

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Volume 11, numéro 2

Rédacteurs en chef :
Sylvie Leleu Merviel
Khalidoun Zreik

europia

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Rédacteurs en chef

Sylvie Leleu-Merviel

Khaldoun Zreik

Vol 11 - N° 2 / 2010

© **e**uropia, 2011

15, avenue de Ségur,
75007 Paris - France

Tel (Fr) 01 45 51 26 07 - (Int.) 33 1 45 51 26 07

Fax (Fr) 01 45 51 26 32 - (Int.) 33 1 45 51 26 32

<http://europa.org/RIHM>

rihm@europa.org

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Rédacteurs en chef / *Editors in chief*

Sylvie Leleu-Merviel, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,
Laboratoire DeVisu

Khaldoun Zreik, Université Paris 8, Laboratoire Paragraphe

Comité éditorial / *Editorial Board*

- Thierry Baccino (Université Paris8, LUTIN - UMS-CNRS 2809, France)
- Karine Berthelot-Guiet (CELSA- Paris-Sorbonne GRIPIC, France)
- Pierre Boulanger (University of Alberta, Advanced Man-Machine Interface Laboratory, Canada)
- Jean-Jacques Boutaud (Université de Dijon, CIMEOS, France)
- Aline Chevalier (Université Paris Ouest Nanterre La Défense, CLLE-LTC, France)
- Yves Chevalier (Université de Bretagne Sud, CERSIC -ERELLIF, France)
- Didier Courbet (Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Mediasic, France)
- Viviane Couzinet (Université de Toulouse3, LERASS, France)
- Milad Doueihi (Université de Laval - Chaire de recherche en Cultures numériques, Canada)
- Pierre Fastrez (Université Catholique de Louvain, GREMS, Belgique)
- Pascal Francq (Université Catholique de Louvain, ISU, Belgique)
- Bertrand Gervais (UQAM, Centre de Recherche sur le texte et l'imaginaire, Canada)
- Yves Jeanneret (CELSA- Paris-Sorbonne GRIPIC, France)
- Patrizia Laudati (Université de Valenciennes, DeVisu, France)
- Catherine Loneux (Université de Rennes, CERSIC -ERELLIF, France)
- Marion G. Müller (Jacobs University Bremen, PIAV, Allemagne)
- Marcel O'Gormann (University of Waterloo, Critical Média Lab, Canada)
- Serge Proulx (UQAM, LabCMO, Canada)
- Jean-Marc Robert (Ecole Polytechnique de Montréal, Canada)
- Imad Saleh (Université Paris 8, CITU-Paragraphe, France)
- André Tricot (Université de Toulouse 2, CLLE - Lab. Travail & Cognition, France)
- Jean Vanderdonckt (Université Catholique de Louvain, LSM, Blgique)
- Alain Trognon (Université Nancy2, Laboratoire InterPsy, France)

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Vol 11 - N° 2 / 2010

Sommaire

Editorial

Sylvie LELEU-MERVIEL, Khaldoun ZREIK 1

Les systèmes s'information sont-ils des outils techniques ?

Are information systems technical tools?

Yves CHEVALLIER, Olivier LE DEUFF 3

La fonction de la résistance dans le contrôle haptique du déplacement.

Étude sur une tâche de suivi de contour avec rétine tactile artificielle

The function of resistance in the control of haptic movement. Study on a contour tracking task with an artificial tactile retina

Gunnar DECLERCK, Charles LENAY 29

Conception d'un objet communicationnel de médiation du document presse à l'ère du numérique : vers l'innovation dispositive

Design of a press document mediation communication object in the digital age: towards apparatus innovation

Cécile PAYEUR 57

Les traces numériques dans les activités conjointes : leviers de la construction du sens

Digital traces to boost the sense-making process in joint activities

Magali OLLAGNIER-BELDAME 89

La fonction de la résistance dans le contrôle haptique du déplacement. Étude sur une tâche de suivi de contour avec rétine tactile artificielle

The function of resistance in the control of haptic movement. Study on a contour tracking task with an artificial tactile retina

Gunnar DECLERCK, Charles LENAY

CRED/COSTECH, Université de Technologie de Compiègne
gunnar.declerck@utc.fr / charles.lenay@utc.fr

Résumé. La caractérisation de la valeur fonctionnelle de la résistance dans l'interaction haptique exige la prise en vue de la manière dont l'opération d'auxiliarisation qui confère à cette résistance le statut de support ou d'articulation externe se réalise dans la concrétude de l'activité humaine. Partant du principe que le terrain d'observation offert par certains dispositifs haptiques peut être particulièrement opportun pour cela, nous avons réalisé une étude expérimentale visant à mettre à jour, sur le cas d'une tâche de suivi de contour avec un bras à retour d'effort augmenté d'une matrice de stimulateurs tactiles, la fonction de la résistance des structures explorées dans le contrôle de l'activité. Après avoir présenté différents travaux actuellement réalisés dans le domaine des IHM haptiques, à l'intersection de la psychologie cognitive et de l'ergonomie des interfaces, nous présentons et discutons les résultats de cette étude.

Mots-clés. Haptique, résistance, contrôle moteur, interfaces tangibles, IHM, retour d'effort.

Abstract. The characterization of the functional value of resistance in haptic interaction requires taking a view of how the operation of auxiliarization which endows resistance with the status of support or external articulation is realized in the concreteness of human activity. Assuming that the field of observation offered by haptic devices can be particularly appropriate to that aim, we conducted an experimental study to enlighten, on the specific case of a contour tracking task, in an environment using a virtual force feedback device with a matrix of tactile stimulators, the function of the resistance of structures in the control of the activity. After presenting various works currently carried out in the field of haptic HMI, at the intersection of cognitive psychology and interfaces ergonomics, we present and discuss the results of this study.

Keywords. Haptic, resistance, motor control, tangible interfaces, HMIs, force feedback.

1 Introduction. Le problème de la valeur fonctionnelle de la résistance dans l'interaction haptique

Bien que la perception et l'interaction haptiques aient fait l'objet d'un nombre impressionnant d'études dans le champ de la psychologie et de la neuropsychologie, en particulier ces dernières décennies sous l'impulsion du développement des technologies haptiques, très peu ont cherché à thématiser et modéliser la fonction spécifique qu'y remplit la *résistance*, l'impénétrabilité des structures physiques, dimension avec laquelle l'individu ne cesse de composer, à laquelle il articule constamment son corps et son action. Et la fonction que présente son auxiliairisation par l'agent incarné, que ce soit dans le contrôle des mouvements qui président à l'exploration ou l'usage des structures matérielles, dans le contrôle et la stabilisation de la posture, ou encore la gestion des ressources énergétiques, de même que les opérations et stratégies qui s'y trouvent systématiquement impliquées, restent aujourd'hui encore largement incomprises¹.

La principale raison de cette situation est qu'on peut difficilement mettre en place des situations d'interaction haptique *sans résistance*, et que la psychologie travaille le plus souvent de manière différentielle, en observant les conséquences sur tel phénomène des changements affectant tel paramètre. Comment en effet étudier le rôle de la résistance dans l'interaction haptique (par exemple l'impénétrabilité ou la solidité des surfaces), si l'on ne dispose pas d'une situation où la disponibilité de cette résistance aura été neutralisée²? Tant que de telles situations de contrepoint font défaut, les théorisations portant sur la valeur fonctionnelle de la résistance restent pour une large part vouées à la spéculation.

Cette difficulté se retrouve à notre sens dans la problématisation unilatéralement « informationnelle » que la psychologie de la perception propose traditionnellement de cette question. Si l'on cherche à mettre à jour les principes et mécanismes présidant à l'intégration des composantes informationnelles tactile et kinesthésique dans la perception haptique, et à identifier leurs rôles respectifs (les contributions de chacun de ces flux d'information à l'élaboration d'un percept haptique unifié), on peut certes neutraliser dans une certaine mesure le retour tactile. On peut par exemple, en anesthésiant les couches cutanées supérieures du sujet, ou en couvrant son épiderme d'une gaine rigide (ou encore d'un gant ou de bande adhésive), chercher à minimiser les déformations cutanées issues de l'interaction avec la structure matérielle explorée. On peut alors étudier l'impact de cette neutralisation sur les performances perceptives et comportementales. On dispose dans ce cas d'une situation d'interaction haptique où l'apport informationnel de la composante tactile est neutralisé ou en tout cas diminué³. Symétriquement, on

1 Voir par exemple Robles-de-la-Torre (2006).

2 C'est un point sur lequel a notamment insisté G. Jansson à propos des différentes composantes perceptives de l'expérience haptique. « A great difficulty when wanting to investigate the relation between the components of haptic perception is the lack of equipment able to stimulate all aspects together and separately » (Jansson, 1998).

3 Il convient à ce titre de préciser qu'en couvrant les doigts du sujet d'une gaine rigide, on ne neutralise pas seulement les informations véhiculées par le canal tactile, mais également *les propriétés fonctionnelles de la composante cutanée* : les propriétés mécaniques de la peau, qui remplissent une fonction décisive dans l'interaction haptique, notamment pour la régulation du mouvement par les forces de frottement. La situation d'anesthésie permet au contraire de neutraliser ou diminuer la dimension *informationnelle* de la composante cutanée, sans pour autant en transformer les propriétés fonctionnelles : dans ce cas, l'interaction avec l'objet est directe, et non pas médiée, et les propriétés mécaniques de la peau peuvent encore être exploitées dans l'interaction.

pourra neutraliser la composante kinesthésique (perception du mouvement et de la position du corps, des forces et tensions musculaires et articulaires) en contraignant l'individu à travailler de manière purement passive, par exemple en évaluant ses capacités de discrimination manuelle de formes quand sa main est maintenue immobile. L'apport informationnel du canal kinesthésique est dans ce cas diminué voire neutralisé, l'individu ne pouvant s'appuyer que sur l'information tactile pour résoudre la tâche.

Cependant, on le comprend bien, il paraît beaucoup plus difficile de créer une situation d'interaction haptique *active*, dans laquelle l'individu disposerait d'informations kinesthésiques le renseignant sur ses mouvements exploratoires et d'informations tactiles le renseignant sur le contact avec l'objet exploré, mais où la rencontre et l'interaction corporelle avec l'objet *ne donneraient pas lieu à la perception d'une force de résistance*. Et en effet, pour cela, il faudrait pouvoir mettre en place une situation où sont conservées les informations tactiles renseignant sur la disposition spatiale du corps explorateur (disons la main) vis-à-vis de l'objet exploré, mais où tout ce qui relève du rapport de force (déformation physique du corps et de l'objet, impénétrabilité, pression, inertie, etc.) serait pour sa part neutralisé. Une telle situation serait bien entendu largement artificielle, correspondant en somme à l'exploration d'un « hologramme tactile », mais elle offrirait, *par contrepoint*, une première prise en vue de l'usage qui peut être fait de la résistance dans l'interaction haptique quand celle-ci est disponible, en permettant d'évaluer la plus-value sur les performances du sujet.

Le développement relativement récent des technologies haptiques, en particulier ce qu'on appelle les systèmes à retour d'effort (*force feedback devices*)⁴, semble dans une certaine mesure avoir modifié cette donne. Comme bien souvent, le dispositif technique permet d'opérer une séparation entre différentes composantes d'une expérience ou d'un phénomène, là où la situation naturelle, non prothésisée, les confond. Il fait office de prisme analytique⁵. Et le développement technologique offre ainsi des opportunités inédites à la psychologie pour faire progresser sa compréhension de la cognition ou plus largement du comportement humain.

Tout d'abord, les dispositifs haptiques offrent un terrain pour étudier de manière systématique les contributions respectives des composantes tactiles et kinesthésiques dans l'interaction haptique, puisqu'ils permettent de mettre en place des situations d'interaction haptique qui sont en quelque sorte réduites à la seule composante kinesthésique (pas d'informations tactiles renseignant sur la surface de contact avec l'objet exploré⁶). Et on comprend en ce sens que leur émergence ait pu

4 Il s'agit d'interfaces de contrôle numériques, se présentant généralement sous la forme de bras articulés ou d'exosquelettes, capables de délivrer à l'utilisateur des forces simulant le contact avec des objets physiques.

5 Sur cette question, voir en particulier Lenay (2002) et Lenay *et al.* (2008). « At the level of empirical analysis, the technical interface functions as a 'prism' which decomposes the components of the coupling, and makes it possible to vary them experimentally. This is particularly true in the case of digital interfaces, which by their very nature allow a decomposition of the functions in discrete recombining elements » (Lenay *et al.*, 2008).

6 Dans ce cas, on ne neutralise toutefois pas totalement l'information tactile, mais on la réduit à ne renseigner que sur la force de pression exercée sur la surface de l'objet. C'est donc principalement ici la capacité du canal tactile à informer sur la configuration spatiale de la zone de contact avec l'objet exploré qui est neutralisée, ou par exemple sa capacité à délivrer des informations sur la température ou le gradient de texture. Bien entendu, nous faisons ici référence aux dispositifs haptiques ne délivrant qu'un retour kinesthésique à leur utilisateur (comme le phantOm, que nous présentons plus loin), et non pas à ceux, minoritaires, mais

revitaliser, dans le champ de la psychologie, le problème de la relation entre les différentes composantes du sens haptique, comme l'a par exemple fait remarquer Jansson (1998) (problème plus connu sous le nom du problème du « toucher actif » et du « toucher passif », évoqué ci-avant).

Mais ces dispositifs, s'ils sont augmentés de stimulateurs tactiles et délivrent à l'utilisateur une information spatiale sur la zone de contact avec l'objet exploré, offrent également l'opportunité de mettre en place des situations absolument inédites : à savoir des situations de découplage entre, d'un côté, la résistance physique que l'objet oppose au corps explorateur, et de l'autre, sa présence qualitative à titre de « forme tridimensionnelle tactile » (sorte de fantôme ou d'hologramme tactile). L'utilisation de ces dispositifs offre ainsi la possibilité d'étudier la fonction spécifique de la *résistance* dans l'interaction haptique, en mettant en place des tâches d'interaction avec des structures virtuelles où celles-ci n'opposent pas de résistance, mais dont la rencontre est néanmoins signalée tactilement. Dans ce cas, l'individu dispose des informations accompagnant la stimulation tactile du doigt ou de la main par l'objet exploré via l'interface, et de l'information kinesthésique naturelle renseignant sur les mouvements du corps. En revanche, il ne dispose pas d'informations kinesthésiques signalant l'interaction physique avec l'objet : celui-ci est absolument dépourvu de résistance, il s'agit d'une structure spatiale traversable par le corps, et uniquement perceptible par la stimulation cutanée. Par contraste avec la situation de perception haptique *passive* évoquée ci-avant, ces dispositifs offrent donc la possibilité de limiter de manière artificielle l'interaction avec l'objet à la seule dimension informationnelle tactile *sans pour autant avoir pour cela à neutraliser l'activité motrice du sujet*.

Afin d'apercevoir plus distinctement l'intérêt des dispositifs haptiques pour l'étude de la valeur fonctionnelle de la résistance, il peut être utile de partir d'une première formalisation générale des stratégies qui président au contrôle des mouvements d'exploration dans l'interaction naturelle avec les structures physiques. Dans une tâche d'exploration haptique naturelle réalisée avec la main, le contrôle du mouvement d'exploration repose sur deux stratégies majeures, qui sont en général mobilisées de concert, mais qu'il est utile de distinguer pour en comprendre le fonctionnement et la possible synergie : le contrôle *endogène* du déplacement, et le contrôle *externe* du déplacement⁷.

Le contrôle endogène du déplacement consiste à utiliser l'information renseignant sur la zone de contact du corps avec la structure physique explorée pour guider les déplacements à la surface de celle-ci, et pour positionner le corps explorateur (par exemple le doigt) relativement à certaines saillances, certains traits typiques repérables. L'information tactile peut être mobilisée pour cette forme de contrôle, mais plus largement toute information pouvant assumer une fonction extéroceptive, susceptible de renseigner sur la zone de contact du corps avec l'objet exploré. Si par exemple l'individu suit avec le doigt un bord de table afin d'y déceler une encoche, il va mobiliser l'information tactile le renseignant sur la position de l'arête sous la surface de son doigt pour diriger son mouvement, et en général pour conserver l'arête au milieu de la zone de contact, de manière à minimiser les risques de perdre le contact avec la structure.

dont le développement est actuellement l'objet d'intenses recherches technologiques, qui permettent également de délivrer une information tactile proprement dite : stimulation de la peau par différents systèmes d'actuateurs, ou par contact direct avec les surfaces explorées – systèmes dits de « *finger tip haptics* » (cf. Salada *et al.*, 2002a,b).

⁷ Nous avons décrit ces stratégies en détail dans Declerck (*sous presse*), nous ne reprenons ici que les éléments les plus importants.

Le contrôle externe du déplacement, ou contrôle du déplacement par usage des contraintes⁸, consiste de son côté à utiliser les propriétés matérielles et spatiales de la structure explorée et du corps explorateur, de manière à créer *une contrainte dynamique sur le déplacement*, un champ de force qui va pouvoir être exploité dans le guidage de l'action. Ce contrôle externe pourra par exemple consister à utiliser l'impénétrabilité de l'objet exploré de manière à asservir le déplacement du corps à sa surface ou le long de ses contours. Dans ce cas, les déplacements du corps explorateur sont *directement guidés* de manière à épouser les variations spatiales de la surface de l'objet, sans que ces variations aient besoin d'être anticipées par le biais d'une information extéroceptive, quelle qu'en soit la nature. L'individu ne détermine donc pas ici de manière intégralement centrifuge les propriétés de son action, par exemple la direction du déplacement ; ces dernières se voient également spécifiées par l'interaction physique même de son corps avec l'environnement.

Bien entendu, on imagine mal pouvoir réaliser des tâches d'interaction haptique quotidiennes en recourant uniquement à un tel mode de contrôle, et dans les situations de commerce haptique normales, ces deux stratégies sont toujours mobilisées de concert. L'individu à la recherche d'un interrupteur mural dans l'obscurité ne se contente pas de pousser sa main en aveugle le long du mur, il fait également usage de l'information tactilo-kinesthésique issue du contact avec la surface murale pour orienter ses gestes le long de celle-ci ou encore pour réguler la pression qu'il applique. Le contrôle externe est ici comme intégré à un contrôle endogène, qui permet d'en ajuster le déploiement.

L'importance de disposer de contraintes externes pour guider l'interaction haptique a été mise en lumière par différents travaux au croisement de la psychologie et de l'ergonomie des interfaces, qui visaient à analyser l'utilité du retour d'effort dans des environnements de travail réels ou virtuels.

Wagner *et al.* (2002)⁹ ont par exemple montré que la principale utilité du retour d'effort pour la téléchirurgie consistait à offrir au chirurgien de mobiliser les propriétés mécaniques de l'environnement comme contraintes sur ses mouvements d'exploration¹⁰. Ils ont notamment observé que la transformation des propriétés matérielles intrinsèques des tissus organiques télémanipulés en contraintes physiques sur les mouvements offrait une barrière de sûreté permettant d'éviter d'endommager les tissus sensibles (le système de téléopération transformant ces régions tissulaires en zones impénétrables pour l'effecteur), en même temps qu'un guide pour l'instrument chirurgical opérant la dissection.

Dans le même ordre d'idées, Jansson (2000) a proposé, pour faciliter la perception de formes haptiques avec des systèmes à retour d'effort limités à un point de contact, quand la vision n'est pas disponible, d'assister l'exploration des contours ou des surfaces en mettant à disposition de l'utilisateur des systèmes d'attraction magnétique virtuelle, qui aideraient à maintenir le contact avec la structure explorée¹¹. Une telle proposition revient clairement à déléguer à l'environnement une partie du contrôle des déplacements qui peut être endogène quand une information tactile ou visuelle est disponible, en offrant à l'utilisateur la possibilité de mettre en place des procédures de contrôle externe de ses

8 Cette stratégie correspond à ce que Mac Intyre *et al.* (1995) ont proposé d'appeler le « mouvement contraint ».

9 Voir également Wagner (2006) et Ammi & Ferreira (2006).

10 Voir également Ortmaier *et al.* (2007) et Wagner & Howe (2007).

11 Voir également Jansson *et al.* (1998) et Jansson & Larsson (2002).

mouvements exploratoires (équivalant à une restriction des degrés de liberté à contrôler¹²).

Ces différents procédés reviennent à implémenter ce que certains théoriciens des interfaces ont proposé d'appeler des *guides virtuels* (*virtual fixtures*) dans l'espace de travail¹³, ou encore des *tunnels haptiques*¹⁴. Ces systèmes consistent à mettre à disposition de l'utilisateur de systèmes de réalité virtuelle ou de télé-opération des guides rigides capables d'assister son activité. Ils permettent ainsi de suppléer les limitations du système de contrôle gestuel naturel de l'individu en augmentant via l'interface sa dextérité et ses possibilités manipulatoires¹⁵.

2 Protocole expérimental et méthode

2.1 But de l'étude

Dans la continuité des travaux présentés ci-avant, nous avons utilisé un système à retour d'effort pour réaliser une étude expérimentale spécifiquement consacrée au problème de la *valeur fonctionnelle* de la résistance dans l'interaction haptique. Sa finalité générale était de parvenir à une caractérisation de la fonction de la résistance, quand elle est mobilisée par l'individu pour supporter ses activités, et plus précisément quand elle se voit intégrée à l'activité corporelle de manière à permettre un contrôle externe du déplacement. Pour ce faire, nous avons mesuré les performances d'un ensemble de sujets dans une tâche de suivi de contour, réalisée dans différentes conditions d'interaction haptique, et en particulier dans des conditions où la structure explorée opposait une résistance, et dans des conditions où à l'inverse elle n'en opposait pas. La tâche était réalisée sans retour visuel, et à l'aide d'une rétine tactile artificielle renseignant sur la configuration spatiale de la zone de contact entre le corps explorateur (un avatar numérique contrôlé par l'effecteur du dispositif haptique) et la structure virtuelle explorée (une structure géométrique relativement simple). Nous avons comparé les performances dans le cas où l'opération de suivi pouvait être réalisée en appui sur la résistance de la structure virtuelle, avec celles où cette structure n'opposait pas de résistance, et ne pouvait donc assister le contrôle des mouvements exploratoires.

2.2 Dispositif haptique

Le dispositif haptique utilisé consiste en un bras à retour d'effort augmenté d'une matrice de stimulateurs tactiles. Le dispositif à retour d'effort en question, le

12 L'utilité de telles restrictions dépend bien entendu du type de tâche réalisée. Comme l'expliquent Ammi et Ferreira : « It is common knowledge that it makes good sense to exploit task-specific needs to reduce DOF [*degrees of freedom*] [...]. For example, if the user's task consists only of orienting an object, it makes little sense to allow simultaneous translation, since it only makes the user's task more difficult: the user must simultaneously orient the object and prevent it from moving outside the field of view. Extraneous continuous DOF could be constrained to sensible default values. However, there are also cases reported where more DOF than strictly necessary are beneficial [...] » (Ammi & Ferreira, 2006).

13 Voir par exemple Rosenberg (1993), Park *et al.* (2001), Abbott *et al.* (2007), Okamura (2009). « The term 'virtual fixture' refers to a guidance mode, implemented in software, that helps a robotic manipulator to perform a task by limiting its movement into restricted regions and/or influencing its movement along desired paths, micro/nano-manipulation tasks, such as micro/nano-assembly and micro/nano-biological manipulation, would benefit greatly from virtual fixture » (Ammi & Ferreira, 2006).

14 Systèmes qui sont en particulier utilisés dans la réhabilitation motrice. Voir Kahn *et al.* (2006) et Van Asseldonk *et al.* (2009).

15 Voir Kumar *et al.* (1999).

phantOm Desktop (SensAble Technologies *phantOm*®), est un bras robotique sur lequel est monté un stylet que l'on contrôle à la main, et qui délivre un retour sous la forme d'une résistance au mouvement similaire à la résistance des objets physiques¹⁶. La position de l'extrémité du stylet dans le plan de travail est calculée à partir de la configuration du bras articulé. Selon cette position, le programme commande la génération de forces de réaction délivrées à l'utilisateur par l'entremise de ce bras.



Figure 1. *Dispositif utilisé (phantOm équipé d'un boîtier tactile)*

La matrice de stimulateurs tactiles, composée de seize picots agencés en carré, est intégrée dans un boîtier plastique de forme parallélépipédique, qui est fixé sur le stylet du bras *phantOm*. L'utilisateur du dispositif saisit le stylet de manière à mettre en contact le bout de son index avec la matrice (cf. Figure 1).

En déplaçant la pointe du stylet dans l'espace de travail, l'utilisateur contrôle les déplacements d'un avatar dans un environnement virtuel représenté sur un écran (cf. Figure 2). Un logiciel mesure la position du centre de l'avatar dans l'espace virtuel, et quand celui-ci entre en collision avec la structure virtuelle explorée, le

16 Une différence notable entre ce rendu haptique virtuel et l'interaction naturelle avec les objets physiques est toutefois la « mollesse » du retour d'effort transmis par le phantOm, due à une fréquence d'actualisation trop basse pour simuler de manière convaincante la rigidité des surfaces physiques. Un tel rendu équivaut en quelque sorte à interagir avec l'environnement physique naturel via une sonde sur laquelle on aurait fixé un embout de caoutchouc mou.

dispositif haptique délivre à l'utilisateur des forces de réaction. L'utilisateur perçoit alors que la structure virtuelle représentée à l'écran oppose une résistance à l'avatar.

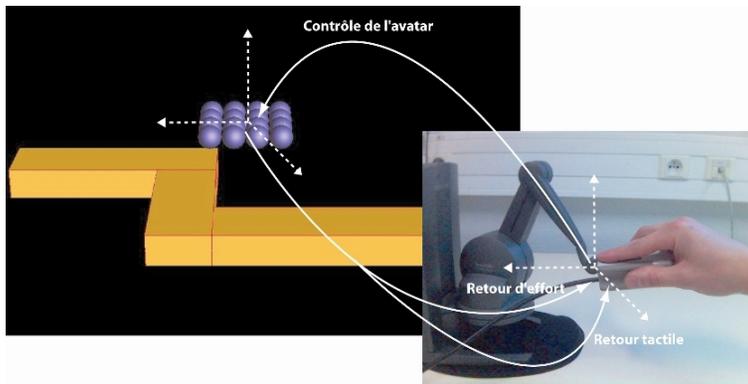


Figure 2. *Fonctionnement du dispositif*

Cette forme d'interaction est comparable à une situation d'exploration d'objets avec l'extrémité d'un outil se terminant en pointe, typiquement un stylo¹⁷. Cependant, l'interaction avec l'objet virtuel est également augmentée par un retour tactile, en quoi elle diffère de la situation d'interaction haptique avec un tel outil. En effet, quand l'avatar contrôlé par le stylet entre en contact avec la structure virtuelle, la matrice tactile que l'utilisateur perçoit sous son index est activée, et elle le reste aussi longtemps que le contact est maintenu. Le pattern d'activation tactile dépend dans ce cas de la configuration spatiale de la zone de contact. L'avatar contrôlé par l'utilisateur est composé de seize champs récepteurs adjacents en forme de sphères et organisés en carré (celui-ci possède un centimètre de côté dans l'espace de travail de l'effecteur). Chaque sphère contrôle l'activation d'un picot de la matrice tactile, de sorte que chaque picot est activé de manière indépendante quand la sphère correspondante entre en contact avec l'objet virtuel. On a donc une isomorphie spatiale entre le pattern tactile délivré par la matrice et la configuration spatiale de la zone de contact entre l'avatar et l'objet virtuel (cf. Figure 3). Un logiciel dédié, nommé *Tactos*¹⁸, prend en charge l'activation de la matrice tactile et le rendu visuel de la scène à l'écran. Il permet par ailleurs l'enregistrement des traces de l'activité exploratoire de l'utilisateur, qui peuvent être rejouées de manière à être étudiées en détail *a posteriori*.

17 Il y a toutefois *délocalation* entre la zone de l'espace d'action où est perçue la force de résistance que la structure virtuelle représentée à l'écran oppose à l'avatar (à savoir sous la pointe du stylet) et la zone de l'espace visuel où est perçue l'interaction entre l'avatar et cette structure, à savoir l'écran. Différentes recherches avec des dispositifs de substitution sensorielle ont cependant montré que ce type de délocalation était très facilement surmonté par l'individu, qui n'avait en général aucun mal à localiser les stimulations tactiles à des positions de l'espace différentes de celles où il les reçoit corporellement : et en général aux zones de l'espace où se situe son point d'action (cf. Bach-y-Rita *et al.*, 2003 ; Auvray, 2004).

18 Ce logiciel, développé dans le cadre du groupe de recherche CRED de l'Université de Technologie de Compiègne, a donné lieu à de multiples études expérimentales, en particulier dans le champ de la suppléance perceptive (voir Lenay, 2002, 2006 ; Lenay *et al.*, 1997, 2003 ; Lenay & Sebbah, 2001 ; Auvray *et al.*, 2008).

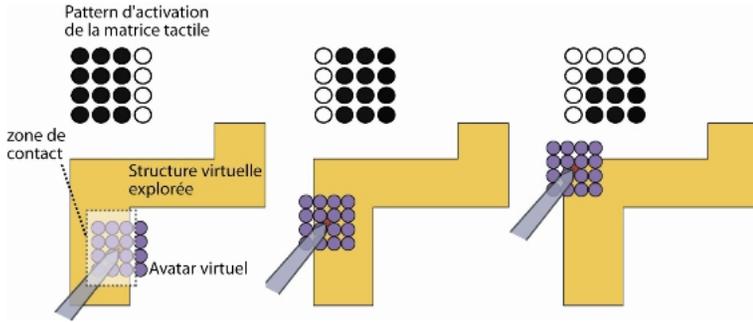


Figure 3. Exemples de patterns d'activation de la matrice tactile (vue de dessus)

Pour résumer, le point d'interaction kinesthésique contrôlé par le bras *phantOm* est situé au centre d'une *ré tine tactile* délivrant des informations spatiales renseignant sur l'environnement périphérique à ce point d'interaction. Seul ce point central rencontre la résistance de la structure virtuelle explorée, la ré tine tactile (représentée par les seize sphères) passe pour sa part à travers cette structure. Et ce point d'interaction kinesthésique correspond, dans l'espace de travail de l'utilisateur, à l'extrémité du stylet : c'est là qu'il reçoit la résistance que lui délivre le bras articulé quand le centre de l'avatar est en contact avec l'objet virtuel (même s'il peut par suite localiser cette force de résistance à l'écran, au point de rencontre entre son avatar et la structure virtuelle explorée, en tout cas quand il dispose d'un retour visuel de celui-ci). La surface tactile est donc plus étendue que la zone d'interaction kinesthésique, réduite pour sa part à un simple point. Ce qui signifie que l'utilisateur peut être alimenté par un retour tactile même lorsqu'il n'a plus d'interaction kinesthésique avec la résistance de la structure virtuelle.

Pour simplifier le système, nous n'avons pas modélisé la possibilité de rotations de l'avatar. Si l'utilisateur fait subir au stylet des rotations autour de sa pointe, son action reste absolument sans effet sur l'orientation de l'avatar. L'avatar a toujours la même orientation par rapport à l'espace de travail : il reste toujours orthogonal aux directions des côtés du pont virtuel. Il ne peut que se déplacer par translations.

Précisons que l'utilisation d'une matrice Braille pour délivrer à l'utilisateur une information sur le contact de l'avatar avec la structure virtuelle signifie clairement une réduction aussi bien *informationnelle* que *fonctionnelle* par rapport à la composante cutanée de l'interaction haptique naturelle. L'information spatialement distribuée délivrée par la matrice tactile, qui renseigne sur la configuration spatiale de la zone de contact entre l'avatar et l'objet virtuel, ne correspond en effet qu'à une des multiples composantes de l'information qu'est susceptible de délivrer le canal tactile dans le cas d'une interaction corporelle directe avec un objet physique. Qui plus est, elle est réduite à une information binaire (signal de contact ou d'absence de contact). Elle ne renseigne pas sur la force de pression appliquée contre la surface explorée, comme le fait la peau dans des conditions naturelles. Si l'individu augmente la pression de la pointe du stylet sur la structure virtuelle, cela reste sans conséquence (en intensité comme en qualité) sur la structure de l'information tactile délivrée par la matrice. La force exercée par les picots sur la peau n'est pas corrélée à la force de pression appliquée par l'utilisateur contre la structure résistante, à la différence de la situation d'interaction haptique naturelle, caractérisée par une corrélation entre la force de pression appliquée et le degré de déformation cutanée. Cette situation peut donc être considérée comme une forme d'appauvrissement informationnel par rapport à l'interaction haptique naturelle. Le dispositif opère un

filtrage qualitatif aussi bien que quantitatif de l'information tactile, en ne retenant qu'une information sommaire sur la configuration spatiale de la zone de contact (pas d'information de force, de texture ou de température)¹⁹.

Comme nous l'expliquions au début de cette partie, l'intérêt de ce type de dispositif est qu'il permet la mise en place de situations d'interaction haptique où la structure explorée n'oppose pas de résistance (on désactive le retour d'effort délivré par le bras *phantOm*), mais dont la présence dans l'espace d'exploration peut néanmoins être perçue par voie tactile (la matrice tactile est activée), situation qui semble difficile, pour ne pas dire impossible à implémenter dans le cas d'un rapport haptique naturel (au sens d'une interaction sans médiation technique). L'inscription de l'objet dans l'environnement virtuel n'est dans ce cas perceptible que par le canal tactile, l'interaction « haptique » avec l'objet ne s'accompagnant pas d'un retour kinesthésique. L'usage d'un tel dispositif permet ainsi de poser sur un terrain expérimental la question de la *valeur fonctionnelle de la résistance*, en comparant des situations où cette résistance est présente et des situations où elle ne l'est pas. Et corrélativement, il peut également offrir d'analyser la manière dont l'individu exploite les informations tactiles le renseignant sur la zone de contact de l'avatar avec l'environnement virtuel pour réguler son interaction, par exemple comment il mobilise les changements dans l'information tactile pour orienter ses déplacements à la surface des objets (contrôle endogène).

Dans le cas d'une tâche de suivi de contour comme celle qui est ici demandée aux participants, le contrôle *endogène* du déplacement décrit précédemment consistera à utiliser l'information tactile délivrée par la matrice et renseignant sur la zone de contact de l'avatar avec la structure virtuelle pour guider les déplacements relativement à celle-ci, et au premier chef, de manière à maintenir le contact avec elle. Le contrôle externe du déplacement consistera pour sa part à faire usage de la résistance de la structure virtuelle, quand celle-ci est disponible, de manière à contraindre l'avatar à se maintenir à la surface de celle-ci.

2.3 Procédure expérimentale

Le sujet est assis en face du dispositif posé sur une table et a les yeux bandés. Il est autorisé, s'il le désire, à utiliser la table pour appuyer le bras qu'il utilise pour contrôler le *phantOm*. Le stylet du *phantOm* déplace l'avatar dans un espace tridimensionnel où se trouve un « pont virtuel », situé un peu au dessus du sol du plan de travail. Au début de chaque essai, l'avatar est placé à une extrémité du pont virtuel. Le sujet a pour consigne de se rendre à l'autre extrémité du pont *en perdant le moins souvent possible le contact avec celui-ci*. Quand le point d'interaction kinesthésique situé au centre de l'avatar n'est plus en contact avec le pont, le sujet en est informé par un signal sonore d'alerte. Deux autres signaux sonores indiquent au sujet qu'il est dans la zone de départ ou dans la zone d'arrivée. Le sujet dispose au maximum de deux minutes pour atteindre la zone d'arrivée. Mais il lui est explicitement

19 Cet appauvrissement informationnel ne fait cependant pas problème, dans la mesure où il ne s'agit pas ici de restituer les capacités sensibles du système haptique naturel, mais de prendre en vue les possibilités comportementales et perceptives offertes dans le cadre d'une interaction contrainte aussi bien sur un plan moteur (réduction de la liberté de mouvement par rapport à une situation naturelle) que sensoriel (réduction de la richesse de l'information sensorielle disponible dans des circonstances naturelles). Cette démarche de réduction des possibilités motrices et sensorielles participe d'une méthodologie expérimentale qu'on appelle le minimalisme (Lenay *et al.*, 1997, 2008 ; Lenay, 2006). Prise dans sa généralité, cette méthode consiste à chercher à isoler des conditions de couplage sensorimoteur *minimales* suffisantes pour la constitution d'un percept ou la mise en place d'un comportement déterminé en simplifiant ces conditions jusqu'au point où ces opérations deviennent impossibles.

mentionné qu'il doit favoriser l'adhérence au contour (minimiser les pertes de contact avec le pont) plutôt que la vitesse. Aucun retour visuel des scènes où il doit effectuer la tâche ne lui est fourni au cours de l'expérience.

Conditions

Pour étudier la fonction spécifique qu'est susceptible de remplir la résistance (dans ce cas, l'impénétrabilité de la structure virtuelle) dans cette situation, nous avons mis en place trois conditions d'interaction où doit être réalisée la tâche.

Condition **[P]** (pour *phantOm*) : le pont virtuel est impénétrable pour l'avatar et la matrice tactile est désactivée. Le sujet ne peut donc mettre en place une stratégie de contrôle de son déplacement faisant usage d'informations tactiles. Il peut par contre exploiter la résistance du pont pour contrôler son déplacement de manière externe. Cette condition doit permettre de mesurer les performances dans le cas d'un contrôle externe qui ne serait pas assisté d'un contrôle endogène du déplacement mobilisant les informations tactiles délivrées par la matrice.

Condition **[T]** (pour *tactile*) : le pont virtuel n'oppose aucune résistance à l'avatar, qui passe au travers de celui-ci sans que le système à retour d'effort du bras *phantOm* soit activé. Par contre, le contact de l'avatar avec le pont est signalé au sujet par l'activation de la matrice tactile, et de manière à ce que le pattern d'activation des picots reflète la configuration spatiale de la zone de contact (si l'avatar n'est en contact avec le pont que latéralement, seuls les picots latéraux de la matrice seront activés). Dans cette situation, aucun contrôle externe du déplacement n'est possible (l'objet exploré n'offre aucune résistance qui pourrait être exploitée pour guider l'activité), le sujet doit intégralement résoudre la tâche par un contrôle endogène de l'avatar, en utilisant l'information spatiale délivrée par la matrice tactile. Et le pont n'opposant ici aucune résistance à l'avatar, le sujet doit nécessairement contrôler l'« altitude » de l'avatar (c'est-à-dire, en termes géométriques, sa position sur l'axe z) pour maintenir le contact avec celui-ci. Il ne peut appuyer ses déplacements sur la surface du pont comme dans le cas où celui-ci est impénétrable.

Condition **[PT]** (pour *phantOm et tactile*) : le pont virtuel est impénétrable pour l'avatar et le contact avec celui-ci est signalé par l'activation de la matrice tactile. Dans ce cas, les stratégies de contrôle du déplacement par guidage externe et par guidage endogène à partir de l'information tactile sont toutes deux disponibles.

Dans les trois conditions, une perte de contact avec le pont virtuel est considérée dès que le point d'interaction kinesthésique, situé au centre de l'avatar, n'est plus en contact avec celui-ci, c'est-à-dire, dans les conditions [P] et [PT], lorsque le sujet ne rencontre plus de retour d'effort. Le point central de l'avatar étant seul pris en compte pour déterminer s'il y a contact, dans les conditions [T] et [PT], une partie des picots de la matrice tactile peut être activée même si le sujet n'est plus « en contact » avec le pont.

Dans les conditions [P] et [PT], où le pont est impénétrable pour l'avatar, le participant avait également pour consigne d'effectuer la tâche de suivi de contour de préférence *sur le dessus* du pont virtuel (et non pas sur ses faces latérales ou le long de sa surface inférieure). Ainsi, lorsqu'il perdait le contact avec le pont, il lui fallait revenir en contact avec la surface supérieure de celui-ci avant de pouvoir continuer son parcours.

Pour chacune des trois conditions, le sujet doit exécuter successivement la tâche sur quatre ponts virtuels, et donc effectuer douze trajets au total. Afin de tenir compte d'éventuels effets d'ordre et d'apprentissage, ces trois conditions s'enchaînent dans des ordres différents pour trois groupes de sujets : P-T-PT ; PT-

P-T ; T-PT-P. Les quatre ponts virtuels sont également présentés dans un ordre différent pour chaque condition.

Chaque condition comporte une phase d'apprentissage destinée à familiariser le sujet avec le fonctionnement du dispositif. Le sujet s'entraîne à exécuter la tâche successivement sur deux ponts virtuels ne possédant chacun qu'un seul changement d'orientation, avec un retour visuel sur le premier pont, et en aveugle sur le second. La durée de l'apprentissage varie pour chaque sujet et se termine lorsque le sujet parvient à exécuter la tâche (atteindre la zone d'arrivée).

Nature de la tâche

Pour cette étude, nous avons délibérément choisi une tâche ne consistant pas en une reconnaissance de forme. Ce qu'on a coutume d'appeler la *perception haptique* en psychologie (qui concerne la reconnaissance et l'identification tactilo-kinesthésiques d'objets tangibles et de leurs propriétés spatiales et matérielles) ne couvre pas l'ensemble du domaine du *rapport haptique* à l'environnement, tel qu'il est déployé en situation naturelle. En effet, en situation naturelle, la matérialité de l'environnement est continuellement mise à contribution par le sujet pour guider ou appuyer ses mouvements, prendre un ensemble de repères dynamiques pour ses déplacements, pour reposer son corps, etc., sans qu'il soit pour cela attentif aux traits spatiaux ou matériels des structures physiques avec lesquelles il interagit. La perception des propriétés spatiales et matérielles de l'objet est alors entièrement subordonnée au but pratique visé par cette interaction, autorisant ainsi une perception approximative et lacunaire.

La tâche de suivi de contour ici étudiée vise à approcher ce caractère du rapport haptique naturel aux structures tangibles. Dans ce cas en effet, le sujet n'explore pas l'objet dans le but d'en identifier la nature ou les propriétés matérielles. La perception de l'environnement est complètement subordonnée à l'objectif de se déplacer jusqu'à une zone cible.

Ce type de tâche a notamment l'avantage de faire passer des fonctions telles que la mémorisation au second plan (le sujet n'a pas à conserver en mémoire les différentes perceptions qu'il a prises de la forme explorée, pour les intégrer à une forme générale qu'il lui faudrait identifier), et de canaliser les compétences de l'individu sur le contrôle de ses déplacements. En d'autres termes, et pour céder à un partage conceptuel probablement hâtif, la tâche est beaucoup plus « motrice » que « perceptive ».

Scènes explorées

Pour chacune des trois conditions, le sujet doit exécuter la tâche sur quatre ponts virtuels différents (cf. Figure 4). Un pont consiste en une sorte de « tuyau » de section rectangulaire présentant plusieurs changements d'orientation, à angle droit uniquement, et dont les différentes portions sont toujours orientées dans un repère orthogonal vis-à-vis du plan de travail et donc des axes de référence du sujet, c'est-à-dire : suivant un axe x correspondant à l'axe horizontal (soit une orientation « gauche-droite »), et suivant un axe y correspondant à l'axe sagittal (soit une orientation « avant-arrière »). Deux des quatre ponts présentent deux changements d'orientation (scènes S1 et S2), les deux autres trois changements d'orientation (scènes S3 et S4).

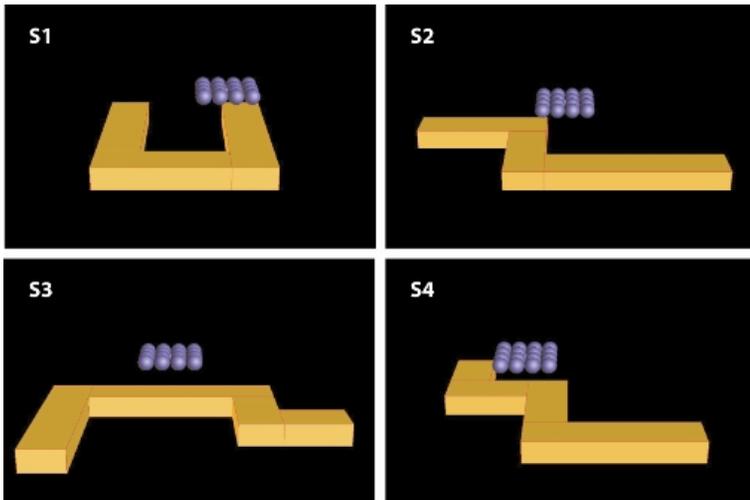


Figure 4. Scènes présentées aux sujets

Chaque pont se trouve à l'intérieur d'un espace de travail consistant en une boîte parallélépipédique (de dimensions 16 x 12 cm pour la base, et de 10 cm de hauteur) dont les parois sont elles-mêmes résistantes à la pointe du stylet. Et il est situé dans l'espace de travail à une altitude a constante par rapport au sol ($a = 1,5$ cm) ; la largeur l et la hauteur b des ponts sont constantes ($l = 2$ cm ; $b = 1$ cm), seules leur longueur et leur forme varient. Le participant est informé que les ponts qu'il doit parcourir sont toujours situés à une même altitude dans l'espace de travail, que leur hauteur et leur largeur sont constantes, qu'ils ne présentent chaque fois que deux ou trois changements d'orientation, et que leurs portions sont toujours orientées de manière orthogonale.

Participants

Vingt-et-un sujets volontaires participèrent à l'expérience, répartis en trois groupes. Chaque groupe correspondait à un ordre de passation des conditions différent : Groupe 1 : P-T-PT ; Groupe 2 : PT-P-T ; Groupe 3 : T-PT-P.

Nature exploratoire de l'étude et hypothèses

Cette étude est largement exploratoire dans son principe. En effet, nous n'avons pas connaissance de travaux qui auraient cherché à comparer de manière systématique les performances motrices de sujets dans les différentes situations ici mises en place, afin de circonscrire la fonction de la résistance dans le rapport haptique, et les stratégies qui président à son exploitation. En particulier, aucune étude à ce jour ne semble avoir cherché à comparer la situation où les structures haptiques explorées opposent une résistance, et celles où elles sont sans résistance et se trouvent uniquement signalées par voie tactile.

Toutefois, des études précédentes ayant montré que le retour d'effort permettait en général d'améliorer le contrôle moteur²⁰, nous avons fait l'hypothèse que la possibilité d'exploiter la résistance de la structure suivie permettrait l'amélioration des performances par rapport à une situation où cette résistance est indisponible (comparaison des conditions [PT] et [T]).

²⁰ Voir notamment Jansson (2000), Wagner *et al.* (2002), Ammi & Ferreira (2006), Smyth & Kirkpatrick (2006), Ortmaier *et al.* (2007), Wagner & Howe (2007).

Mais surtout, nous avons voulu ici déterminer si la possibilité d'exercer un contrôle externe *en même temps* qu'un contrôle endogène du déplacement pourrait influencer les performances respectives de ces deux stratégies. Nous avons à ce titre émis l'hypothèse que la disponibilité conjointe du retour d'effort et de l'information tactile dans la condition [PT] entrainerait une amélioration non pas seulement cumulative des performances par rapport aux conditions [T] et [P], mais également *synergique* : la disponibilité d'une information tactile rendant le contrôle externe plus performant, et la possibilité d'exercer un contrôle externe facilitant en retour les performances dans le contrôle endogène (notamment pour des raisons de libération de ressources attentionnelles et de sollicitation moindre de l'appareil moteur dans le contrôle du déplacement²¹).

3 Analyse des résultats

3.1 Indicateurs de performance mesurés

Pour évaluer les performances des sujets dans les trois conditions comparées, nous avons mesuré, pour chaque essai (douze au total par sujet), les indicateurs suivants :

- la réussite à atteindre la zone d'arrivée dans le temps imparti ;
- le temps mis par le sujet pour accéder à la zone d'arrivée (ramené à 120 sec. dans les essais où le sujet n'a pas réussi à atteindre la zone d'arrivée dans le temps imparti) ;
- le nombre de pertes de contact avec le pont (Nb_{pc}) ;
- le temps de perte de contact avec le pont (Tps_{pc}).

Ces différents indices de performance sont présentés dans la suite sous la forme de moyennes établies pour l'ensemble des sujets et sur l'ensemble des quatre essais, et calculées séparément pour chacune des trois conditions.

3.2 Résultats généraux

A raison de 7 sujets (S) par groupe, de 3 groupes correspondant à différents ordres (O) de passation, de 3 conditions (C) et de 4 scènes explorées (Sc) par condition, les mesures de performance ont été effectuées sur un total de : $7*3*3*4 = 252$ essais. Des analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées sur le groupe formé par l'ensemble des 21 sujets ($S_7 < O_3 > * C_3 * Sc_4$). N'ayant pas observé d'effet d'ordre sur les indices mesurés²², nous avons confondu les sujets des différents groupes en un groupe unique, et effectué les calculs statistiques sur celui-ci, soit sur le modèle du plan expérimental suivant : $S_{21} * C_3 * Sc_4$.

L'analyse des taux de réussite moyens des sujets montre que la tâche de suivi de contour est réalisable avec de bonnes performances dans l'ensemble des trois conditions. Le taux de réussite est légèrement meilleur pour la condition [PT] que pour les deux autres, qui présentent des taux quasiment identiques (cf. Figure 5). Mais l'analyse de la variance n'indique pas d'effet significatif du facteur Condition sur le taux de réussite ($p = 0,1283$). On n'observe pas non plus d'effet d'interaction significatif entre les facteurs Condition et Scène ($p = 0,4540$). Il y a par contre un effet significatif de la scène sur le taux de réussite ($p = 0,0056$; $F(3,60) = 4,6278$).

21 Voir *infra*, section 3.4.

22 Effet du facteur ordre (O) sur le taux de réussite : $p = 0,5331$; sur le nombre de pertes de contact : $p = 0,9786$; sur le temps de perte de contact : $p = 0,9574$; sur le temps mis pour la tâche : $p = 0,1588$; sur le temps moyen par perte de contact : $p = 0,8247$; sur le pourcentage de temps de contact : $p = 0,7694$.

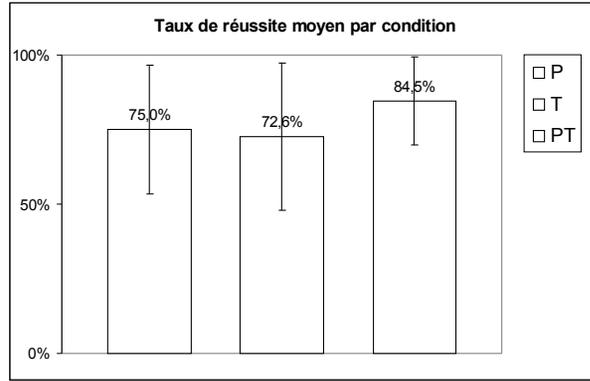


Figure 5. Taux de réussite des sujets

Indiquons-le dès à présent, nous avons observé cet effet significatif de la scène explorée pour pratiquement tous les indices de performance mesurés. Et étrangement, les différences de performance mesurées ne recourent pas les différences de complexité géométrique entre les ponts virtuels sur lesquels la tâche était réalisée : deux des quatre ponts explorés (scènes S1 et S2) ne présentant que deux changements d'orientation, les deux autres (scènes S3 et S4) en présentant trois, on aurait pu s'attendre à ce que la tâche soit réalisée avec de meilleures performances sur les ponts du premier type. Or, systématiquement, les indices de performance sont meilleurs pour les scènes S2 et S4 que pour les scènes S1 et S3, la scène S2 étant celle sur laquelle la tâche est en général la mieux réussie, et la scène S3 celle sur laquelle elle l'est le moins bien. A observer les différentes configurations spatiales des ponts virtuels (cf. Figure 4), cet effet pourrait s'expliquer par le nombre de directions différentes dans lesquelles sont orientées les portions des ponts : bien que les ponts des scènes S1 et S2 présentent deux changements d'orientation chacun, les portions du pont de la scène S2 ne sont orientées que suivant deux directions différentes (de la droite vers la gauche dans l'axe x horizontal et de l'arrière vers l'avant dans l'axe y sagittal), alors que les portions du pont de la scène S1 sont orientées suivant trois directions. On retrouve cette différence entre les ponts des scènes S3 et S4. Ainsi, les meilleures performances sont en général observées pour les deux ponts (S2 et S4) dont les différentes portions ne sont orientées que dans deux directions, la tâche étant par ailleurs mieux réussie sur le pont présentant deux changements d'orientation (S2) que sur celui en présentant trois (S4). Cet effet suggère que pour la réalisation de cette tâche, l'anticipation des directions que va suivre le pont lors de ses changements d'orientation est plus déterminante que le nombre de changements d'orientation proprement dit.

Bien que la variabilité interindividuelle soit élevée, comme en témoigne l'importance des écarts-types²³ (cf. Figure 6), l'analyse de la variance sur le nombre de pertes de contact moyen par essai (Nb_{pc}) montre un effet significatif net de la condition ($p = 3,5856 \cdot 10^{-7}$; $F(2,40) = 22,0041$). On observe en effet un Nb_{pc} beaucoup plus faible dans les conditions [PT] et [T] que dans la condition [P], le Nb_{pc} étant le plus bas en [PT]. Et cette fois encore, les analyses indiquent un effet significatif de la scène ($p = 0,0197$; $F(3,60) = 3,5462$). Les scènes S1 et S3 présentent des Nb_{pc} plus élevés que les essais S2 et S4 ($S1 Nb_{pc} = 13,2$; $S3 Nb_{pc}$

23 Il s'agit ici des écarts absolus des mesures par rapport à la moyenne arithmétique.

= 14,6 ; S2 $Nb_{pc} = 9,38$; S4 $Nb_{pc} = 11,54$). Mais on n'observe pas d'effet d'interaction significatif entre les deux facteurs (C.Sc : $p = 0,3899$).

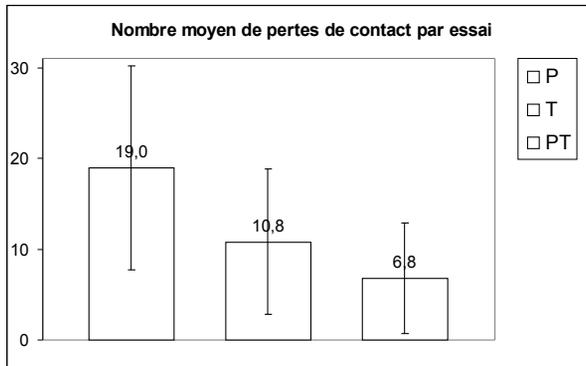


Figure 6. Nombre de pertes de contact

L'analyse de la variance n'indique pas d'effet significatif de la condition sur le temps moyen mis par les sujets pour atteindre la zone d'arrivée ($p = 0,3398$). En moyenne, les sujets atteignaient la zone d'arrivée en 73 sec. pour la condition [P], en 80 sec. pour [T] et en 75 sec. pour [PT]. Comme précédemment, on observe toutefois un effet significatif de la scène ($p = 5,4879 \cdot 10^{-6}$; $F(3,60) = 11,3302$), la tâche ayant en général été réalisée plus rapidement sur les scènes S2 et S4 que sur les scènes S1 et S3. Et on n'observe pas d'effet d'interaction significatif entre les deux facteurs (C.Sc : $p = 0,6707$).

On observe par contre un effet significatif de la condition sur le temps moyen de perte de contact ($T_{ps_{pc}}$) avec le pont par essai ($p = 0,0004$; $F(2,40) = 9,5359$). Dans les conditions [P] et [T], les sujets étaient en moyenne beaucoup plus souvent détachés du pont que dans la condition [PT] (cf. Figure 7). Et il y a cette fois encore une forte variabilité interindividuelle.

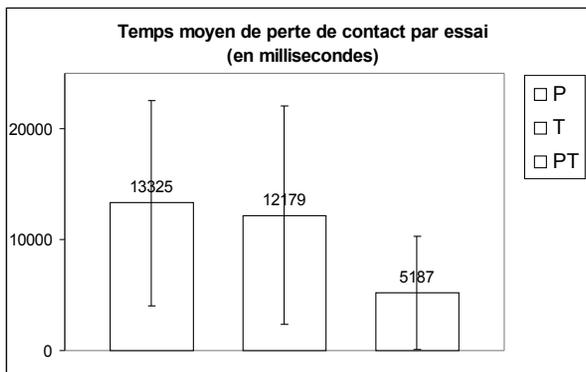


Figure 7. Temps de perte de contact

On retrouve cette tendance si l'on effectue cette fois le calcul sur la base des pourcentages de temps de contact des sujets avec le pont par essai, c'est-à-dire en rapportant le temps de contact avec le pont au temps total mis pour réaliser l'essai (cf. Figure 8). On observe dans ce cas encore un effet significatif de la condition (p

= $3,9635 \cdot 10^{-6}$; $F(2,40) = 17,25$) ainsi qu'un effet de la scène ($p = 0,002$; $F(3,60) = 5,5329$), mais pas d'effet d'interaction ($p = 0,9057$).

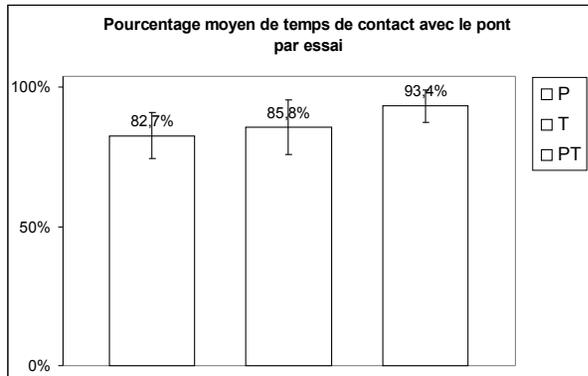


Figure 8. Pourcentage de temps de contact

Le fait que le Tps_{pc} par essai soit approximativement le même pour la condition [T] et la condition [P], alors même que cette dernière montre, comme nous l'avons vu ci-avant, un Nb_{pc} beaucoup plus important (en moyenne, 19 pertes de contact par essai pour [P], contre seulement 10,8 pour [T]) s'explique par les durées plus importantes des pertes de contact en [T] que dans les autres conditions (cf. Figure 9) (effet significatif de la condition sur la durée moyenne des pertes de contact : $p = 0,0002$; $F(2,40) = 10,7676$)²⁴. De sorte que si les sujets manifestaient un Nb_{pc} moins important en [T] qu'en [P], les durées accrues des pertes de contact en [T] font qu'au total la durée de perte de contact avec le pont était aussi grande en [T] qu'en [P]. Ce résultat suggère une difficulté beaucoup plus importante en [T] pour rétablir le contact avec le pont après l'avoir perdu.

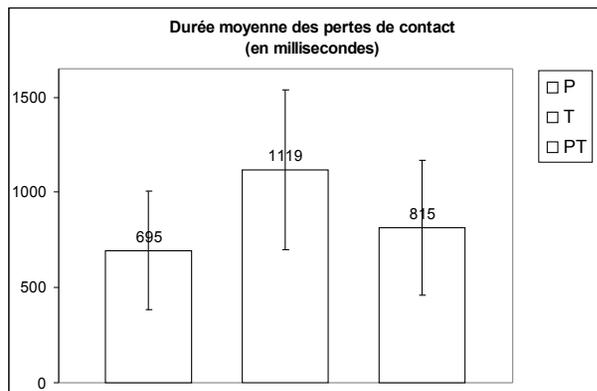


Figure 9. Durée des pertes de contact

²⁴ On observe également une tendance à la significativité pour le facteur Scène ($p = 0,0178$), mais pas d'effet d'interaction pour les deux facteurs ($p = 0,8571$).

3.3 Le rôle de l'information tactile dans le contrôle du déplacement

La comparaison des résultats entre les conditions [P] et [PT] indique que la disponibilité d'une information tactile renseignant sur la région périphérique au point d'interaction kinesthésique avec la structure virtuelle permet une forte amélioration des performances du suivi de contour. La disponibilité de la rétine tactile en [PT] permet la diminution du nombre de pertes de contact avec la structure explorée, aussi bien que la diminution du temps de perte de contact (voir Figure 6 et Figure 7).

Cette amélioration de l'adhérence à l'objet dans le cas où la rétine tactile est disponible s'explique probablement par le fait que l'information tactile délivrée par la matrice permet d'anticiper la présence des bords, et ainsi de se déplacer sur la surface de la structure résistante sans « chuter ».

L'impossibilité d'anticiper la présence des bords dans la condition [P] rend *a contrario* très difficile de maintenir l'avatar en contact avec la surface de l'objet. Bien que l'utilisateur soit informé de la forme générale de la structure dont il doit suivre le contour (largeur constante, orientations orthogonales), le déficit proprioceptif dû à l'absence de vision, aussi bien que d'informations tactiles qui auraient pu la suppléer, rend le contrôle des déplacements particulièrement hasardeux. La stratégie de déplacement la plus répandue en [P] consistait à se déplacer sur la surface du pont en cherchant à maintenir une direction orthogonale, jusqu'à chuter, à revenir alors en contact avec la surface supérieure au niveau de la zone approximative de la chute, et à déterminer à partir de là par une série de chutes intentionnelles : (a) si le pont présente effectivement un changement d'orientation (ou si la chute n'était que latérale), et (b), si c'est le cas, la nouvelle direction du pont en testant les différentes directions orthogonales possibles. Cependant, l'observation des enregistrements des parcours, ainsi que certains témoignages recueillis de manière informelle au cours de l'expérience, tendent à indiquer que les sujets croyaient parfois se déplacer selon des directions orthogonales, alors qu'ils partaient de biais, et chutaient par conséquent du pont par les bords latéraux. Ce déficit de proprioception pouvait par ailleurs accroître la désorientation du sujet, puisqu'une chute sur un bord latéral était dans ce cas souvent interprétée comme indice d'un changement d'orientation du pont (le sujet croyant être arrivé à l'extrémité d'une portion du pont alors qu'il se trouvait par exemple à mi-chemin et avait chuté par un des côtés).

On remarquera que si les sujets avaient été capables de se déplacer suivant des directions absolument orthogonales à l'espace de travail (donc sans jamais chuter sur les bords latéraux), ils auraient pu, dans la condition [P], exécuter la tâche de suivi de contour sans trop de pertes de contact (en théorie, deux chutes au maximum à chaque changement d'orientation du pont), et la rétine tactile n'aurait dans ce cas permis qu'une faible amélioration des performances.

On notera d'autre part que lors de la phase de retour sur la surface du pont après une chute, la faible mémoire spatiale des sujets (oubli de la zone où a eu lieu la chute dans leur espace péripersonnel) faisait parfois qu'ils remontaient sur le pont et se repositionnaient à un endroit différent de celui d'où ils avaient chuté en croyant s'être repositionnés au même endroit. Ce phénomène pouvait également contribuer à accroître la désorientation.

En conclusion, la rétine tactile disponible en [PT] vient donc, par rapport à la condition [P], suppléer une déficience proprioceptive (difficultés des participants à maintenir leurs déplacements suivant des directions orthogonales) aussi bien qu'extéroceptive (incapacité à anticiper la présence des bords latéraux du pont ou ses changements d'orientation, et par conséquent incapacité à en détecter la présence autrement qu'en chutant). Et si la disponibilité d'une information tactile

renseignant sur la zone périphérique au point d'interaction kinesthésique avec la surface du pont n'aide pas le sujet à se déplacer dans des directions orthogonales, celle-ci permet en revanche : d'une part de percevoir les bords à distance de ce point et donc d'éviter les chutes, d'autre part de distinguer les bords latéraux à la direction de déplacement et les bords frontaux témoignant d'un changement d'orientation du pont.

La valeur de la rétine tactile pour l'exécution de la tâche est confirmée par les meilleures performances dans la condition [T] que dans la condition [P] (voir Figure 6 et Figure 7), qui suggèrent que, dans cette tâche, la disponibilité de l'information tactile est plus importante pour guider efficacement les déplacements que de pouvoir appuyer ceux-ci sur la résistance du contour suivi. Autrement dit, il était plus difficile pour les sujets de se déplacer sur la surface résistante de l'objet virtuel sans informations sur la zone périphérique à leur point d'interaction kinesthésique, que de se déplacer à l'aide de cette information sans pouvoir prendre appui sur cette résistance, donc en ayant à contrôler l'altitude de leur avatar (position dans l'axe z) en plus de ses déplacements dans le plan bidimensionnel (position dans le plan x-y). Le contrôle endogène du déplacement autorisé par la rétine tactile est ici plus performant qu'un contrôle externe opéré « à l'aveugle », c'est-à-dire sans informations tactiles.

3.4 Le rôle de la résistance pour le contrôle du déplacement

Si l'on se tourne à présent sur les différences de performance entre les conditions [PT] et [T], on voit que la disponibilité de la résistance en [PT] permet d'améliorer le degré d'adhérence au contour suivi : le contrôle du déplacement semble donc renforcé s'il est à la fois externe et endogène. Le suivi de contour effectué à l'aide de la rétine tactile est plus performant lorsqu'il est exécuté en appui sur la surface résistante que lorsqu'il est exécuté sans appui, uniquement à partir des informations délivrées par la matrice.

Cette différence peut bien entendu s'expliquer par un simple effet cumulatif. Les meilleures performances en [PT] s'expliqueraient par le fait que le contrôle du déplacement est *à la fois* endogène et externe. Mais on pourrait également envisager que la mise en place de cette double forme de contrôle du déplacement puisse avoir un effet synergique, l'installation d'un contrôle externe du déplacement améliorant la qualité du contrôle endogène (soit l'utilisation de l'information tactile délivrée par la matrice pour guider les déplacements de l'avatar à la surface de l'objet), ou inversement, la disponibilité de l'information tactile pour guider les déplacements permettant un usage plus performant de la résistance du contour suivi.

Le témoignage de certains participants tend en particulier à indiquer que la disponibilité de la résistance offre, par rapport aux situations où le pont est pénétrable pour l'avatar (condition [T]), d'alléger l'effort musculaire et la tension qui doit être investie dans l'opération de contrôle du déplacement, et elle pourrait en ce sens permettre la libération de ressources motrices qui pourraient être investies dans d'autres opérations. Certains participants ont en effet déclaré ressentir une fatigue musculaire lorsqu'il leur fallait maintenir l'avatar à une altitude constante dans la condition [T], et se sont même parfois plaints d'une souffrance dans la main, due à la tension musculaire qu'ils disaient devoir continuellement maintenir. Contrairement aux conditions [PT] et [P], où il est possible d'utiliser la résistance du pont virtuel pour maintenir l'avatar à une altitude constante, dans la condition [T] cette altitude doit être contrôlée par une tension des muscles de la main et du bras.

Mais on pourrait également s'attendre à ce que la possibilité d'appuyer les déplacements de l'avatar sur la résistance du pont, sans avoir à contrôler son altitude

(soit la prise en charge d'un troisième degré de liberté), ait permis la libération de ressources attentionnelles et cognitives (c'est-à-dire de diminuer ce qu'on appelle en général la « charge de travail » dans la psychologie cognitive), pouvant dès lors être investies pour la discrimination des événements tactiles et l'usage de cette information pour guider les déplacements, ou plus largement pour construire une représentation utilisable de l'environnement exploré²⁵. De nombreuses études ont montré que la possibilité offerte par les systèmes à retour d'effort de contraindre les déplacements de l'avatar – en particulier par la mise en place de systèmes de guides virtuels (*virtual fixtures*) –, typiquement dans des tâches d'atteinte de cible et de pointage, permettait d'améliorer la précision des trajectoires et les temps d'exécution, mais qu'elle pouvait également offrir un allègement de l'effort de concentration requis pour sa réalisation²⁶. Dans notre cas, la disponibilité d'une surface résistante pour conduire l'opération de suivi de contour permettrait de libérer des ressources cognitives qui pourraient être allouées au traitement de l'information tactile et à l'opération de contrôle endogène du déplacement.

Notamment, le *requisit* en termes de ressources attentionnelles aussi bien que motrices déployées pour contrôler l'altitude de l'avatar dans la condition [I] (plusieurs sujets ont ainsi déclaré devoir fournir une attention soutenue dans cette opération de contrôle) pourrait avoir interféré avec l'attention prêtée à l'information tactile délivrée par la matrice, et par conséquent avoir entraîné une chute, même légère, de la qualité du contrôle endogène du déplacement (par rapport à la condition [PT] où la résistance du pont offre de ne pas avoir à contrôler l'altitude de l'avatar).

L'analyse de l'origine des pertes de contact en [I] permet de proposer une première réponse à ces questions. Si l'on analyse l'origine des pertes de contact, on observe que, dans la condition [I], à peu près la moitié a lieu dans l'axe vertical (axe z) (cf. Figure 10)²⁷. Ces pertes de contact peuvent être mises au compte de l'incapacité du sujet à conserver une altitude appropriée quand il déplace son avatar dans le plan horizontal (plan x,y) de manière à suivre le pont virtuel. Les pertes de contact ayant lieu dans le plan horizontal témoignent pour leur part de l'incapacité du sujet à exploiter convenablement l'information spatiale délivrée par la matrice pour anticiper les bords du pont. Or, on observe que le nombre moyen de pertes de contact dans le plan horizontal est analogue en [I] et en [PT] (ces pertes de contact correspondant à des « chutes » sur les bords du pont pour [PT] et à des sorties latérales pour [I]) : $Nb_{pc(x,y)} [I] = 5,0$ et $Nb_{pc(x,y)} [PT] = 6,8$.

25 Par ailleurs, les dimensions de charge de travail motrice et de charge de travail attentionnelle et cognitive ne sont probablement pas cloisonnées et imperméables. Certaines études sur l'utilité des systèmes à retour d'effort dans différentes tâches suggèrent en effet que la fatigue musculaire à laquelle peuvent donner lieu certaines situations d'interaction haptique est perçue par l'individu comme un accroissement de sa charge de travail cognitive. « Notably, the only participants who reported markedly higher workloads for the F condition [...] were the only two participants who complained of arm fatigue in their subjective questionnaires. This suggests that their reported difference in workload may have been due to discomfort with the device itself rather than the interaction technique. » (Smyth & Kirkpatrick, 2006)

26 Voir en particulier la revue de la littérature proposée par Smyth et Kirkpatrick (2006). Voir également Ammi & Ferreira (2006). « The various experiments show clearly the interest of some virtual fixtures to carry out micromanipulation tasks, they allow gesture guidance following some degrees of freedom. Thus, the operator concentrates on the useful part of operational gesture. So, execution time and trajectory are better. The mental effort is less important, what increase the endurance of operator » (Ammi & Ferreira, 2006).

27 Effet de la condition sur $Nb_{pc(x,y)}$: $p = 2,0427 \cdot 10^{-7}$; $F(2,40) = 23,2036$; Effet de la condition sur $Nb_{pc(z)}$: $p = 0,0035$; $F(2,40) = 6,5442$.

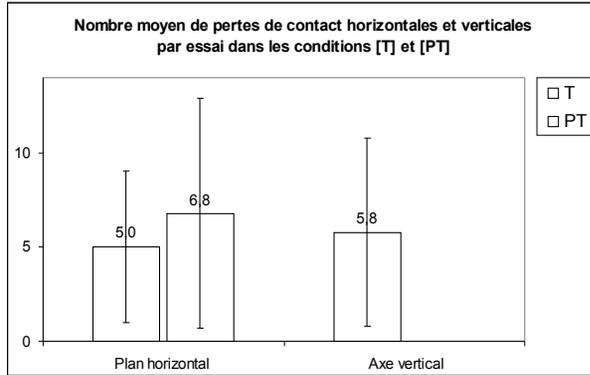


Figure 10. Pertes de contact horizontales et verticales

Il y a donc approximativement le même nombre de pertes de contact dues à une incapacité à utiliser l'information tactile (pertes de contact dans le plan horizontal) en [T] et en [PT]. Et le nombre total plus important de pertes de contact en [T] qu'en [PT] est uniquement dû aux pertes de contact dans l'axe vertical, pertes de contact qui sont absentes dans la condition [PT] où la disponibilité de la résistance du pont offre de ne pas avoir à contrôler l'altitude de l'avatar (ce qui signifie qu'en [PT], toutes les pertes de contact avec la surface du pont correspondent à des chutes latérales et non à des décollements de sa surface).

Ces résultats suggèrent que l'efficacité du contrôle endogène du déplacement, par usage de l'information tactile, n'est pas meilleure dans la condition [PT] que dans la condition [T]. Le fait que la structure suivie oppose une résistance ne permet pas en lui-même d'améliorer la qualité du contrôle endogène. Et l'amélioration des performances dans le cas où la structure suivie possède une résistance ne provient donc pas d'une meilleure perception ou utilisation de l'information tactile délivrée par la matrice, mais uniquement de la restriction des degrés de liberté de déplacement à contrôler. Alors qu'en [T], l'utilisateur doit non seulement veiller à ne pas perdre le contact avec le pont dans le plan horizontal en utilisant l'information tactile, mais également prendre garde de maintenir une hauteur constante dans ses déplacements afin de ne pas passer au-dessus ou en-dessous, en [PT] il peut appuyer ses déplacements sur la résistance du pont et uniquement se préoccuper de maintenir le contact dans le plan horizontal. L'appui sur la résistance de la surface suivie permet une restriction du contrôle du déplacement à un plan bidimensionnel – tout au moins tant que l'utilisateur parvient à maintenir l'avatar sur la surface du pont, car une chute le fait de nouveau basculer dans un espace de contrôle tridimensionnel, et il doit cette fois contrôler son altitude pour revenir en contact avec la surface du pont²⁸.

28 On retrouve en ce sens les résultats de certaines études sur l'intérêt de pouvoir jouer sur le nombre de degrés de liberté à contrôler dans les environnements virtuels. « Recently Smith, Salzman, and Stuerzlinger (2001) studied constrained vs. unconstrained 3D scene manipulation [...] using 2D-input devices. One of the conclusions of their study is that allowing users to constrain movement of objects within the environment results in faster and more accurate 3D scene manipulation than when object movements were unconstrained. In other words, this result suggests that starting from a higher continuous DOF [degree of freedom] and progressively reducing the available DOF to constrain the movement of the object in a lower DOF space results in better performance than in allowing unconstrained movement in the

Ces observations ne permettent donc pas de montrer un effet positif (ou même d'ailleurs négatif) du contrôle externe du déplacement sur le contrôle endogène. La possibilité d'utiliser la résistance du pont pour contraindre les déplacements à un plan horizontal ne semble pas s'accompagner d'un usage plus performant de l'information tactile spatialement distribuée pour opérer le contrôle endogène du déplacement dans ce plan.

Ce point ne doit cependant pas être pris comme une réponse définitive à la question générale de la possible influence du contrôle externe du déplacement sur la qualité du contrôle endogène. Dans la situation étudiée, les ressources attentionnelles aussi bien que motrices requises dans la condition [T] pour maintenir l'altitude de l'avatar restent raisonnables, les temps d'exploration sont courts (deux minutes au maximum par essai), et on peut faire l'hypothèse que l'effort musculaire et attentionnel nécessaire pour ce type de contrôle serait beaucoup plus handicapant dans des tâches plus complexes et plus longues, et qu'ils auraient dans ce cas une influence négative sur la capacité à faire usage de l'information tactile pour contrôler le déplacement. Dans ce cas, un contrôle externe du déplacement par mobilisation de la résistance de la structure suivie pourrait sensiblement améliorer la qualité du contrôle endogène.

Mais on peut également envisager que les ressources attentionnelles convoquées pour le traitement de l'information tactile (soit une attention de nature massivement perceptive) soient différentes de celles mobilisées pour une tâche comme maintenir l'altitude d'un avatar (attention de nature massivement motrice), et qu'il y a en ce sens ségrégation entre ces deux formes d'attention.

3.5 La valeur du retour d'effort dans la conscience de la situation : le problème de la désorientation

Si les résultats indiquent que l'utilisation de la résistance pour opérer le suivi de contour ne permet pas en tant que telle d'accroître la qualité du contrôle endogène, on observe par contre en [PT] et en [P] une diminution de la durée moyenne des pertes de contact, ce qui pourrait témoigner d'une désorientation moindre lors des phases où le sujet perd la structure suivie.

La durée moyenne des pertes de contact est en effet de 1119 ms en [T], alors qu'elle n'est que de 815 ms en [PT], et de 695 ms en [P] (cf. Figure 9). Ces résultats pourraient appuyer l'idée que l'inscription kinesthésique de l'avatar dans l'environnement (l'interaction avec l'objet s'accompagne d'un retour d'effort) permet une conscience plus précise de la situation de l'avatar, notamment de sa position par rapport à l'objet et ses traits reconnaissables, ou plus largement de sa localisation dans l'espace péripersonnel²⁹. De nombreuses études ont indiqué que la perception kinesthésique constituait la principale base de la conscience de la position du corps propre, notamment de la position des segments du corps les uns

higher DOF. This process of using a constraint to reduce the number of continuous DOF, introduces a new discrete DOF, i.e. the presence or absence of the constraint » (Subramanian, 2004 : 45-46).

²⁹ Les témoignages recueillis par Smyth et Kirkpatrick (2006) appuient également cette hypothèse. « In subjective questionnaires, 11 out of 12 participants said that they preferred the F condition, claiming that it provided better awareness of their current position in the octant space (especially in the z direction), allowed them to focus their attention more on clicking the circle, and required less arm movement than the G condition. One participant preferred the F condition 'since it restricts the range of motion. The force feedback frees the eyes from tracking the location of the *phantOm*'. This opinion was common » (Smyth & Kirkpatrick, 2006).

par rapport aux autres³⁰. On retrouverait ici cette fonction de la perception kinesthésique dans la cognition spatiale. Corrélativement, et pour rejoindre la question de la charge de travail soulevée précédemment, ces différences dans la durée moyenne de pertes de contact entre les différentes conditions, et en particulier leur hausse dans la condition [T], pourraient en partie s'expliquer par l'allègement de la charge de travail exigée pour le contrôle de l'avatar quand la résistance est disponible : plus de ressources pouvant dans ce cas être allouées à la construction d'une perception contextuelle de la situation de l'avatar dans l'environnement.

Il faut toutefois considérer que la durée moyenne plus faible des pertes de contact en [P] reflète sans doute en partie le caractère parfois *contrôlé* de ces pertes de contact, qui sont délibérément provoquées par le sujet et donc anticipées. En effet, en [P], aux passages où le pont change d'orientation, la plupart des sujets avaient recours à des pertes de contact intentionnelles afin de déterminer la direction à suivre. On comprend que ce type de pertes de contact puisse s'accompagner d'un degré de désorientation moindre par rapport à celles qui ne sont pas anticipées. Cela expliquerait que s'il y a beaucoup plus de pertes de contact en [P] que dans les deux autres conditions (cf. Figure 6), celles-ci soient aussi en général moins longues.

A l'inverse, dans les conditions [T] et [PT], les pertes de contact constituent normalement des événements non anticipés, et qui plus est inutiles, puisque la matrice tactile peut dans ce cas suffire à renseigner le sujet sur l'orientation des portions du pont virtuel et sur la situation de l'avatar vis-à-vis de ses traits saillants (bords). Et dans ce cas, elles sont le plus souvent dues à l'inaptitude de l'utilisateur à utiliser de manière efficace l'information délivrée par la matrice tactile, ou la conséquence d'une vitesse de déplacement trop élevée, rendant impossible une détection des changements survenant dans l'information tactile permettant de corriger le déplacement. On peut supposer que ces pertes de contact non anticipées donnent lieu à une désorientation plus importante, si bien que le sujet a plus de difficultés à retrouver le pont après l'avoir perdu, ainsi qu'à déterminer le lieu où il se trouvait avant la perte de contact – la stratégie pour revenir en contact avec le pont consistant en général à produire un mouvement de direction opposée au mouvement qui a accompagné la perte de contact tout en rétablissant une altitude adéquate si la perte de contact s'est accompagnée d'un changement de position dans l'axe vertical (ce qui est particulièrement le cas des « chutes » dans les conditions [P] et [PT]).

La durée plus élevée des pertes de contact en [T] est sans doute également pour partie due au fait que des pertes de contact dans l'axe vertical sont possibles dans cette condition, le sujet devant contrôler l'altitude de l'avatar tout en le déplaçant dans le plan horizontal. Lors d'une perte de contact dans la condition [T], le sujet peut en effet se trouver dans l'incapacité de déterminer s'il a perdu le contact avec le pont en raison d'un déplacement dans l'axe vertical ou dans le plan horizontal (typiquement s'il n'est pas parvenu à percevoir le pattern de changement dans l'information tactile lors de la perte de contact ou s'il ne s'en souvient pas). La désorientation serait clairement dans ce cas accrue, et un laps de temps plus important serait nécessaire pour rétablir le contact : le sujet ne sachant localiser son

30 Voir Gandevia (1996) pour revue. Plusieurs études ont également montré que l'individu pouvait faire usage de la perception de l'effort musculaire exercé pour déterminer la position de ses membres, par exemple la position de son avant-bras par rapport à l'angle formé avec son coude (Weerakkody *et al.*, 2003 ; Walsh *et al.*, 2004 ; Winter *et al.*, 2005).

avatar par rapport au pont, il ne pourrait déterminer de manière immédiate le déplacement à opérer pour rétablir le contact avec celui-ci.

Certains sujets ont par ailleurs rapporté des difficultés, dans la condition [T], à déterminer si les sorties avaient lieu par le dessus ou le dessous du pont. En effet, la matrice tactile ne donnant aucune information sur la position par rapport au pont dans l'axe vertical, le sujet ne peut compter que sur sa perception et sa mémoire kinesthésique pour déterminer sa position par rapport au pont lors des pertes de contact verticales. Et dans ce cas, s'il n'a pas conscience d'être descendu (perte de contact par le bas) ou monté (perte de contact par le haut), sa stratégie consistera en général à se déplacer aléatoirement vers le haut ou vers le bas pour tenter de retrouver le pont – stratégie bien entendu plus coûteuse en termes de temps.

4 Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale suggèrent que l'exploitation de la résistance pour opérer une tâche de suivi de contour tire son utilité principale de la restriction des degrés de liberté à contrôler dans le déplacement. L'installation d'un contrôle externe du déplacement par auxiliairisation de la résistance consiste fonctionnellement en la fermeture d'un degré de liberté dans l'espace de contrôle, qui passe d'une structure tridimensionnelle à une structure bidimensionnelle. L'appropriation fonctionnelle de la résistance permet ainsi la constitution d'un espace dynamique (une forme de champ de force) où certaines possibilités motrices sont favorisées à travers une réduction des degrés de liberté disponibles. Et cette mobilisation de l'impénétrabilité de la structure explorée comme tuteur pour le déplacement permet non seulement d'accroître le degré d'adhérence à la surface suivie (moins de pertes de contact et proportion accrue de temps en contact avec l'objet), mais elle semble également offrir d'améliorer la perception de la situation de l'avatar dans l'environnement, et donc de diminuer la désorientation lors des pertes de contact.

On peut par ailleurs supposer que l'appropriation de la résistance pour assister l'activité motrice ne tire pas seulement son utilité d'une simplification du contrôle du déplacement, et donc d'une réduction corrélative de la charge cognitive (notamment attentionnelle) nécessaire à ce contrôle, mais également de ce qu'elle offre un allègement du coût énergétique de l'action. En appuyant ses déplacements sur la résistance de la structure explorée, l'individu non seulement réduit le nombre de degrés de liberté qu'il lui faut contrôler pour maintenir le contact avec la structure, mais encore il délègue à la résistance du milieu une partie du poids qu'il lui faut prendre en charge dans le déplacement. La résistance n'est pas seulement un tuteur pour le déplacement, elle fait également office de point d'appui offrant de reposer le corps de son propre poids. Et l'utilisation de la résistance pour appuyer le geste offrira ainsi de court-circuiter certaines conséquences possiblement problématiques de la fatigue musculaire, par exemple le tremblement, et permettra en ce sens de fluidifier le mouvement.

Notons également que si nous n'avons pas observé ici d'influence significative du contrôle externe du déplacement sur le temps d'exécution de la tâche, de nombreuses autres études ont pour leur part suggéré l'existence d'un tel effet³¹. On comprend aisément pourquoi : le contrôle du déplacement étant simplifié, l'exploration peut être réalisée plus rapidement sans risquer de faire chuter les performances (notamment l'adhérence au contour). La disponibilité de la résistance

31 Voir notamment Smith *et al.* (2001) ; Subramanian (2004) ; Ammi & Ferreira (2006) ; Smyth & Kirkpatrick (2006).

de la structure suivie permet en quelque sorte de contrevenir à la célèbre loi de Fitts, qui pose qu'une rapidité accrue des performances motrices se gagne toujours au prix d'un amoindrissement de la précision du geste.

L'idée suggérée par cette étude et d'autres, que la possibilité d'appuyer l'action sur la résistance des structures de l'environnement virtuel ou réel exploré permet d'améliorer les performances et facilite l'interaction haptique doit cependant être relativisée.

D'une part, la valeur d'une réduction des degrés de liberté à contrôler dépend à l'évidence du type de tâche dans lequel l'individu est engagé³². Mais d'autre part, loin que la possibilité de convoquer la résistance comme tuteur pour le geste soit bénéfique, elle pourrait dans d'autres cas *interférer avec le développement des compétences de l'individu*, voire l'handicaper, en le rendant tributaire d'un appui qu'il ne possédera plus dans d'autres circonstances. Des études ont à ce titre montré que l'utilisation d'un *phantOm* pour guider le geste de traçage (par exemple de cercles ou de lettres) pouvait interférer avec l'apprentissage visuomoteur³³. C'est donc une suppléance haptique à double tranchant, puisqu'elle facilite effectivement la production de formes tant que la contrainte est disponible, mais elle ne permet pas le développement de la capacité à produire les formes sans cet appui. Autrement dit, si la contrainte sur le mouvement n'est pas autogénérée, le système sensori-moteur n'internalise pas la capacité à tracer les figures en l'absence du système de suppléance haptique. En somme, pour reprendre la distinction conceptuelle proposée plus haut, il semble que le contrôle externe du déplacement et le contrôle endogène soient en partie cloisonnés fonctionnellement. La possibilité de mettre en place un contrôle externe pourrait ne pas offrir de développer les compétences qui sont impliquées dans un contrôle endogène de ce déplacement, où la contrainte sur les mouvements est en quelque sorte générée par l'individu lui-même (qui va par exemple chercher à bloquer certains axes de translation ou de rotation de ses mouvements corporels de manière à contraindre ses déplacements dans telle ou telle direction).

Un tel phénomène pourrait s'expliquer par le fait que l'apprentissage du geste (traditionnellement interprété comme la formation de modèles internes en psychologie cognitive) n'intègre pas de représentation de la structure du corps articulé, possiblement prothésisé, qui sert de véhicule au geste – de sorte que les contraintes externes qui pèsent sur le geste de production de la forme ne sont pas accessibles en tant que telles (situation qui rendrait en droit possible un transfert des compétences développées sous certaines contraintes à des conditions où ces contraintes sont différentes ou absentes). Contraindre les mouvements via un dispositif à retour d'effort revenant fonctionnellement à ajouter un « coude » supplémentaire au niveau du point de jonction de la main et du stylet haptique, si l'individu se sépare du stylet, il perd les compétences acquises avec celui-ci car son corps a tout bonnement perdu une articulation. Cette observation suggérerait en somme que le corps articulé, même modifié par une prothèse, fonctionne dans l'apprentissage moteur comme un tout : les capacités que l'individu développe sous des conditions corporelles données n'ont pas d'existence indépendante de ces conditions³⁴.

32 Cf. Ammi & Ferreira (2006).

33 Résultats rapportés par Casati (2007). Voir également van Asseldonk *et al.* (2009). Ce point mériterait toutefois d'être détaillé et discuté, dans la mesure où d'autres études (par ex. Gentaz *et al.*, 2008) ont montré que la mise à disposition d'un système haptique pour l'apprentissage visuomoteur du traçage des lettres permettait d'améliorer l'apprentissage.

Bibliographie

- Abbott, J.J., Marayong, P. & Okamura, A.M. (2007). « Haptic virtual fixtures for robot-assisted manipulation », In Thrun S., Durrant-Whyte H., Brooks R. (Eds), *Robotics Research, Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 28, p. 49-64.
- Ammi, M. & Ferreira, A. (2006). « Multimodal virtual fixtures and metaphors for dexterous telemicromanipulation », *Eurohaptics*, Paris, France.
- Auvray, M. (2004). Immersion et perception spatiale. L'exemple des dispositifs de substitution sensorielle, Thèse de doctorat, EHESS, Paris.
- Auvray, M., Lenay, C. & Stewart, J. (2008). « Perceptual interactions in a minimalist virtual environment », *New Ideas in Psychology*, 27:32-47.
- Bach-y-Rita, P., Tyler, M.E. & Kaczmarek, K.A. (2003). « Seeing with the brain », *International Journal of Human-Computer Interaction*, 15(2):285-295.
- Casati, R. (2007). Présentation au séminaire du groupe de recherche CRED, Université de Technologie de Compiègne.
- Casati, R. & Pasquinelli, E. (2007). « Is the subjective feel of “presence” an uninteresting goal? », *Journal of visual languages and computing*, 16:428-441.
- Declerck G. (*sous presse*). « La valeur fonctionnelle de la résistance dans l'interaction haptique. Pourquoi concevoir des IHM ‘tangibles’ ? », *Sciences et Technologies pour le Handicap*.
- Gandevia, S.C. (1996). « Kinesthesia: roles for afferent signals and motor commands », In *Handbook of physiology. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*, Bethesda, MD: Am Physiol Soc, 12:128-172.
- Gentaz, E., Bluteau, J. & Hillairet de Boisferon, A. (2008). « Réalité virtuelle et gestes grapho-moteurs : apport des guidages haptiques pour (ré)-apprendre à tracer des lettres », *Neuropsychology*, 7(4) :156-160.
- Jansson, G. (1998). « Haptic perception of outline 2D shape : the contributions of information via the skin, the joints and the muscles », In Bril B., Ledebt A., Dietrich G., Roby-Brami A. (Eds.), *Advances in Perception-Action Coupling*, Editions EDK, Paris, p. 25-30.
- Jansson, G. (2000). « Basic issues concerning visually impaired people's use of haptic displays », *The 3rd International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*, p. 33-38.
- Jansson, G., Fänger, J., König, H. & Billberger, K. (1998). « Visually impaired persons' use of the PHANToM for information about texture and 3D form of virtual objects », In *Preprints of the Third PHANToM User's Group Workshop*, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, AI Lab, RLE and ME.
- Jansson, G. & Larsson, K. (2002). « Identification of haptic virtual objects with different degrees of complexity », In Wall S.A., Riedel B., Crossan A., McGee M.R. (Eds.), *Eurohaptics 2002, Conference Proceedings*, Edinburgh, p. 57-60.

34 Pour une démonstration de ce principe à propos de la perception et de la production des forces, voir notamment Takahashi *et al.* (2005).

- Kahn, L.E., Lum, P.S., Rymer, W.Z. & Reinkensmeyer, D.J. (2006). « Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: does it matter what the robot does? », *Journal of rehabilitation research and development*, 43:619-630.
- Kumar, R., Goradia, T., Barnes, A., Jensen, P., Whitcomb, L., Stoianovici, D., Auer, L. & Taylor, R. (1999). « Performance of robotic augmentation in common dexterous surgical motions », *Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions (MICCAI)*, Cambridge, UK, p. 1108-1115.
- Lenay, C. (2002). Ignorance et suppléance : la question de l'espace, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- Lenay, C. (2006). « Enaction, externalisme et suppléance perceptive », *Intellectica*, 43:27-52.
- Lenay, C., Canu, S. & Villon, P. (1997). « Technology and perception: the contribution of sensory substitution systems », *Second International Conference on Cognitive Technology*, Aizu, Japan, Los Alamitos: IEEE, p. 44-53.
- Lenay, C., Declerck, G., Gapenne, O., Maillet, B., Stewart, J. & Thouvenin, I. (2008). « Technical mediation of sensorimotor coupling: a minimalist approach », *ENACTIVE 08, 5th International Conference on Enactive Interfaces*, p. 36-41.
- Lenay, C., Gapenne, O., Hanne-ton, S., Marque, C. & Genouëlle, C. (2003). « Sensory substitution: limits and perspectives », In Hatwell Y, Streri A, Gentaz E (Eds.), *Touching for Knowing*, Amsterdam: John Benjamins, p. 275-292.
- Lenay, C. & Sebbah, F. (2001). « La constitution de la perception spatiale. Approches phénoménologique et expérimentale », *Intellectica*, 1(32):45-86.
- Mac Intyre, J., Gurfinkel, E., Lipshits, M., Droulez, J. & Gurfinkel, V. (1995). « Measurement of human force control during constrained arm motion using a force activated joystick », *Journal of Neurophysiology*, 17:1201-1222.
- Okamura, A.M. (2009). « Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery », *Current Opinion in Urology*, 19(1):102-107.
- Ortmaier, T., Deml, B., Kuebler, B., Passig, G., Reintsema, D. & Seibold U. (2007). « Robot assisted force feedback surgery », In Aracil R., Balaguer C., Buss M., Ferre M., Melchiorri C., (Eds), *Advances in Tele-robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 31, Springer, New York, p. 341-358.
- Park, S., Howe, R.D. & Torchiana, D.F. (2001). « Virtual fixtures for robotic cardiac surgery », *Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions (MICCAI)*, p. 1419-1420.
- Robles-De-La-Torre, G. (2006). « The importance of the sense of touch in virtual and real environments », *IEEE Multimedia*, 13:24-30.
- Rosenberg, L.B. (1993). « Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation », *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, Seattle, USA, p. 76-82.
- Salada, M.A., Colgate, J.E., Lee, M.V. & Vishton, P.M. (2002a). « Fingertip haptics: A novel direction in haptic display », *Proceedings of the 8th Mechatronics Forum International Conference*, University of Twente, Enschede, Netherlands, p. 1211-1220.

Salada, M.A., Colgate, J.E., Lee, M.V. & Vishton, P.M. (2002b). « Validating a novel approach to rendering fingertip contact sensations », *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, p. 217.

Smith, G., Salzman, T. & Stuerzlinger, W. (2001). « 3D scene manipulation with 2D devices and constraints », In *Proceedings of the conference on Graphics Interface*, Morgan Kaufman, p. 135-142.

Smyth, T.N. & Kirkpatrick, A.E. (2006). « Haptic constraints for a bimanual command selection and location task », *Proceedings of Eurohaptics 2006*, p. 195-200.

Subramanian, S. (2004). *Tangible interfaces for volume navigation*, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.

Takahashi, C.D., Nemet, D., Rose-Gottron, C.M., Larson, J.K., Cooper, D.M. & Reinkensmeyer, D.J. (2005). « Effect of muscle fatigue on internal model formation and retention during reaching with the arm », *Journal of Applied Physiology*, 100:695-706.

Van Asseldonk E.H.F., Wessels M., Stienen A.H.A., van der Helm F.C.T. & van der Kooij, H. (2009). « Influence of haptic guidance in learning a novel visuomotor task », *Journal of Physiology*, doi:10.1016/j.jphysparis.2009.08.010

Wagner, C.R. (2006). *Force feedback in surgery: physical constraints and haptic information*, Thèse de doctorat, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

Wagner, C.R. & Howe, R.D. (2007). « Force feedback benefit depends on experience in multiple degree of freedom robotic surgery task », *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6):1235-1240.

Wagner, C.R., Stylopoulos, N. & Howe, R.D. (2002). « The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection », *Haptics Proceedings*, p. 68-74.

Walsh, L.D., Hesse, C.W., Morgan, D.L. & Proske, U. (2004). « Human forearm position sense after fatigue of elbow flexor muscles », *Journal of Physiology*, 558(2):705-715.

Weerakkody N., Percival P., Morgan D.L., Gregory J.E. & Proske U. (2003). « Matching different levels of isometric torque in elbow flexor muscles after eccentric exercise », *Experimental Brain Research*, 149:141-150.

Winter, J.A., Allen, T.J. & Proske, U. (2005). « Muscle spindle signals combine with sense of effort to indicate limb position », *Journal of Physiology*, 568(3):1035-1046.