van der Heijden, A. H. C. (2004). Two spatial maps for perceived visual space: Evidence from relative mislocalizations. *Visual Cognition*, 11(2-3), 235-254.
- Müsseler, J., Van der Heijden, A. H. C., & Kerzel, D. (2004). Visual perception and action: Introductory remarks. *Visual Cognition*, 11(2-3), 129-136.
- Nardi, B.A. (1996). *Context and Consciousness : Activity Theory and Human-Computer Interaction*. Cambridge: MA MIT Press.
- Navarro, C., & Marchand, P.(1994). Analyse de l'échange verbal en situation de dialogue fonctionnel : Etude de cas. *Le Travail Humain*, 57(4), 313-330.
- Nio, D., Bemelman, W.A., den Boer, K.T., Dunker, M.S., Gouma, D.J., & van Gulik, T.M. (2001). Efficiency of manual vs robotic (Zeus) assisted laparoscopic surgery in the performance of standardized tasks. *Surgical Endoscopy*, 16, 412-415.
- Nissen, M., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognitive psychology*, 19, 1-32.
- Norman, D.A. (1983). Some observations on mental models. In D. Gentner & A.L. Stevens (Eds.), *Mental Models*. London: Lawrence Erlbaum.
- Norman, J. F., Norman, H. F., Clayton, A. M., Lianekhammy, J., & Zielke, G. (2004). The visual and haptic perception of natural object shape. *Perception and Psychophysics*, 66(2), 342-351.
- Notte, D., Nyssen, A.S., & De Keyser, V. (2000). Evaluation des techniques de chirurgie minimale invasive par robot : Premières constatations. *Actes de la conférence Ergo-IHM*, 3-6 octobre, Biarritz, France.
- Nyssen, A.S. (1997). *Vers une nouvelle approche de l'erreur humaine dans les systèmes complexes. Exploration des mécanismes de production de l'erreur en anesthésie*. Thèse de doctorat non publiée, Liège, Belgique : Université de Liège.
- Nyssen, A.S. (2000). *Application et diffusion de la méthodologie d'évaluation systémique des technologies de surveillance et de diagnostic d'anesthésie à un système de chirurgie minimale invasive par robot*. (Rapport de recherche sous la direction scientifique du Prof. V. De Keyser). Liège, Belgique : Université de Liège.
- Nyssen, A.S. (2001). *Analyse des transformations de connaissances et de stratégies d'action qui s'opèrent dans l'utilisation de la chirurgie minimale invasive*

BIBLIOGRAPHIE

- (laparoscopie, endoscopie, robot) en vue de réduire les risques d'erreurs et d'accidents médicaux. (Rapport de recherche sous la direction scientifique des Prof. V. De Keyser, J.P. Barroy et G.B. Cadière). Liège, Belgique : Université de Liège.
- Nyssen, A.S. (2004), Integration Cognitive and Collective Aspects of Work in Evaluating Technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*.
- Nyssen, A.S., & De Keyser, V. (1998). Improving training in problem solving skills: Analysis of anesthetists' performance in simulated problem situations. *Le Travail Humain*, 61(4), 387-402.
- O'Regan, J.K. & Noe, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939-1011.
- Pagano, C. C., & Bingham, G. P. (1998). Comparing measures of monocular distance perception: Verbal and reaching errors are not correlated. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(4), 1037-1051.
- Pasticier, G., Rietbergen, J. B., Guillonneau, B., Fromont, G., Menon, M., & Vallancien, G. (2001). Robotically assisted laparoscopic radical prostatectomy: feasibility study in men. *European Urology*, 40(1), 70-74.
- Patla, A. E., Niechwiej, E., Racco, V., & Goodale, M. A. (2002). Understanding the contribution of binocular vision to the control of adaptive locomotion. *Experimental Brain Research*, 142(4), 551-561.
- Pavani, F., Spence, C., & Driver, J. (2000). Visual capture of touch: Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological Science*, 11(5), 353-359.
- Pavese, A., & Buxbaum, L.J. (2002). Action matters : The role of action plans and object affordances in selection for action. *Visual cognition*, 9 (4/5), 559-590.
- Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., Phillips, C., Degueldre, C., Del-Fiore, G., Aerts, J., Luxen, A., & Maquet, P. (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44(3), 535-545.
- Peitgen, K., Walz, M.V., Holtmann, G., & Eigler, F.W. (1996). A prospective randomized experimental evaluation of three-dimensional imaging in laparoscopy. *Gastrointestinal Endoscopy*, 44(3), 262-267.
- Penhune, V. B., & Doyon, J. (2002). Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *Journal of Neuroscience*, 22(4), 1397-1406.
- Perriault, J. (1990). La logique de l'usage : Analyse à rebours de l'innovation. *La Recherche*, 218.
- Picard, D. (2006). Partial perceptual equivalence between vision and touch for texture information. *Acta Psychologica*, 121(3), 227-248.
- Pietrabissa, A., Scarcello, E., & Mosca, F. (1994). Three-dimensional versus two-dimensional video system for the trained endoscopic surgeon and the beginner. *Endoscopic Surgery*, 2, 315-317.
- Pisella, L., Grea, H., Tilikete, C., Vighetto, A., Desmurget, M., Rode, G., Boisson, D., & Rossetti, Y. (2000). An 'automatic pilot' for the hand in human posterior

BIBLIOGRAPHIE

- parietal cortex: Toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neuroscience*, 3(7), 729-736.
- Pizlo, Z., Li, Y., & Francis, G. (2005). A new look at binocular stereopsis. *Vision Research*, 45(17), 2244-2255.
- Pliske, R.M., McCloskey, & Klein, G. (2001). Decision skills training : facilitating learning from experience. In E. Salas & G. Klein (Eds.). *Linking expertise and naturalistic decision making* (pp. 37-53). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Posner, M. I., DiGirolamo, G. J., & Fernandez Duque, D. (1997). Brain mechanisms of cognitive skills. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 6(2-3), 267-290.
- Poyet, C. (1993). Les modes de dialogue homme-robot, aides ou obstacles aux représentations du mouvement. . In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 139-159). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).
- Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *Journal of Neurophysiology*, 67(2), 455-469.
- Prasad, S.M., Maniar, H.S., Soper, N.J., Damasio, R.J., & Klingensmith, M.E. (2002). The effect of robotic assistance on learning curves for basic laparoscopic skills. *American Journal of Surgery*, 183, 702-707
- Previc, F. H. (1990). Visual processing in three-dimensional space: Perceptions and misperceptions. *Behavioral and Brain Sciences*, 13, 599-566.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological Bulletin*, 124(2), 123-164.
- Pylyshyn, Z.W. (1999). Is vision continuous with cognition ? The case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioural and Brain Sciences*, 22, 341-365.
- Rabardel, P. (1993). Microgenèse et fonctionnalité des représentations dans une activité avec instrument. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 113-137). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies : approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin.
- Rabin, J. (1995). Two eyes are better than one: binocular enhancement in the contrast domain. *Ophthalmic Physiol Opt*, 15(1), 45-48.
- Rabinowitz, M., & Goldberg, N. (1995). Evaluating the structure-process hypothesis. In F.E. Weinert, & W. Schneider (Eds). *Memory performance and competencies: Issues in growth and development*. (pp. 225 242). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ramsay, J., Campbell, J. L., Schroter, S., Green, J., & Roland, M. (2000). The General Practice Assessment Survey (GPAS): tests of data quality and measurement properties. *Family Practice*, 17(5), 372-379.

BIBLIOGRAPHIE

- Rasmussen, J., & Vicente, K. J. (1989). Coping with human errors through system design: Implications for ecological interface design. *International Journal of Man Machine Studies*, 31(5), 517-534.
- Rattner, D.W., Apelgren, K.N., & Eubanks, W.S. (2001). The need for training opportunities in advanced laparoscopic surgery. *Surgical Endoscopy*, 15, 1066-1070.
- Rauschecker, J. P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends in Neurosciences*, 18(1), 36-43.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge : Cambridge university press.
- Reason, J. (1993). *L'erreur humaine*. Paris : Presses Universitaires de France
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118(3), 219-235.
- Reber, A. S., & Lewis, S. (1977). Implicit learning: An analysis of the form and structure of a body of tacit knowledge. *Cognition*, 5(4), 333-361.
- Reingold, E. M., Charness, N., Pomplun, M., & Stampe, D. M. (2001). Visual span in expert chess players: Evidence from eye movements. *Psychological Science*, 12(1), 48-55.
- Reingold, E. M., Charness, N., Schultetus, R. S., & Stampe, D. M. (2001). Perceptual automaticity in expert chess players: Parallel encoding of chess relations. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8(3), 504-510.
- Renier L. (2005), *Cognitive and brain mechanisms in sensory substitution : A contribution to the study of human perception*. Thèse de doctorat non publiée, Louvain-la-Neuve, Belgique, Université catholique de Louvain.
- Renier, L., Collignon, O., Tranduy, D., Vanlierde, A., & De Volder, A.G. (2003). Depth perception with a sensory substitution system in early blind subjects. *Annual Meeting of the Belgian Psychological Society*. (Universal Press) p. 36. May 23, Brussels, Belgium.
- Retaux, X. (2003). Presence in the environment : Theories, methodologies and applications to video games. *PsychoNology Journal*, 1(3), 283-309.
- Reznick, R. K. (1999). Virtual reality surgical simulators: feasible but valid? *Journal of the American College of Surgeons*, 189(1), 127-128.
- Reznick, R. K., Regehr, G., MacRae, H., Martin, J., & McCulloch, W. (1997). Testing technical skill via an innovative "bench station" examination. *The American Journal of Surgery*, 173, 226-230.
- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10(4), 380-388.
- Richardson, A. R., & Waller, D. (2005). The effect of feedback training on distance estimation in virtual environments. *Applied Cognitive Psychology*, 19(8), 1089-1108.
- Riddoch, M. J., Edwards, M.G., & Humphreys, G. W. (1998). Visual affordances direct action: Neuropsychological evidence from manual interference. *Cognitive Neuropsychology*, 15(6-7-8), 645-683.

BIBLIOGRAPHIE

- Riddoch, M. J., Humphreys, G. W., & Edwards, M. G. (2000). Neuropsychological evidence distinguishing object selection from action (effector) selection. *Cognitive Neuropsychology*, *17*(6), 547-562.
- Rikers, R., Winkel, W. T., Loyens, S., & Schmidt, H. (2003). Clinical case processing by medical experts and subexperts. *Journal of Psychology*, *137*(3), 213-223.
- Risucci, D. A. (2002). Visual spatial perception and surgical competence. *American Journal of Surgery*, *184*(3), 291-295.
- Rock, I. (1975). *An Introduction to Perception*. New York: MacMillan.
- Rock, I. (2001). *La perception*. Paris-Bruxelles : De Boeck.
- Rogalski, J., & Samurcay, R. (1993). Représentations de référence : outils pour le contrôle d'environnements dynamiques. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 183-207). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).
- Rogers, B.J., & Bradshaw, M.F. (1993). Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, *361*, 253-255.
- Rose, D., & Foreman, N. (1999). Virtual reality. *Psychologist*, *12*(11), 550-554.
- Rossetti, Y., & Coello, Y. (2000). Percevoir et agir: II. Contraintes temporelles des relations perception-action. *Psychologie Française*, *45*(4), 369-382.
- Rumelhart, D.E., & Norman, D.A. (1983). Representation in memory. In R.C. Atkinson, R.J. Herrnstein, G Lindzey, & R.D. Luce (Eds.). *Stevens' handbook of experimental psychology, Vol. 1: Perception and motivation; Vol. 2: Learning and cognition* (2nd ed., pp. 511-587). Oxford, England: John Wiley & Sons.
- Saeian, K., & Reddy, K. R. (1999). Diagnostic laparoscopy: an update. *Endoscopy*, *31*(1), 103-109.
- Sakai, K., Ogiya, M., & Hirai, Y. (2005). Perception of depth and motion from ambiguous binocular information. *Vision Research*, *45*(19), 2471-2480.
- Sakata, H., Taira, M., Murata, M, Gallese, Tanaka, Shikata, & Kusnunoki (1997). The parietal association cortex in depth perception and visual control of hand action. *Trends in Neurosciences*, *20*(8), 350-357.
- Sanocki, T. (1999). Constructing structural descriptions. *Visual Cognition*, *6*, 299-318.
- Satava, R. M. (1993). Virtual reality surgical simulator : the first steps. *Surgical endoscopy*, *7*, 203-205.
- Satava, R. M., & Ellis, S. R. (1994). Human interface technology. An essential tool for the modern surgeon. *Surgical Endoscopy*, *8*(7), 817-820.
- Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2003). Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Experimental Brain Research*, *152*(3), 341-352.
- Savoyant, A. (1977). Coordination et communication dans une équipe de travail. *Le Travail Humain*, *40*, 41-54.
- Savoyant, A. (1985). Conditions et moyens de la coordination interindividuelle d'opérations d'exécution sensori-motrices. *Le Travail Humain*, *48*, 59-79.

BIBLIOGRAPHIE

- Schacter, D. (1987). Implicit memory: History and current status. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and cognition*, 13, 501-518.
- Schacter, D. L., Chiu, C. Y. P., & Ochsner, K. N. (1993). Implicit memory: A selective review. *Annual Review of Neuroscience*, 16, 159-182.
- Schacter, D. L., & Cooper, L. A. (1993). Implicit and explicit memory for novel visual objects: Structure and function. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(5), 995-1009.
- Schacter, D. L., Cooper, L. A., & Delaney, S. M. (1990). Implicit memory for visual objects and the structural description system. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 28(4), 367-372.
- Schneider, G.E. (1969). Two visual system. *Science*, 163, 895-902.
- Schraagen, J. (1993). How experts solve a novel problem in experimental design. *Cognitive Science*, 17, 285-309.
- Schwartz, R. (2004). *Perception*. Padstow (Corwall): Blackwell Publishing (Blackwell Readings in Philosophy).
- Scott, D.J., Bergen, P.C., V Rege, R.V., Laycock, R., Tesfay, S.T., Valentine, R.J., Euhus, D.M., Jeyarajah, D.R., Thompson, W.M., & Jones, D.B. (2000). Laparoscopic training on bench models: Better and more cost effective than operating room experience? *Journal of the American College of Surgeons*, 191, 272-283.
- Seddon, G. M., Adeola, A., el Farra, A. O., & Oyediji, S. I. (1984). The responsiveness of students to pictorial depth cues and the understanding of diagrams of three-dimensional structures. *British Educational Research Journal*, 10(1), 49-62.
- Sellen, A. J., Kurtenbach, G.P., & Buxton, W.A.S. (1990). The role of visual and kinesthetic feedback in the prevention of mode errors. In Diaper and al. (Eds.), *Human-Computer Interaction* (pp. 667-673). North-Holland: Elsevier.
- Servos, P. (2000). Distance estimation in the visual and visuomotor systems. *Experimental Brain Research*, 130(1), 35-47.
- Servos, P., & Goodale, M. A. (1994). Binocular vision and the on-line control of human prehension. *Experimental Brain Research*, 98(1), 119-127.
- Servos, P., & Goodale, M. A. (1998). Monocular and binocular control of human interceptive movements. *Experimental Brain Research*, 119(1), 92-102.
- Servos, P., Goodale, M. A., & Jakobson, L. S. (1992). The role of binocular vision in prehension: A kinematic analysis. *Vision Research*, 32(8), 1513-1521.
- Shah, J., Mackay, S., Rockall, T., Vale, J., & Darzi, A. (2001). 'Urobotics': robots in urology. *BJU International*, 88(4), 313-320.
- Shah, J., Paul, I., Buckley, D., Davis, H., Frisby, J. P., & Darzi, A. (2003). Can tonic accommodation predict surgical performance? *Surgical Endoscopy*, 17(5), 787-790.
- Shah, J., Rockall, T., & Darzi, A. (2002). Robot-assisted laparoscopic Heller's cardiomyotomy. *Surgical Laparoscopy, Endoscopy and Percutaneous Techniques*, 12(1), 30-32.

BIBLIOGRAPHIE

- Shanteau, J. (1992). The psychology of experts: An alternative view. In G. Wright & F. Bolger (Eds.). *Expertise and decision support* (pp.11-23). New York: Plenum Press.
- Shea, J. A., Healey, M. J., Berlin, J. A., Clarke, J. R., Malet, P. F., Staroscik, R. N., Schwartz, J. S., & Williams, S. V. (1996). Mortality and complications associated with laparoscopic cholecystectomy. A meta-analysis. *Annals of Surgery*, 224(5), 609-620.
- Shikata, E., Tanaka, Y., Nakamura, H., Taira, M., & Sataka, H. (1995). Selectivity of parietal visual neurons in 3D orientation surface stereoscopic stimuli. *Society for Neuroscience Abstracts*, 21, 665.
- Sidhu, R.S., Tompa, D., Jang, R., Grober, E.D., Johnston, K.W., Reznick, R.K., & Hamstra, S.J. (2004). Interpretation of three-dimensional structure from two-dimensional endovascular images: Implications for educators in vascular surgery. *Journal of Vascular Surgery*, 39 (6), 1305-1311.
- Smith, C. D., Farrell, T. M., McNatt, S. S., & Metreveli, R. E. (2001). Assessing laparoscopic manipulative skills. *American Journal of Surgery*, 181(6), 547-550.
- Soechting, J. F., & Lacquaniti, F. (1983). Modification of trajectory of a pointing movement in response to a change in target location. *Journal of Neurophysiology*, 49(2), 548-564.
- Spence, C., Pavani, F., & Driver, J. (2000). Crossmodal links between vision and touch in covert endogenous spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(4), 1298-1319.
- Squire, L. R., Knowlton, B., & Musen, G. (1993). The structure and organization of memory. *Annual Review of Psychology*, 44, 453-495.
- Stanley, W. B., Mathews, R. C., Buss, R. R., & Kotler Cope, S. (1989). Insight without awareness: On the interaction of verbalization, instruction and practice in a simulated process control task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 41(3-A), 553-577.
- Stone, R., & McCloy, R. (2004). Ergonomics in medicine and surgery. *Bmj*, 328(7448), 1115-1118.
- Sun, R., Merrill, E., & Peterson, T. (2001). From implicit skills to explicit knowledge: A bottom-up model of skill learning. *Cognitive Science*, 25(2), 203-244.
- Sun, R. & Peterson, T. (1997). A hybrid model for learning sequential navigation. *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '97)*. Monterey, CA. (pp. 234-239).
- Sun, R. & Peterson, T. (1998). Autonomous learning of sequential tasks: experiments and analyses. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9 (6), 1217-1234.
- Sun, R., Peterson, T., & Merrill, E. (1996). Bottom-up skill learning in reactive sequential decision tasks. *Proceedings of the 18th Cognitive Science Society Conference*, 684-690. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Sung, G. T., & Gill, I. S. (2001). Robotic laparoscopic surgery: a comparison of the DA Vinci and Zeus systems. *Urology*, 58(6), 893-898.

BIBLIOGRAPHIE

- Taffinder, N., Smith, S.G.T., Huber, J., Russell, R.C.G., & Darzi, A. (1999). The effect of a second-generation 3D endoscope on the laparoscopic precision of novices and experienced surgeons. *Surgical Endoscopy*, *13*, 1087-1092.
- Takano, K., Ito, M., Kobayashi, K., Sonobe, N., Kurosu, S., Mori, Y., Takeuchi, S., Uchiyama, M., Kanno, M., & Niwa, S. (2002). Procedural memory in schizophrenia assessed using a mirror reading task. *Psychiatry Research*, *109*(3), 303-307.
- Tanaka, J. W., Curran, T., & Sheinberg, D. L. (2005). The training and transfer of real-world perceptual expertise. *Psychological Science*, *16* (2), 145-151.
- Theodorakis, Y. (1996). The influence of goals, commitment, self-efficacy and self-satisfaction on motor performance. *Journal of Applied Sport Psychology*, *8*(2), 171-182.
- Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M., & Beall, A. C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *13*, 560-571.
- Tipper, S. P., Howard, L. A., & Jackson, S. R. (1997). Selective reaching to grasp: Evidence for distractor interference effects. *Visual Cognition*, *4*(1), 1-38.
- Tittle, J. S., Todd, J. T., Perotti, V. J., & Norman, J. F. (1995). Systematic distortion of perceived three-dimensional structure from motion and binocular stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(3), 663-678.
- Todd, J. T., Tittle, J. S., & Norman, J. F. (1995). Distortions of three-dimensional space in the perceptual analysis of motion and stereo. *Perception*, *24*(1), 75-86.
- Traxer, O., Gettman, M. T., Napper, C. A., Scott, D. J., Jones, D. B., Roehrborn, C. G., Pearle, M. S., & Cadeddu, J. A. (2001). The impact of intense laparoscopic skills training on the operative performance of urology residents. *Journal of Urology*, *166*(5), 1658-1661.
- Tresilian, J. R., Mon-Williams, M., & Kelly, B. M. (1999). Increasing confidence in vergence as a cue to distance. *Proceedings Biological Sciences The Royal Society*, *266*(1414), 39-44.
- Trunkey, D. D., & Botney, R. (2001). Assessing competency: a tale of two professions. *Journal of the American College of Surgeons*, *192*(3), 385-395.
- Tucker, M., & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, *8*(6), 769-800.
- Tulving, E. (1995). Organization of memory: quo vadis? In M. S. Gazzaniga (Ed.). *The cognitive neurosciences* (pp. 839-847). Cambridge, MA: A Bradford Book, The MIT Press.
- Valot, C., Grau, J.-Y., & Amalberti R. (1993). Les métaconnaissances : des représentations de ses propres compétences. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 271-293). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).

BIBLIOGRAPHIE

- Van Bergen, P., Kunert, W., Bessell, J., & Buess, G.F. (1998). Comparative study of two-dimensional and three-dimensional vision systems for minimally invasive surgery. *Surgical Endoscopy*, *12*, 948-954.
- Van Der Linden, M. & Grailet, J.-M. (1998). Perception visuelle et mémoire à long terme. In Boucart, M., Hénaff, M.-A. & Belin C. (Eds.), *Vision : aspects perceptifs et cognitifs*. (pp. 229-247). Marseille: Solal (Collection neuropsychologie).
- Van Veelen, M. A., Goossens, R.H.M., Jakimowicz, J.J., Snijders, C.J., Jacobs, J.J., & Meijer, D.W. (2001). New ergonomics guidelines for laparoscopic instruments, *Minimal Invasive Therapy & Allied Technology*, *10* (3), 163-167.
- Vassiliou, M.C., Feldman, L.S., Andrew, C.G., Bergman, S., Leffondré, K., Stanbridge, D., & Fried, G. (2005). A global assessment tool for evaluation on intraoperative laparoscopic skills. *The American Journal of Surgery*, *190*, 107-113.
- Vermersch, P. (1993). Pensée privée et représentation dans l'action. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds). *Représentations pour l'action* (pp. 209-236). Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).
- Verwey, W., Stroomer, S., Lammens, R., Schulz, S., & Ehrenstein, W. (2005). Comparing endoscopic systems on two simulated tasks. *Ergonomics*, *48*(3), 270-287.
- Vishton, P. M., & Cutting, J. E. (1995). Wayfinding, displacements, and mental maps: velocity fields are not typically used to determine one's aimpoint. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(5), 978-995.
- Voorhorst, F.A., Overbeeke, K.J., & Smets, G.J.F. (1996). Using movement parallax for 3D laparoscopy. *Medical Progress in Technology*, *21*, 211-218
- Wagner, M. (1985). The metric of visual space. *Perception & Psychophysics*, *38*, 483-495.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2004). Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron*, *44*(1), 121-133.
- Waller, D. (1999). Factors affecting the perception of interobject distances in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *8*, 657-670.
- Ward, R. (2002), Independence and integration of perception and action: An introduction. *Visual cognition*, *2002*, *9* (4/5), 385-391.
- Waszak, F., & Gorea, A. (2004). A new look at the relationship between perceptual and motor responses. *Visual Cognition*, *11*(8), 947-963.
- Watt, S. J., & Bradshaw, M. F. (2000). Binocular cues are important in controlling the grasp but not the reach in natural prehension movements. *Neuropsychologia*, *38*(11), 1473-1481.
- Watt, S.J., Bradshaw, M. F., & Rushton, S.K. (1999). A restricted field of view affects reaching and grasping. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, *40*, 214.
- Weill-Fassina, A., Rabardel, P., & Dubois, D. (1993). *Représentations pour l'action*, Toulouse: Octares Editions (Collection Travail).

BIBLIOGRAPHIE

- Welch, R. B., Bridgeman, B., Anand, S., & Browman, K. E. (1993). Alternating prism exposure causes dual adaptation and generalization to a novel displacement. *Perception and Psychophysics*, 54(2), 195-204.
- Welch, R. B., & Post, R. B. (1996). Accuracy and adaptation of reaching and pointing in pitched visual environments. *Perception and Psychophysics*, 58(3), 383-389.
- Wentink, M., Breedveld, P., Meijer, D.W., & Stassen, H.G. (2000). Endoscopic camera rotation – a conceptual solution to improve hand-eye coordination in minimally invasive surgery. *Minimal Invasive Therapy and Allied Technology*, 9, 125-132.
- Wenzl, R., Lehner, R., Vry, U., Pateisky, P., Sevelde, P., & Husslein, P. (1994). Three-dimensional video-endoscopy: clinical use in gynaecological laparoscopy. *Lancet*, 344, 1621-1622.
- Westerman, S.J., & Cribbin, T. (1998). Individual differences in the use of depth cues: Implications for computer- and video-based tasks. *Acta Psychologica*, 99, 293-310.
- Wexler, M., Panerai, F., Lamouret, I., & Droulez, J. (2001). Self-motion and the perception of stationary objects. *Nature*, 85-88.
- Wickelgren, E. A., McConnell, D. S., & Bingham, G. P. (2000). Reaching measures of monocular distance perception: Forward versus side-to-side head movements and haptic feedback. *Perception and Psychophysics*, 62(5), 1051-1059.
- Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L., & Williams, J. G. (1992). Perception and action in sport. *Journal of Human Movement Studies*, 22, 147-204.
- Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review*, 105(3), 558-584.
- Willingham, D. B., Greenberg, A. R., & Thomas, R. C. (1997). Response-to-stimulus interval does not affect implicit motor sequence learning, but does affect performance. *Memory and Cognition*, 25(4), 534-542.
- Willingham, D. B., & Koroshetz, W. J. (1993). Evidence for dissociable motor skills in Huntington's disease patients. *Psychobiology*, 21(3), 173-182.
- Willingham, D.-B., Nissen, M.-J., & Bullemer, P. (1989). On the development of procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(6), 1047-1060.
- Witmer, B. G., & Kline, P. (1998). Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7, 144-167.
- Wuhr, P., & Musseler, J. (2002). Blindness to response-compatible stimuli in the psychological refractory period paradigm. *Visual Cognition*, 9(4-5), 421-457.
- Yohannes, P., Rotariu, P., Pinto, P., Smith, A. D., & Lee, B. R. (2002). Comparison of robotic versus laparoscopic skills: is there a difference in the learning curve? *Urology*, 60(1), 39-45.
- Z'Graggen, K., Wehrli, H., Metzger, A., Buehler, M., Frei, E., & Klaiber, C. (1998). Complications of laparoscopic cholecystectomy in Switzerland. A prospective 3-year study of 10,174 patients. Swiss Association of Laparoscopic and Thoracoscopic Surgery. *Surgical Endoscopy*, 12(11), 1303-1310.

ANNEXES

Définition des indices monoculaires picturaux

La perspective linéaire fait référence au fait que des lignes parallèles qui s'éloignent dans l'espace tridimensionnel se projettent comme des lignes convergentes sur l'œil (par exemple, les rails de chemin de fer).

Le gradient de densité texture, introduit par Gibson, peut être lié, dans notre cadre, à la perspective des détails qui illustre la perte des détails visibles d'objets éloignés du fait des limitations de l'acuité visuelle.

L'occlusion (interposition ou recouvrement d'objets¹²⁸) : le recouvrement partiel d'un objet par un autre conduit à l'impression que l'objet partiellement recouvert est plus éloigné que celui qui le recouvre.

La taille familière : quand nous sommes familiers avec la taille d'un objet, notre mémoire de la taille à différentes distances nous permet d'estimer sa distance, parce que sa taille et la distance sont inversement proportionnelles.

Selon la taille relative, un objet plus petit sera perçu comme plus éloigné qu'un autre plus grand.

Les ombres : l'ombre projetée est un indice de profondeur parce qu'elle nous aide à construire un plan qui ne serait autrement pas perçu.

L'élévation dans le champ visuel (ou perspective aérienne) : tendance des objets éloignés à être moins clairs, moins brillants à cause des impuretés de l'atmosphère.

¹²⁸ L'occlusion ne permettrait pas d'estimer la profondeur en soi, mais constituerait plutôt un indice ordinal de profondeur, dans le sens qu'il indiquerait un « ordre » de profondeur entre plusieurs objets (l'objet qui recouvre les autres étant plus proche de l'observateur que les objets recouverts). Cet indice serait dès lors utilisé de façon plus efficiente lorsqu'il est combiné à d'autres pour en diminuer l'ambiguïté que lorsqu'il est pris isolément (Bruce et al., 2003 ; Landy et al., 1995).

Les principes de l'organisation perceptive introduits par les psychologues gestaltistes

La distinction figure-fond vise à rendre compte des caractéristiques de la situation qui permettent à l'individu de définir un élément de l'environnement visuel comme figure se détachant du fond. Cette distinction est notamment permise par l'intervention des indices monoculaires tels que la taille, l'inclusion et l'orientation.

Le principe de la taille relative décrit le phénomène selon lequel la plus petite de deux surfaces est perçue comme la figure sur un fond plus grand, toutes choses étant égales par ailleurs.

Selon **le principe de proximité**, plus les éléments d'une scène sont proches les uns des autres, plus ils seront perçus comme groupés ensemble, formant une entité dans la scène.

Le **principe de similitude** explique que nous percevons des objets similaires comme appartenant à la même entité d'une scène.

Selon **le principe de (bonne) continuité**, l'organisation perceptive tend à préserver la continuité aux dépens des changements abrupts.

Selon **le principe du destin commun**, des éléments qui semblent se déplacer ensemble ont tendance à être perçus comme appartenant à un même ensemble.

Le principe de fermeture décrit la préférence des sujets à percevoir une organisation qui produit une figure fermée plutôt qu'une organisation qui produit une figure ouverte lorsque plusieurs organisations sont possibles.

Selon le principe d'orientation et de symétrie, les régions orientées horizontalement et verticalement sont préférentiellement perçues comme figure.

Le principe de symétrie illustre la préférence des sujets à organiser leur environnement de façon symétrique.

Selon **le principe de simplicité**, les personnes ont tendance à grouper les éléments d'un stimulus visuel de façon à produire l'interprétation la plus simple de ce stimulus.

Questionnaire avant les épreuves

Age :

Sexe :

Latéralité :

Problèmes visuels, lesquels ? :

Année d'étude :

Nombre de stages en chirurgie :

Type et durée des stages en chirurgie :

Quand ont-ils eu lieu ? :

Au cours de vos stages, combien de fois avez-vous réalisé les tâches suivantes ?

tenir les instruments en chirurgie ouverte

tenir les instruments en chirurgie laparoscopique

tenir la caméra

réaliser un acte chirurgical (suture ou autre) seul en chirurgie ouverte

Si oui, lequel ?

réaliser un acte chirurgical (suture ou autre) seul en chirurgie laparoscopique

Si oui, lequel ?

Combien de nœuds avez-vous déjà réalisés ?

Avez-vous déjà travaillé avec le robot ? Oui - Non

Avez-vous ou jouez-vous avec des jeux vidéo (avec joysticks) ?

Jamais - /jour - /semaine

Questionnaire après les quatre épreuves
--

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

1. Replacer des chiffres et lettres					
Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
2. Passer un fil dans des anneaux					
Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
3. Découper un cercle					
Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
4. Réaliser un simple nœud					
Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant les différentes tâches ?

1. Replacer des chiffres et lettres					
Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
2. Passer un fil dans des anneaux					
Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
3. Découper un cercle					
Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
4. Réaliser un simple nœud					
Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi

Degré de difficulté ressentie pour chaque tâche (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point les tâches vous ont-elles semblé faciles ou difficiles ?

1. Replacer des chiffres et lettres					
Très facile	1	2	3	4	très difficile
2. Passer un fil dans des anneaux					
Très facile	1	2	3	4	très difficile
3. Découper un cercle					
Très facile	1	2	3	4	très difficile
4. Réaliser un simple nœud					
Très facile	1	2	3	4	très difficile

Pourriez-vous répondre le plus sincèrement possible aux affirmations ci-dessous en respectant l'échelle suivante Entourez 1 si vous n'êtes pas du tout d'accord avec la phrase. Entourez 2 si vous n'êtes pas d'accord avec la phrase. Entourez 3 si vous êtes d'accord avec la phrase. Entourez 4 si vous êtes tout à fait d'accord avec la phrase.				
	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout fait d'acc
Je me sens fatigué	1	2	3	4
J'ai eu mal à la tête	1	2	3	4
La clarté de l'image était très bonne	1	2	3	4
J'avais une très bonne perception du champ	1	2	3	4

Quelles sont les difficultés particulières que vous avez éprouvées ?

Quelles sont les facilités particulières ?

Questionnaire après la dernière épreuve

Pour la dernière tâche (effectuée en laparoscopie et avec le robot), avez-vous senti une différence dans l'utilisation des deux techniques ?

Oui – Non

Si oui, à quel niveau et dans quel sens ?

Quels avantages et inconvénients relevez-vous pour chacune des deux techniques ?

Préférez-vous un des deux systèmes ?

Oui – Non

Si oui, lequel ?

Pourquoi ?

ANNEXE 3

<p>Pourriez-vous répondre le plus sincèrement possible aux affirmations ci-dessous en respectant l'échelle suivante</p> <p>Entourez 1 si vous n'êtes <u>pas du tout d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 2 si vous n'êtes <u>pas d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 3 si vous êtes <u>d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 4 si vous êtes <u>tout à fait d'accord</u> avec la phrase.</p>	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout fait d'acc
Pour la dernière tâche, vous avez observé				
Une meilleure performance générale	1	2	3	4
Un temps de réalisation de la tâche plus court	1	2	3	4
Une meilleure précision des gestes	1	2	3	4
Une meilleure clarté de l'image	1	2	3	4
Une meilleure vision du site	1	2	3	4
Une utilisation plus facile des instruments	1	2	3	4
Une meilleure orientation dans l'espace	1	2	3	4
Plus de confort	1	2	3	4
moins de concentration de votre part	1	2	3	4
Un meilleur feedback de vos actions	1	2	3	4
Une meilleure visibilité de vos actions	1	2	3	4
Une meilleure capacité à anticiper l'effet de vos actions	1	2	3	4
Une plus grande complexité pour réaliser la tâche	1	2	3	4
Une meilleure qualité des gestes	1	2	3	4

Avez-vous des remarques éventuelles ?

Réponses aux questions ouvertes : étude 1**Pour les tâches de complexité croissante (n=60) :**

	Laparoscopie classique	Système robotique en 2D	Système robotique en 3D
Problème de manipulation	14	5	2
Problème de profondeur	9	6	2
Problème d'orientation dans l'espace	3	3	0
Problème de retour de force	0	3	2
Pas de sensation de texture	0	1	
Problème de pour gérer caméra	0	0	2
Manque d'entraînement	0	0	1
Bonne maniabilité	5	9	13

Avantages et inconvénients des techniques après le *switch* technique (n=60) :

	Laparoscopie classique	Système robotique
Manipulation plus aisée	2	13
Meilleure vision	1	7
Mauvaise vision	5	0
Meilleur confort	0	4
Vision 3D	0	2
Meilleure précision	0	2
Problème de retour de force	0	7
Meilleur feedback de ses actions	5	0
Problème de perception	0	4
Besoin d'un apprentissage	0	2
Isolement	0	1
Problème de manipulation	15	0

Questionnaire avant les épreuves

Age :

Sexe :

Latéralité :

Problèmes visuels, lesquels ? :

Année d'étude :

Nombre de stages en chirurgie :

Type et durée des stages en chirurgie :

Quand ont-ils eu lieu ? :

Au cours de vos stages, combien de fois avez-vous réalisé les tâches suivantes ?

tenir les instruments en chirurgie ouverte

tenir les instruments en chirurgie laparoscopique

tenir la caméra

réaliser un acte chirurgical (suture ou autre) seul en chirurgie ouverte

Si oui, lequel ?

réaliser un acte chirurgical (suture ou autre) seul en chirurgie laparoscopique

Si oui, lequel ?

Combien de nœuds avez-vous déjà réalisés ?

Avez-vous déjà travaillé avec le robot ? Oui - Non

Avez-vous ou jouez-vous avec des jeux vidéo (avec joysticks) ?

Jamais - /jour - /semaine

Questionnaire après essai 1

A quel point vous sentez-vous à l'aise avec la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

A quel point pensez-vous maîtriser la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
------------------	---	---	---	---	----------------

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant la tâche ?

Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
-----------------	---	---	---	---	------------------------

Degré de difficulté ressentie (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point la tâche vous a-t-elle semblé facile ou difficile ?

Très facile	1	2	3	4	très difficile
-------------	---	---	---	---	----------------

Questionnaire après essai 2

A quel point vous sentez-vous à l'aise avec la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

A quel point pensez-vous maîtriser la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
------------------	---	---	---	---	----------------

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant la tâche ?

Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
-----------------	---	---	---	---	------------------------

Degré de difficulté ressentie (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point la tâche vous a-t-elle semblé facile ou difficile ?

Très facile	1	2	3	4	très difficile
-------------	---	---	---	---	----------------

Questionnaire après essai 6

A quel point vous sentez-vous à l'aise avec la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

A quel point pensez-vous maîtriser la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
------------------	---	---	---	---	----------------

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant la tâche ?

Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
-----------------	---	---	---	---	------------------------

Degré de difficulté ressentie (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point la tâche vous a-t-elle semblé facile ou difficile

Très facile	1	2	3	4	très difficile
-------------	---	---	---	---	----------------

Questionnaire après essai 7

A quel point vous sentez-vous à l'aise avec la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

A quel point pensez-vous maîtriser la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
------------------	---	---	---	---	----------------

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant la tâche ?

Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
-----------------	---	---	---	---	------------------------

Degré de difficulté ressentie (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point la tâche vous a-t-elle semblé facile ou difficile ?

Très facile	1	2	3	4	très difficile
-------------	---	---	---	---	----------------

ANNEXE 5

<p>Pourriez-vous répondre le plus sincèrement possible aux affirmations ci-dessous en respectant l'échelle suivante Entourez 1 si vous n'êtes <u>pas du tout d'accord</u> avec la phrase. Entourez 2 si vous n'êtes <u>pas d'accord</u> avec la phrase. Entourez 3 si vous êtes <u>d'accord</u> avec la phrase. Entourez 4 si vous êtes <u>tout à fait d'accord</u> avec la phrase.</p>	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout fait d'accord
Je me sens fatigué	1	2	3	4
J'ai eu mal à la tête	1	2	3	4
La clarté de l'image était très bonne	1	2	3	4
J'avais une très bonne perception du champ	1	2	3	4

Quelles sont les difficultés particulières que vous avez éprouvées ?

Quelles sont les facilités particulières ?

Questionnaire après le changement de technique (essai 9)

A quel point vous sentez-vous à l'aise avec la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

A quel point pensez-vous maîtriser la technique ?

1	2	3	4
Pas du tout			tout à fait

Degré de satisfaction du résultat obtenu (échelle de 1 à 4, très insatisfait à très satisfait)

A quel point êtes-vous satisfait de votre résultat ?

Très insatisfait	1	2	3	4	très satisfait
------------------	---	---	---	---	----------------

Degré de certitude des actions entreprises (échelle de 1 à 4, peu sûr de soi à très sûr)

A quel point vous êtes-vous senti sûr de vous en exécutant la tâche ?

Pas du tout sûr	1	2	3	4	tout à fait sûr de moi
-----------------	---	---	---	---	------------------------

Degré de difficulté ressentie (de 1, très facile à 4, très difficile)

A quel point la tâche vous a-t-elle semblé facile ou difficile ?

Très facile	1	2	3	4	très difficile
-------------	---	---	---	---	----------------

Questionnaire après la dernière épreuve

Avez-vous senti une différence dans l'utilisation des deux techniques ?

Oui – Non

Si oui, à quel niveau et dans quel sens ?

Quels avantages et inconvénients relevez-vous pour chacune des deux techniques ?

Préférez-vous un des deux systèmes ?

Oui – Non

Si oui, lequel ?

Pourquoi ?

ANNEXE 5

<p>Pourriez-vous répondre le plus sincèrement possible aux affirmations ci-dessous en respectant l'échelle suivante</p> <p>Entourez 1 si vous n'êtes <u>pas du tout d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 2 si vous n'êtes <u>pas d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 3 si vous êtes <u>d'accord</u> avec la phrase.</p> <p>Entourez 4 si vous êtes <u>tout à fait d'accord</u> avec la phrase.</p>	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout fait d'acc
Pour la dernière tâche, vous avez observé				
Une meilleure performance générale	1	2	3	4
Un temps de réalisation de la tâche plus court	1	2	3	4
Une meilleure précision des gestes	1	2	3	4
Une meilleure clarté de l'image	1	2	3	4
Une meilleure vision du site	1	2	3	4
Une utilisation plus facile des instruments	1	2	3	4
Une meilleure orientation dans l'espace	1	2	3	4
Plus de confort	1	2	3	4
moins de concentration de votre part	1	2	3	4
Un meilleur feedback de vos actions	1	2	3	4
Une meilleure visibilité de vos actions	1	2	3	4
Une meilleure capacité à anticiper l'effet de vos actions	1	2	3	4
Une plus grande complexité pour réaliser la tâche	1	2	3	4
Une meilleure qualité des gestes	1	2	3	4

Avez-vous des remarques éventuelles ?

Réponses aux questions ouvertes : étude 3 (n=40)

Facilités particulières	Système robotique en 3D	Laparoscopie ouverte	Système robotique en 2D	Laparoscopie fermée
Bonne maniabilité des instruments	3			
Bonne vision en 3 D	3			
Manipuler la caméra	1			
Deux instruments		1		
Retour de force				1
Sensation des mouvements				1
Prises et rotations				1
Mouvements plus précis	1			
Technologie amusante	1			
Aucune				2

Difficultés particulières	Système robotique en 3D	Laparoscopie ouverte	Système robotique en 2D	Laparoscopie fermée
Passage 3D 2D			1	
Profondeur du champ	1		1	3
Evaluer distance entre objets				2
Préhension et orientation de l'aiguille	5	2	1	1
Vision			2	
Maniabilité des pinces		1	2	
Fatigue Manque de confort	2	1	2	
Difficultés de coordination				3
Dosage de la force	1		1	
Habitude à la technique		1		
Difficultés techniques			1	
Habilité des gestes			1	
Trouver bonne posture			1	
Douleurs aux poignets				1
Maniement instruments de laparoscopie		1		
Ne pas bouger caméra soi-même				1
Régler caméra			1	

Etude 2

Réponses des sujets novices et experts au questionnaire concernant la satisfaction, la confiance et la difficulté pour chaque tâche

