

# Espace de perception et seuils de confort pour un zoom haptique en 2D

## *Perception's space and comfort thresholds for a 2D haptic zoom*

Mounia ZIAT (1), Olivier GAPENNE (1), Charles LENAY (1), Eric LECOLINET (2), Gérard MOURET (2), John STEWART (1)

(1) UTC, Université de Technologie de Compiègne  
{mounia.ziat, olivier.gapenne, charles.lenay, john.stewart}@utc.fr

(2) ENST, Paris  
elc@enst.fr, mouret@infres.enst.fr

**Résumé.** En vue d'étendre les possibilités d'usage des assistants personnels, nous avons validé expérimentalement la possibilité d'une nouvelle technique de zoom associée à un retour tactile (zoom haptique). A l'inverse d'un zoom classique qui est opérationnel dans l'espace corporel (l'espace des sensations et des actions du sujet), le zoom haptique, tel que nous l'avons défini, est virtuel car il est effectué dans l'espace numérique (l'espace du monde et des capteurs virtuels). Les objets affichés sur l'écran d'un PDA étant relativement petits, nous avons souhaité, dans la présente étude, définir les seuils de confort minimal et maximal permettant une lecture haptique aisée d'objets 2D. Ces seuils définissent une zone de confort correspondant aux seuils de zoom avant et arrière. Les résultats de l'expérience, menée avec un dispositif de substitution sensorielle (ici dispositif tactile qui met en correspondance le contenu d'une zone de l'écran avec des picots brailles), montrent que : i) pour un taille d'objet proche de 4 cm, le taux de reconnaissance augmente d'une manière significative, ii) les seuils de confort minimal et maximal, définis par un rapport C, se situent respectivement à des valeurs de  $C = 0,2$  et  $0,4$ , iii) l'activité dans l'espace numérique peut calibrer celle déployée dans l'espace corporel lors de l'appréhension des objets par le biais d'un dispositif de substitution sensorielle, iv) les stratégies, qui font partie du domaine de l'espace corporel, sont utilisées différemment par les sujets au profit de l'espace numérique ; elles s'avèrent productives si elles concordent avec la tâche demandée (évaluer l'orientation et la taille d'une figure).

**Mots-clés.** Assistants personnels, Interfaces zoomables (IZ), substitution sensorielle, zoom haptique, espace de perception.

**Abstract.** In order to resolve PDA display problems, we validated, in a previous study, the efficiency of a new zooming technique associated with a tactile feedback (haptic zoom). Conversely to a traditional zoom which is operational in the corporeal space (the space of subjects' sensations and actions), the haptic zoom, such as we defined it, is virtual because it is carried out in numerical space (the space of virtual world and sensors). The displayed objects on a PDA screen being

relativement small, it appears essential, in the present study, to define minimal and maximal comfort thresholds to ease gesture execution that correspond to zoom-in and zoom-out thresholds of the haptic zoom. The results of the experiment undertaken with a sensory substitution device (here tactile device which puts in correspondence the contents of a portion of the screen with Braille pins) show that: i) the choice of an object size close to 4 cm significantly increases the recognition rate, ii) minimal and maximal comfort thresholds, defined by a ratio  $C$ , seem to be respectively at values of  $C = 0.2$  and  $0.4$ , iii) the numerical space can calibrate the corporeal space in the apprehension of objects through a sensory substitution device iv) the strategies which are of domain of the corporeal perception are used differently at profit of the numerical perception; it proves to be productive if they agree with the requested task (estimate figure size and orientation) and the explored shape topography.

**Keywords.** PDA (Personal Digital Assistant), ZUI (Zoomable User Interfaces), Sensory Substitution, Haptic zoom, Perception's space.

## 1 Introduction

Le développement des technologies mobiles tels que les PDAs constitue aujourd'hui un axe de recherche tout à fait important, notamment en association avec des fonctions de communication. Cependant, et en dépit d'énormes progrès réalisés en matière de vitesse du microprocesseur et de volume de stockage, une des limites importantes reste la dimension restreinte des écrans qui est peu compatible avec des activités comme la lecture d'un texte, l'utilisation d'un tableur ou celle d'une base de données. Aussi, leur utilisation est souvent limitée à celle d'un simple agenda électronique. Kamba *et al.* (1996) notent, dans une étude informelle, que le seuil de lisibilité se situe entre 9 et 12 points (3,125 mm et 4,16 mm), la lecture devenant difficile en deçà. Pour pallier cette réduction de l'échelle physique d'affichage, il est possible d'utiliser le principe des interfaces zoomables (IZ). En effet, l'espace dans une interface zoomable est infini et ne se limite pas aux frontières physiques de l'écran. Bederson utilise ce principe pour un agenda et un afficheur d'images (Bederson, 2001 ; Bederson *et al.*, 2004). D'autres proposent les IZ pour la navigation ou faire des achats sur Internet (Jern *et al.*, 2003 ; Kwang et Grice, 2003). Ainsi, les IZ apportent des améliorations en évitant à l'utilisateur les défilements de longues listes ou la présentation en bloc de texte car, en raison de l'utilisation massive de barres de défilement, l'efficacité des utilisateurs de petits écrans est réduite de moitié dans des tâches complémentaires en comparaison de ceux utilisant des écrans habituels (Jones *et al.*, 1999). Cependant, même avec les avantages que peuvent apporter ces interfaces, cette navigation multi-échelle est accompagnée d'un grand risque de désorientation que Jul et Furnas appellent « Desert fog » (Jul et Furnas, 1998). En effet, souvent l'utilisateur ne sait plus où il se trouve dans l'espace ni à quel niveau d'échelle. Pook *et al.* (2000) proposent de mettre la page « contexte » en transparence temporaire<sup>1</sup> pour se repérer sur celle-ci. Une autre solution, pour pallier les problèmes liés à la taille de l'écran, est l'ajout d'un retour tactile comme modalité de sortie. Les vibreurs, une forme simplifiée de retour tactile, ont déjà été intégrés avec succès dans les téléphones mobiles et

---

<sup>1</sup> L'inconvénient d'une transparence continue est qu'elle peut diviser l'attention de l'utilisateur entre le premier plan et l'arrière plan et certaines interférences peuvent apparaître (Harrison *et al.*, 1995).

plusieurs chercheurs essayent de le fusionner avec diverses applications pour PDA (Brewster et King, 2005 ; Poupyrev *et al.*, 2002). Ces vibrations permettent d'augmenter l'interactivité comme par exemple pour les jeux ou pour remplacer tout simplement le mode sonore quand il s'avère impossible d'utilisation (lieu public ou bruyant). Hormis les vibrations, d'autres optent pour un retour haptique (Lee et Hannaford, 2003) afin de réduire la saturation des modalités visuelle et/ou auditive. Enfin, d'autres études (Harrison *et al.*, 1998 ; Hinckley *et al.*, 2000 ; Oakley *et al.*, 2004 ; Poupyrev *et al.*, 2003 ; Yee, 2003) combinent les mouvements de la main dans l'espace 3D avec des tâches spécifiques sur l'écran du PDA ; par exemple, le fait d'éloigner la main fera apparaître les objets avec une petite taille et inversement le fait de rapprocher la main augmente la taille des objets sur l'écran du PDA.

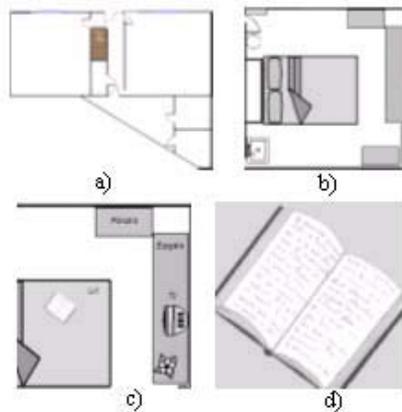
Il faut rappeler qu'une interface mobile met l'utilisateur dans une situation différente du face à face avec un ordinateur. Dans de nombreux cas, l'utilisateur se déplace lorsqu'il utilise son téléphone ou son PDA. Ainsi, un retour tactile réduit les charges visuelles et auditives de l'utilisateur et augure de permettre la transmission d'information lorsque l'utilisateur ne peut regarder l'écran ou n'est pas en mesure d'entendre un son. Pour les mêmes raisons que celles citées précédemment, et afin de réduire les contraintes imposées lors de l'utilisation d'un PDA, nous avons orienté notre recherche vers ce que l'on appelle un zoom haptique. En complément d'une interface zoomable, le système permet à l'utilisateur de reconnaître des objets numériques via une interface implémentant un retour tactile. Ce zoom est directement inspiré des interfaces zoomables et des dispositifs de substitution sensorielle qui sont présentés dans les sections suivantes avec plus de détails.

## **2 Interfaces zoomables**

Les interfaces zoomables ont été créées dans le domaine de la visualisation d'information pour remédier aux problèmes d'affichage classique de type WIMP (Beaudouin-Lafon, 2000) et afin de pouvoir visualiser une grande quantité d'informations sur un espace limité (celui de l'écran).

PAD (Perlin et Fox, 1993) est l'une des premières interfaces zoomables qui fut réalisée par Perlin et Fox en 1993. Elle a conduit à PAD++ en 1994 (Bederson et Hollan, 1994) et Jazz en 2000 (Bederson *et al.*, 2000). L'espace y est infini en longueur et en largeur, ce qui permet à l'utilisateur d'employer aussi des pans et des zooms infinis afin de naviguer dans cet espace multi-échelles. A la différence d'un zoom géométrique, le zoom utilisé est un zoom sémantique. Le contenu sémantique de la page est modifié à chaque changement d'échelle, c'est-à-dire que le niveau de détail et la représentation de l'objet sont différents à chaque niveau de zoom.

Les interfaces zoomables intègrent aussi la notion de contexte et de focus (Pook *et al.*, 2000). La vue globale ou initiale est appelée contexte et le focus est défini comme étant la vue de l'information courante, c'est-à-dire celle apparaissant à l'écran de l'utilisateur. La figure 1a représente le plan initial d'une maison et donc le contexte et la figure 1b représente une vue plus détaillée d'une des chambres. On remarque que les meubles ne sont pas affichés sur la page contexte. Si on fait un zoom avant sur le lit ou l'étagère par exemple, on voit apparaître des objets qui ne sont pas visibles à un niveau inférieur, et ainsi de suite : on peut faire un zoom sur le livre pour rendre le texte visible par exemple (figure 1d).



**Figure 1.** a) plan d'une maison (niveau initial : page contexte) b) plan d'une des chambres avec meubles c) apparition d'objets sur les meubles d) détail sur le texte d'un livre.

### 3 Substitution sensorielle

Le développement de technologies favorisant l'accessibilité des personnes aveugles aux interfaces numériques fait l'objet d'un certain nombre de recherches (Kurze, 1998) notamment au sein de notre groupe. Dans la catégorie des systèmes dits de substitution sensorielle qui transforment les stimuli propres à une modalité sensorielle (par exemple la vision) en des stimuli d'une autre modalité sensorielle (par exemple le tactile), le TVSS (Tactile Vision Substitution System) permet de convertir l'image captée par une caméra en une « image tactile » (figure 2). L'image tactile est produite par une matrice vibrotactile placée soit sur l'abdomen, le dos ou le front du sujet (400 stimulateurs pour sa version standard).



**Figure 2.** Le TVSS

Les travaux de Bach-y-Rita avec le TVSS (Bach-y-Rita, 1972) ont montré que la perception n'est pas une réception passive d'information. Pour percevoir, il faut nécessairement interagir avec son environnement et s'approprier les lois qui lient nos actions et nos sensations (O'Regan et Noë, 2001). Avec le TVSS, des sujets humains (voyants et aveugles) ont manifesté une réelle capacité à reconnaître des

formes mais seulement s'ils manipulent activement la caméra et ses fonctions. Si celle-ci est fixe ou qu'elle est manipulée par une autre personne, le sujet sent des picotements sur sa peau mais ne sait pas décrire l'objet qui lui fait face. Par contre, en maniant lui-même la caméra, il comprend que telle action correspond à telle sensation et que telle sensation correspond à telle action ; il active ainsi un processus circulaire entre actions et sensations afin de pouvoir percevoir via le dispositif. Une observation absolue essentielle est que cette capacité de reconnaissance de forme s'accompagne d'une mise en extériorité des percepts. En agissant, non seulement il arrive à reconnaître les objets mais il oublie les picotements pour percevoir un objet devant lui dans l'espace. De là est née l'idée au sein de notre groupe de créer un dispositif ultra simplifié (1 capteur et 1 stimulateur) (Lenay *et al.*, 1997 ; Lenay *et al.*, 2003) pour expliquer et comprendre comment un sujet humain apprend à percevoir et reconnaître des objets au moyen de ce type d'interface. A partir de cette situation initiale, on peut enrichir l'interface : soit en augmentant le nombre de stimulations et donc les points de sensations soit en enrichissant les points d'actions. Différents résultats ont démontré que les sujets sont capables de déployer des stratégies efficaces leur permettant de percevoir des formes simples et des lettres (Sribunruangrit *et al.*, 2004 ; Stewart et Gapenne, 2004). Le zoom en tant qu'enrichissement de l'action nous permettra d'étudier l'émergence de nouvelles stratégies développées par les sujets afin d'avoir accès à une perception de formes mettant en œuvre la boucle sensori-motrice.

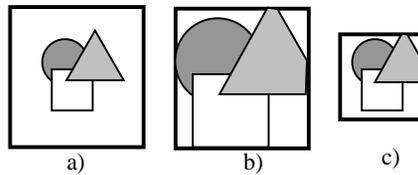
#### 4 Contexte du travail

A l'exception des travaux de Guiard (Guiard *et al.*, 1998) et Hightower (Hightower *et al.*, 1998), peu de travaux expérimentaux ont été menés sur les interfaces zoomables. Nous avons donc été conduits, dans le cadre de notre recherche, à repenser formellement la fonction zoom de façon à considérer les enjeux spécifiques au développement, à l'appropriation et à l'usage d'un zoom haptique portable, ce zoom étant associé à un dispositif de substitution sensorielle nommé Tactos. Il s'agit d'une plateforme permettant l'exploration de formes numériques en 2D via un stylet sur une tablette graphique. Elle comporte des stimulateurs tactiles qui s'activent lorsque le curseur à l'écran rencontre la forme (cette plateforme est décrite plus loin, cf. figure 4).

Le zoom correspond au déplacement d'une fenêtre d'une taille constante sur un axe vertical représentant l'axe des échelles des images (Furnas and Bederson, 1995) ou inversement. On perçoit ce changement lorsque l'image devient petite relativement à la fenêtre (s'en éloigne) ou lorsqu'elle devient grande par rapport à la fenêtre (s'en rapproche). C'est ce rapport entre l'image et la fenêtre qui définit le niveau de zoom et que nous pouvons définir par la formule  $z = I/F$  (où I : taille de l'image et F : taille de la fenêtre).

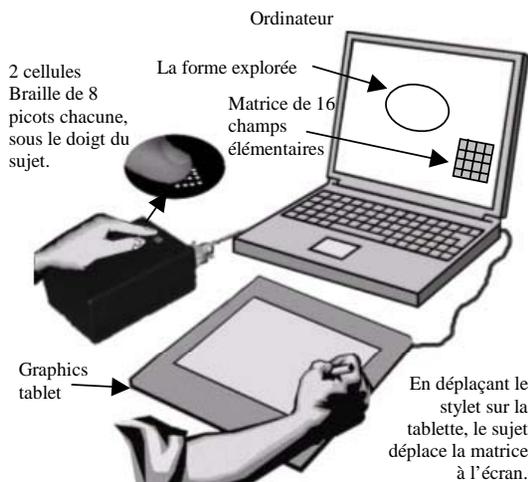
A partir de cette formule, nous constatons que le niveau de zoom augmente lorsqu'on augmente la taille de l'image, ce qui équivaut à un zoom avant. Et inversement, le zoom arrière est rendu opérationnel par une réduction de la taille de l'image. La valeur de F est constante, c'est-à-dire que la taille de la fenêtre ne change pas et ce zoom correspond au zoom classique (méthode 2). Mais nous pouvons, à partir de cette formule maintenir la taille de l'image fixe et manipuler la taille de la fenêtre (méthode 1). Techniquement cette situation est exactement équivalente à la situation classique. Dans ce dernier cas, lorsque l'on augmente la taille de la fenêtre, le niveau de zoom diminue, ce qui se traduit par un éloignement de l'image. A l'inverse, le niveau de zoom augmente lorsque la taille de la fenêtre diminue ce qui

ce traduit par un rapprochement de l'objet. En résumé, on effectue un zoom en modifiant le rapport  $z$  soit en agrandissant la taille de l'image à l'intérieur de la fenêtre soit, tout en gardant la taille de l'image fixe, en diminuant la taille de la fenêtre (figure 3).



**Figure 3.** a) image initiale sur l'écran b) zoom sur image avec une fenêtre de capture fixe c) zoom sur la fenêtre de capture avec une image fixe.

Concrètement, par le biais du dispositif de substitution sensorielle Tactos, la fenêtre correspond à une matrice de champs élémentaires. Ce dispositif comprend trois parties : un ordinateur, un stimulateur tactile et un stylet associé à une tablette graphique (Figure 4).

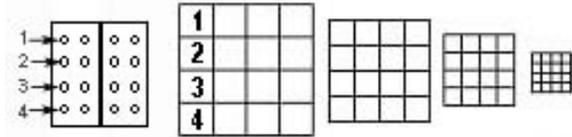


**Figure 4.** Le dispositif expérimental : Tactos

Le sujet pose son index (de la main gauche s'il est droitier) sur le stimulateur tactile qui se compose de deux cellules braille de 8 picots chacune et tient dans l'autre main le stylet qu'il peut déplacer sur la tablette. La surface de cette dernière correspond à celle de l'écran de l'ordinateur et la pointe du stylet en contact avec la tablette correspond au curseur à l'écran. Ainsi, à chaque déplacement du stylet sur la tablette, le sujet bouge le curseur à l'écran. La forme et la taille de ce curseur, nommé matrice, peuvent être définies. En outre, la matrice peut contenir un ou plusieurs « champs élémentaires » qui, tels qu'ils ont été définis (cf. tableau 1), sont sensibles aux pixels noirs à l'écran. En résumé, l'interface TACTOS active le stimulateur tactile lorsqu'un (ou des) pixel(s) noir(s) est détecté, et est inactive dans les autres cas. En d'autres termes, lorsque le sujet déplace le stylet sur la tablette, il

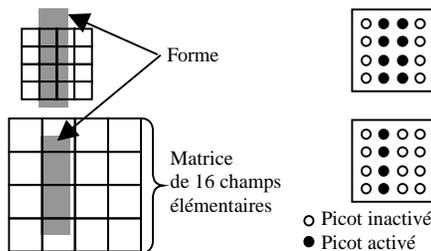
déplace le curseur à l'écran qui correspond à un ensemble de champs élémentaires (matrice) qui sont sensibles aux pixels noirs de l'image et qui active le stimulateur tactile.

Ainsi, comme nous l'avons défini précédemment, Tactus permet d'explorer haptiquement des objets graphiques en 2D en déplaçant un stylet sur une tablette graphique. Ces déplacements du stylet déplacent la matrice (la fenêtre virtuelle) à l'écran dont la taille peut être définie par le ratio  $z$  de manière à rendre équivalent un zoom sur image et un zoom sur fenêtre. Les objets sont perceptibles par le biais du retour tactile qui est rendu effectif grâce à deux cellules braille de 8 picots chacune. Les matrices peuvent avoir différentes formes (carré, circulaire, rectangulaire, etc....) et peuvent être composées d'un ou de plusieurs champs élémentaires. Chaque champ élémentaire est sensible aux pixels noirs (l'objet à percevoir) et active un ou plusieurs picots. Dans notre cas, nous avons fait correspondre le nombre de champs élémentaires au nombre de picots, autrement dit nous avons opté pour une matrice de 16 champs élémentaires permettant d'activer les 16 picots du stimulateur tactile. Comme on le voit sur la figure 5, chaque champ élémentaire correspond à un picot sur le stimulateur tactile. Par exemple, les champs 1, 2, 3 et 4 correspondent aux picots 1, 2, 3 et 4.



**Figure 5.** a) Stimulateurs tactiles (16 picots), b) matrices virtuelles carrées ( $M$ ) utilisées comme capteurs. De la gauche vers la droite :  $M_4$ ,  $M_3$ ,  $M_2$  et  $M_1$  (tailles sur le tableau 1)

Cette fenêtre qui se déplace sur l'image peut être comparée à un écran virtuel qui se déplace sur des objets numériques fixes et qui change de taille pour accéder à la résolution et la précision souhaitées. Ceci nous amène à distinguer deux espaces : i) un espace réel, qui correspond à l'espace corporel, c'est l'espace du corps, l'espace où se produisent les actions et les sensations afin de pouvoir percevoir les objets tangibles et intangibles (numériques). Dans notre cas, c'est l'espace de la tablette graphique (actions) couplé avec l'espace des stimulateurs tactiles (sensations) dans lequel un zoom classique est opérationnel. ii) un espace numérique (virtuel) qui est l'espace des déplacements de la fenêtre (matrice) relativement aux objets numériques.



**Figure 6.** Activation des picots pour une matrice 16 champs élémentaires selon sa taille sur une même forme.

Rappelons que la taille de la matrice joue un rôle important dans la résolution, plus elle est petite, plus la résolution sera haute, plus la taille de la matrice est grande, plus la résolution sera basse. Ainsi la même figure ne sera pas perçue de la même manière avec deux matrices ayant des tailles différentes. Techniquement, comme nous l'avons vu plus haut, cela correspond à deux niveaux d'échelles. Dans Tactos, cela se traduit par l'activation des picots. En effet, selon la taille de la matrice relativement à la forme (figure 6), les stimulateurs peuvent être activés en totalité, partiellement ou rester inactivés.

Dans une étude précédente (Ziat, 2004 ; Ziat *et al.*, 2005), nous avons comparé les deux méthodes de zoom. Elles s'avèrent être identiques tactilement seulement si la vitesse de déplacement de la fenêtre ou de la matrice (déplacée par le sujet) est réduite. On explique sur l'exemple suivant (figure 7) la nécessité d'une réduction des mouvements pour que l'équivalence soit complète.

Comme le montre la figure 7b, la position de la matrice sur une portion du triangle procure une certaine configuration des stimuli. L'activation des picots est similaire pour les deux méthodes de zoom. La figure 7c montre en revanche que l'activation des picots est différente après un même déplacement  $x$  effectué par le sujet. Pour obtenir un effet zoom équivalent à la méthode 2, il devient nécessaire au sujet de réduire ses mouvements lors de la méthode 1 afin de garder la même relation entre ses actions et ses sensations qu'il obtient lorsqu'il utilise la méthode 2.

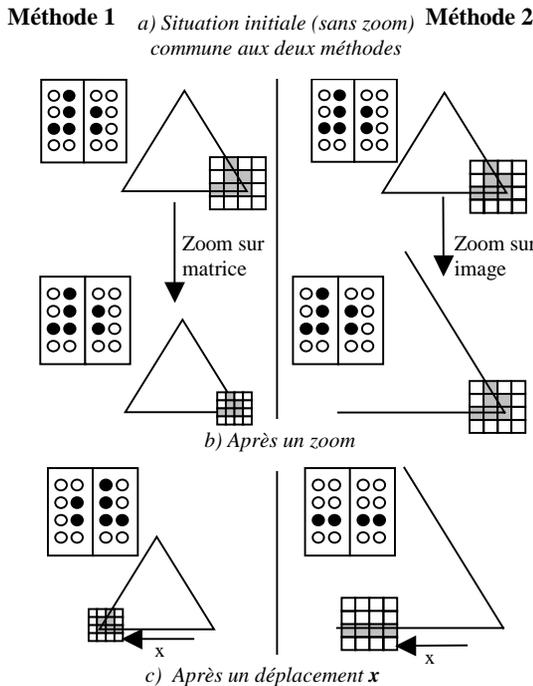


Figure 7. Configuration des stimuli selon la position de la matrice sur un triangle. a) Avant zoom. b) Après zoom au même emplacement c) après un déplacement  $x$ .

Cette réduction de mouvement est souvent spontanée en raison de « l'intervalle d'oscillation »<sup>2</sup>, les mouvements des sujets étant très dépendants de la taille de la matrice. En effet, comme le montre la figure 8, l'intervalle qui permet à la matrice d'être en contact avec la ligne est plus petit dans a) que dans b) et, dans la plupart des cas, ceci contraint les sujets à produire des mouvements plus petits dans a) afin d'être en contact avec la forme ou à proximité. En conséquence, l'augmentation de la taille de la matrice augmente la gamme de vitesses permettant de rester en contact avec la forme.

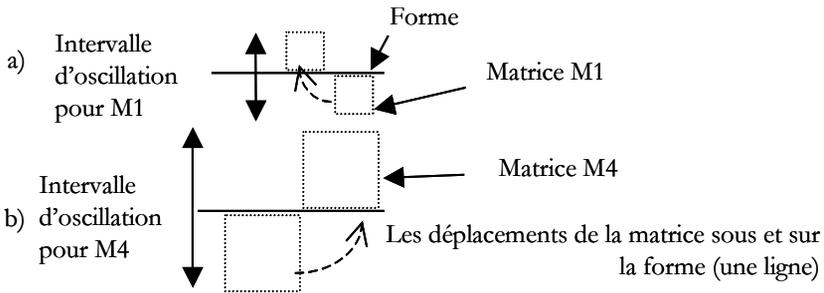


Figure 8. L'intervalle d'oscillation change selon la taille de la matrice

## 5 Limite du seuil humain, geste de confort et espace de perception

En proposant un zoom sur capteur pour un écran de PDA, il devient possible au sujet d'interagir avec des objets de petites dimensions. Cependant, il faut que ces objets ne contraignent pas ses gestes et ne compliquent pas ses tâches habituelles (Ziat et Gapenne, 2005). Nous avons commencé, dans une première étude, par tester l'acuité perceptive via le dispositif Tactos afin de connaître le niveau inférieur du zoom (pour les deux méthodes de zoom) soit la taille du plus petit objet susceptible d'être reconnu haptiquement par le sujet en utilisant un dispositif de substitution sensorielle. L'étude a montré que les sujets (en aveugle) atteignent un taux de reconnaissance de 80% pour des tailles de lettres inférieures à 3 mm (Ziat *et al.*, 2002) et un taux de reconnaissance dépassant les 50% pour des lettres de 1,5 mm (Ziat *et al.*, 2004). Le but de ces expériences est de mettre en évidence la capacité du sujet de percevoir des objets de très petite taille et ce, sans l'aide de la vision. Une autre étude nous a cependant montré que si les sujets devaient reconnaître dans une même tâche des objets de grande (24 mm) et petite (3 mm) taille, les performances pour les petits objets se voient diminuées et ne dépassent pas les 43% (Ziat, 2004 ; Ziat *et al.*, 2005). Cependant, lorsqu'ils ont affaire d'emblée à de très petites tailles, y compris durant la phase d'apprentissage, les sujets sont capable de les contrôler et de les reconnaître (Ziat *et al.*, 2004). En utilisant un PDA, il est fort probable que l'utilisateur se verra confronté à des tailles d'objets différentes pour une même tâche d'où la nécessité dans la présente étude d'identifier un seuil de confort permettant au sujet de reconnaître une forme avec facilité et dans un temps relativement court (ne dépassant pas les 10s mais qui a été fixé à 80s, pour les conditions expérimentales). Afin de définir un seuil de confort minimal et maximal pour la production d'un geste, nous nous sommes inspirés des travaux de

<sup>2</sup> On parle d'intervalle d'oscillation car le sujet oscille autour de la forme lorsque la matrice est en contact avec la forme.

l'équipe de Viviani (Lacquantini *et al.*, 1983) consacrés aux mouvements de la main et à la production d'un geste. En effet, dans une de leurs expériences, Viviani et ses collaborateurs ont demandé à des sujets de tracer des ellipses et de repasser à l'aide d'un crayon sur les tracés. Les résultats ont montré que la vitesse et la courbure des mouvements humains sont liées par un rapport de proportionnalité connu sous le nom de la loi de puissance deux tiers. Cette loi est tout à fait pertinente puisqu'elle prédit des invariances de la relation vitesse – courbure. Ainsi, un geste préserve des propriétés en production indépendante de l'échelle. Dans notre cas, nous avons soumis les sujets à une tâche de discrimination ellipses vs. cercles, l'enjeu étant de définir les conditions limites pour qu'un mouvement conserve les propriétés d'un geste signifiant et non contraignant pour le sujet. Aussi, nous considérerons les seuils (minimal et maximal) comme étant atteints lorsque les sujets ne sont plus en mesure de se prononcer sur la taille et l'orientation des ellipses et des cercles. La caractérisation de ces seuils de production et de reconnaissance permettront de définir les valeurs minimale et maximale d'un zoom avant et arrière selon la méthode 1 et, plus indirectement, de spécifier la surface minimale et maximale de la plage d'exploration proposée sur une interface mobile.

Ceci nous permettra également de mieux comprendre la manière dont les humains i) appréhendent un espace haptique 2D, ii) estiment les tailles, iii) situent leurs mouvements dans les espaces corporel et numérique. En ce sens, nous avons persuadé les sujets qu'ils ont à explorer différentes tailles de formes. En réalité la taille des formes reste fixe tout au long de l'expérimentation et seule la taille des matrices change. Ainsi, outre l'hypothèse sur les seuils de confort, nous faisons l'hypothèse que la taille perçue est fonction des déplacements de la matrice relativement à la forme dans l'espace numérique. Si les sujets sont capables de percevoir un changement d'échelle sur des formes dont la taille ne change pas dans le monde réel (espace tablette), leur perception de l'espace est principalement basée sur ce qu'ils perçoivent dans l'espace numérique (le changement d'échelle est opéré sur les matrices et donc dans cet espace numérique). L'espace corporel peut être considéré, dans ce cas, comme un moyen de valider ou invalider cette première perception. L'hypothèse inverse pourrait s'exprimer en ces termes : la perception corporelle des sujets est tellement présente que la simulation de tailles changeantes dans l'espace virtuel sur une même portion de l'espace réel n'est pas possible.

Nous pensons que les mouvements des sujets peuvent créer une illusion de grandeur. En effet, si les sujets basent leur perception sur l'espace numérique lorsque le changement d'échelle s'opère sur la matrice, l'illusion de parcourir une plus grande distance sur la même portion de l'espace sera créée. Par la même portion de l'espace nous entendons l'espace réel sur lequel l'exploration réelle est opérée. Puisque la taille de la forme dans l'espace réel est la même durant toute l'expérimentation, la distance parcourue sera la même quelque soit la matrice utilisée.

Si ce zoom « virtuel » est effectif alors il constitue un gain dans la mesure où la totalité de l'objet reste en permanence accessible. Dans le cas d'un PDA, l'image pourrait tenir sur l'écran et éviterait ainsi aux sujets de se perdre ou de se retrouver sur une partie vide de l'espace lorsqu'ils manipulent plusieurs niveaux de zoom (Jul et Furnas, 1998).

## 6 Expérimentation

### 6.1 Sujets

Vingt et un (21) sujets, âgés de 20 à 32 ans ( $M = 26$  ans ;  $ET = 6$ ), divisés en trois groupes expérimentaux (7 sujets chacun), ont participé à cette étude. Les sujets sont tous étudiants ou membres de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC).

### 6.2 Dispositif et matériel

Le dispositif utilisé est Tactos et comme nous l'avons mentionné antérieurement, l'étude a été réalisée avec des ellipses et des cercles et avec des matrices à 16 champs élémentaires. La méthode permettant d'opérer le changement d'échelle consiste à modifier, à chaque essai, la taille du capteur (voir plus haut, modalité 1). Ce changement d'échelle, manipulé par l'expérimentateur<sup>3</sup>, a pour effet de modifier le retour tactile pour une même portion d'espace exploré. Nous avons défini un rapport  $C^4 = M/h$  ( $M$  : la taille de la matrice,  $h$  : le grand axe de l'ellipse ou le diamètre du cercle) qui nous a permis de définir les tailles des ellipses et des matrices. Le tableau 1 résume les différentes tailles pour des valeurs de  $C$  égales à 0,2, 0,3, 0,4 et 0,5.

H (hauteur de la fig.)	Taille de la matrice M (Taille du champ élémentaire)			
	M1	M2	M3	M4
2 cm (Groupe 1)	4 mm (1 mm)	6 mm (1,5 mm)	8 mm (2 mm)	10 mm (2,5 mm)
3 cm (Groupe 2)	6 mm (1,5 mm)	9 mm (2,25mm)	12 mm (3 mm)	15 mm (3,75 mm)
4 cm (Groupe 3)	8 mm (2 mm)	12 mm (3 mm)	16 mm (4 mm)	20 mm (5 mm)
C	0,2	0,3	0,4	0,5

**Tableau 1.** Les différentes tailles de matrices et de formes en fonction du rapport  $C$

En ce qui concerne les ellipses, nous avons choisi une excentricité  $e=0,66$ . Dans l'expérience de Viviani, l'excentricité des ellipses était de 0,9 qui sont des ellipses plus aplaties. Comme la tâche demandée aux sujets est une tâche de discrimination, nous avons opté pour des ellipses beaucoup plus rondes dans le but de trouver les limites de la loi de puissance deux tiers et d'éviter de rendre l'exercice trop facile. On obtient ainsi pour chaque groupe, 12 combinaisons possibles : 4 tailles (M1, M2, M3 et M4) et 3 orientations possibles (Cercle (O2)<sup>5</sup>, ellipse horizontale (O1) et ellipse verticale (O3)).

<sup>3</sup> L'objectif final de la recherche vise à mettre au point un zoom haptique (le passage d'une taille de fenêtre à une autre), mais l'expérience elle-même porte sur l'exploration tactile de formes selon la taille de la fenêtre.

<sup>4</sup> Nous obtenons le facteur du zoom par le rapport  $1/C$ .

<sup>5</sup> Le cercle ne présentant pas d'orientation privilégiée, il est considéré ici comme une condition contrôle.

a) Les formes explorées et les matrices utilisées dans l'espace virtuel



b) Test formes

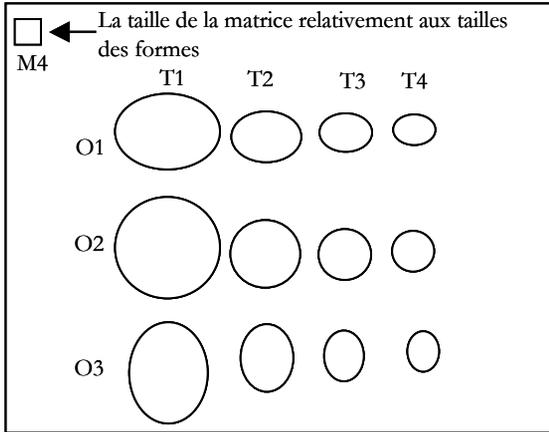


Figure 9. a) les tailles explorées, b) Les douze choix possibles sur la feuille test (échelle réduite)

Les sujets explorent une taille fixe (T4) avec différentes tailles de matrices. Si les sujets basent leur estimation de tailles sur la relation entre la taille de la matrice et la taille de la forme, la perception des distances se fait en référence à l'espace numérique et les réponses des sujets sont données en référence au monde virtuel dans lequel leur apprentissage est effectué. Les différentes tailles correspondant à la méthode 2 (zoom sur image) et les tailles des matrices sont affichées sur une feuille test (figure 9) comme on le voit sur le tableau 2.

M (taille de la matrice)	Grand axe de l'ellipse et le diamètre du cercle			
	T1	T2	T3	T4
10 mm (Groupe 1)	5 cm	3.33 cm	2.5 cm	2 cm
15 mm (Groupe 2)	7.5 cm	5 cm	3.75 cm	3 cm
20 mm (Groupe 3)	10 cm	6.66 cm	5 cm	4 cm
C	0,2	0,3	0,4	0,5

Tableau 2. Les différentes tailles des formes (affichées sur la feuille test) pour les trois groupes en fonction du rapport C

### 6.3 Procédure

#### Apprentissage

L'expérimentateur explique aux sujets, répartis en 3 groupes selon la taille des figures (voir tableau 1), le fonctionnement du dispositif. Durant cette phase, les sujets, yeux bandés, doivent se prononcer sur la taille et l'orientation de la figure (choisies aléatoirement par l'expérimentateur) et valider leurs réponses visuellement sur une feuille test (figure 9). Sur cette dernière sont illustrées les 12 combinaisons

possibles mais avec un zoom sur image ; en d'autres termes, ce ne sont pas les différentes tailles de matrices (M1, M2, M3 et M4) avec des tailles de figures fixes (voir méthode 1) qui sont représentées sur la feuille mais les différentes tailles des figures avec un champ récepteur fixe (voir méthode 2).

Durant cette phase d'apprentissage, les sujets ont un retour concernant leurs réponses afin de corriger leur estimation de taille et d'ajuster leurs mouvements suivant la figure présentée. Le sujet a 6 essais qui durent 90s chacun, choisis au hasard parmi les 12 combinaisons possibles (on s'assure que le sujet a exploré au moins une fois les quatre tailles et les trois orientations afin de pouvoir situer les tailles et les orientations les unes par rapport aux autres).

### ***Expérience***

Les conditions de la phase expérimentale sont les mêmes que celles de la phase d'apprentissage à la seule différence que, durant cette phase, les sujets n'ont pas un retour concernant leurs réponses. Le sujet explore les formes en ayant les yeux bandés durant un temps maximum de 90s et choisit une figure parmi les 12 figures possibles présentées sur une feuille. Le nombre d'essais est de 24 (2 fois les 12 combinaisons) présentés dans un ordre aléatoire (différent pour chaque sujet). A l'issue de l'ensemble des explorations, il est demandé au sujet d'explicitier ses stratégies d'exploration (les traces exploratoires sont enregistrées). L'objectif étant de définir des seuils de confort minimal et maximal pour le sujet, nous faisons l'hypothèse que ces derniers correspondent aux moments où le sujet ne parvient plus à percevoir correctement la figure. En d'autres termes, il ne sera plus sensible à la différence entre figures au-delà de ces seuils. Le seuil minimal correspond au moment où le sujet n'est plus capable d'ajuster ses mouvements afin de percevoir de petits objets tandis que le seuil maximal correspond au moment où le sujet ne peut se prononcer sur la forme car l'appréhension de celle-ci devient globale mais peu précise.

La forme explorée (dans les mondes virtuel et réel)	Les réponses attendues (affichées sur la feuille test)
T4 avec M1	T1
T4 avec M2	T2
T4 avec M3	T3
T4 avec M4	T4

**Tableau 3.** *Les réponses attendues selon la matrice utilisée quel que soit le groupe.*

Notre seconde hypothèse est la suivante : les sujets constituent initialement leur perception relativement à l'activité qu'ils déploient dans l'espace numérique puis valident ou invalident cette perception initiale relativement à l'activité qu'ils déploient dans l'espace corporel ; ceci devrait se traduire par la perception d'une taille plus grande que la taille de la figure (T4). En d'autres termes, selon cette hypothèse le sujet devra percevoir les réponses des tailles attendues qui figurent au tableau 3, ce qui doit se traduire par un taux de performance supérieur pour la réponse attendue.

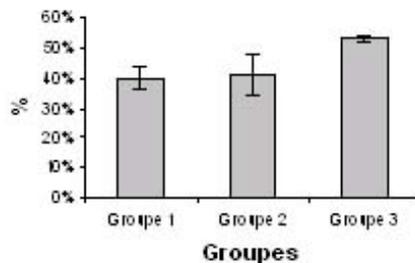
## **7 Résultats**

Les réponses des sujets ont été codées de la façon suivante : correcte = 1, fausse = 0 sur l'orientation puis sur la taille. Afin de regrouper les résultats des trois

groupes, nous avons testé l'effet de la taille et de l'orientation entre les différents groupes. Les moyennes des performances pour chaque modalité du facteur C ont été comparées par les tests de Kruskal-Wallis, d'ANOVA et post-hoc de Tukey.

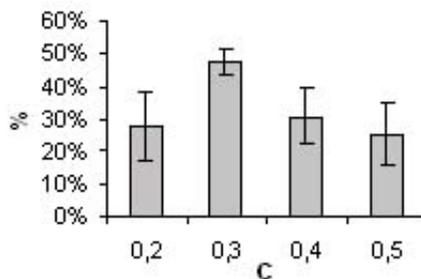
### 7.1 Seuils de confort

Comme le montre la figure 10, les performances sur l'orientation sont différentes selon les groupes. Le test de Kruskal-Wallis nous indique que l'effet de la variable groupe sur l'orientation est significatif [ $H = 6,639$  ;  $p < 0,05$ ]. Les tests des rangs par le test de Kruskal-Wallis révèlent que la moyenne du groupe 3 est significativement plus importante que celle des deux autres groupes. En effet, pour les plus grandes tailles d'ellipses (4 cm groupe 3), la réponse des sujets sur l'orientation augmente de manière significative. Ces différences entre groupes ne sont pas significatives sur la taille des figures.



**Figure 10.** Pourcentage de bonnes réponses par groupe (pour l'orientation).

En revanche, concernant la taille des figures<sup>6</sup>, l'effet du facteur C est significatif [ $F(3,80) = 5,7$  ;  $p = 0,001$ ]. Des tests post-hoc de Tukey (au seuil de significativité de  $p < 0,05$ ) révèlent que la modalité 0.3 du facteur C se distingue significativement des trois autres modalités du facteur. Comme le montre la figure 11, les performances pour la valeur 0.3 (48%) sont supérieures aux trois autres valeurs (respectivement 28% pour  $C=0,2$ , 31% pour  $C=0,4$  et 25% pour  $C=0,5$ ).



**Figure 11.** Pourcentage de bonnes réponses relatif à la taille des figures en fonction des modalités du facteur C, quel que soit le groupe.

<sup>6</sup> Il n'y a pas de différence entre les groupes concernant le facteur taille, nous pouvons regrouper les résultats.

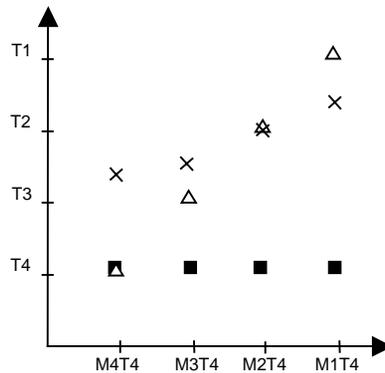
Ceci va dans le sens de nos hypothèses car nous nous attendions à trouver deux seuils de confort, l'un supérieur et l'autre inférieur. En effet, les performances augmentent de façon significative pour la modalité  $C=0.3$  (48%) alors qu'elles sont seulement à 28% (peu différente du hasard) pour la plus petite modalité de  $C$  (0.2). Ensuite, ces performances diminuent progressivement, jusqu'à atteindre 25% pour la dernière modalité qui correspond au hasard. Ceci nous amène donc à proposer que les seuils<sup>7</sup> minimal et maximal soient respectivement  $C = 0,2$  et  $0,4$ .

Notons que les performances maximales dans notre expérience avoisinent les 50%. Ceci est essentiellement dû au choix des figures. En effet, avec ce même dispositif, nous obtenons des performances supérieures (70% et plus) pour des ellipses aplaties (Sribunruangrit *et al.*, 2004). Dans notre cas, d'un côté, l'excentricité des ellipses choisies étant de 0.66, les ellipses sont arrondies et donc plus difficiles à différencier d'un cercle. D'un autre côté, le rôle de la proprioception dans le processus perceptif<sup>8</sup> réduit le taux de bonnes réponses. Afin d'améliorer ces taux, un temps d'apprentissage plus long serait nécessaire afin d'habituer et d'immerger le sujet dans l'espace numérique.

## 7.2 Espace de perception

Les réponses des sujets avec chacune des matrices pour les tailles attendues sont représentées sur le graphe de la figure 12. Nous remarquons qu'elles se rapprochent des réponses attendues et semblent, selon les tailles, être plus ou moins influencées par l'activité que le sujet déploie<sup>9</sup> dans l'espace corporel (figure 12).

- △ Réponse attendue
- Perception basée sur l'espace corporel
- × La réponse des sujets



**Figure 12.** Réponses observées des sujets et réponses théoriques dans l'espace corporel (perception basée sur l'espace corporel) et l'espace numérique (réponse attendue).

<sup>7</sup> Les valeurs des seuils min et max sont définies comme étant les valeurs des modalités du facteur  $C$  pour lesquelles les sujets produisent des réponses proches du hasard.

<sup>8</sup> Rappelons que dans l'espace réel du sujet, la taille de la forme ne change pas et que même s'il semble s'adapter à une perception de type numérique, la modalité kinesthésique joue un rôle crucial dans ce processus, entraînant un conflit avec ce qui est perçu dans l'espace numérique et réduisant ainsi les performances.

<sup>9</sup> Selon la stratégie utilisée.

Les taux de réponses correctes (réponse attendue) pour chaque taille de matrice pour les trois groupes (il n'y a aucun effet significatif entre les groupes pour l'estimation de la taille) sont résumés dans le tableau 4.

Les résultats avec la matrice M1 montrent que les meilleures réponses sont obtenues pour les grandes tailles (T1 et T2). Cet effet est significatif [ $F(3, 80) = 4,67$  ;  $p = 0,004$ ] et les tests post-hoc de Tukey révèlent que les performances pour T2 se distinguent de T3 et T4 mais pas de T1. La différence de performances entre les grandes tailles (T1 et T2) et les petites tailles (T3 et T4) est clairement faite avec M1 qui est la plus petite matrice et qui correspond, selon notre hypothèse, à T1. Mais nous avons également constaté que la différence entre T1 et T2 n'est pas évidente pour les sujets.

	T1	T2	T3	T4
M1T4	<b>28%</b>	37%	18%	17%
M2T4	19%	<b>48%</b>	18%	15%
M3T4	12%	40%	<b>31%</b>	17%
M4T4	11%	29%	35%	<b>25%</b>

**Tableau 4.** Pourcentage de réponses pour chaque taille selon les différentes matrices (quel que soit le groupe) ; la diagonale (en gras) correspond aux réponses attendues.

Les performances avec M2 sont meilleures pour T2 et correspondent à la réponse attendue. Cet effet est significatif [ $F(3, 80) = 16,43$  ;  $p < 0,01$ ] et les tests post-hoc de Tukey (au seuil de significativité de  $p < 0,05$ ) révèlent que T2 est significativement distinguable de T1, T3 et T4.

L'effet avec la matrice M3 est significatif [ $F(3, 80) = 10,89$  ;  $p < 0,01$ ] et les tests post-hoc révèlent que les performances de T2 et T3 sont clairement distinguables de T1 et T4 et que la différence entre T2 et T3 n'est pas significative. Avec M3, les sujets situent la taille de la forme entre T2 et T3 et rejettent les deux autres possibilités, c'est-à-dire T1 et T4.

Enfin avec M4, l'effet est significatif [ $F(3, 80) = 7,86$  ;  $p < 0,01$ ] et les sujets semblent beaucoup plus déstabilisés car la distinction entre T2, T3 et T4 n'est pas du tout évidente. Cependant, ils font clairement la distinction entre T1 vs. (T2, T3 et T4). En effet, les tests post-hoc révèlent que les performances de T2, T3 et T4 se distinguent clairement des performances obtenues avec T1.

### 7.3 Stratégies

Afin de trouver l'orientation et d'estimer la taille des figures, les sujets font appel à une (ou plusieurs) stratégie(s) durant l'expérience. Ces stratégies ont été définies à partir des trajectoires enregistrées des sujets et de leurs verbalisations (il leur est demandé d'explicitier leurs stratégies).

Trois principales stratégies ont été utilisées (figure 13) : la stratégie du contour (Co) utilisée par 2 sujets, le macro-balayage horizontal et vertical (MaB) utilisé par 5 sujets et la stratégie des axes (A) à partir du centre utilisé par 7 sujets. 3 sujets ont combinés la stratégie des axes et la stratégie du contour (A + Co) et 3 sujets ont eu recours à la stratégie des axes avec la stratégie des extrémités (A + E).

Le pourcentage de bonnes réponses pour l'orientation selon les différentes stratégies est visible en figure 14.

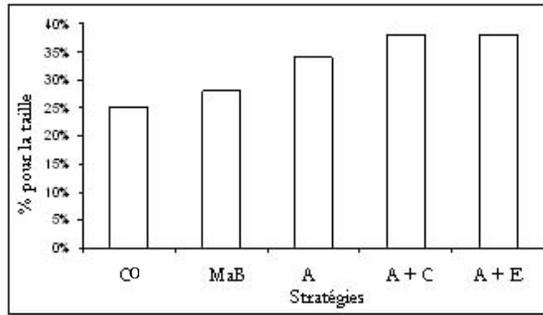


Figure 13. Pourcentage de bonnes réponses pour la taille selon les différentes stratégies.

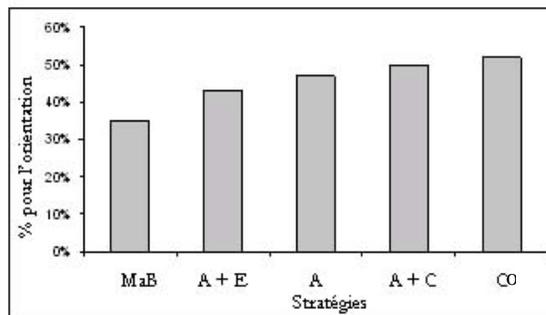
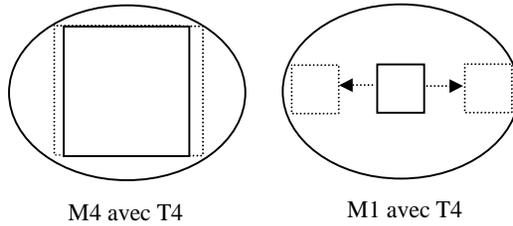


Figure 14. Pourcentage de bonnes réponses pour l'orientation selon les différentes stratégies.

### **Stratégie des axes à partir du centre (A)**

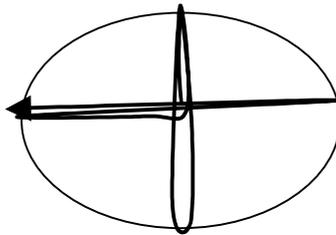
Utilisée seule ou fusionnée avec une autre stratégie, elle est l'une des stratégies les plus efficaces pour l'évaluation de la taille de la forme (figure 16). A partir du centre de celle-ci, le sujet dessine virtuellement les axes de symétrie dans le but de croiser la forme. Dans notre cas, la taille des figures ne change pas puisque le changement est virtuel et s'opère sur la matrice.

Avec cette stratégie, les sujets devraient être capables d'avoir une idée assez précise de la distance parcourue et donc de la taille de figure puisque c'est la main du sujet qui se déplace sur la tablette. Mais au lieu de cela, les sujets comptent le nombre de fois que la matrice peut être placée à l'intérieur de la forme même s'ils n'ont aucune idée de la taille de la matrice qu'ils utilisent. Comme le montre la figure 15, l'espace de déplacement possible à l'intérieur de la forme est particulièrement réduit avec M4 comparativement à M1. Ainsi, un petit déplacement avec M4 à l'intérieur de la forme active les picots dans un laps de temps très court en comparaison du temps mis pour déplacer M1 à l'intérieur de la même forme. Ce temps, étant plus long, donne l'illusion aux sujets de traverser une plus grande distance.



**Figure 15.** Déplacements de M4 et M1 à l'intérieur d'une même forme

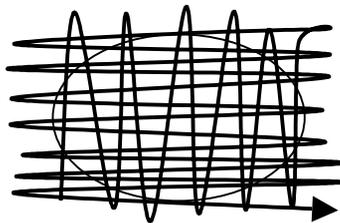
Même si cette stratégie reste plus efficace pour la taille, elle est utilisée aussi pour statuer sur l'orientation. Dans ce cas, ce n'est plus la forme circulaire ou elliptique qui est reproduite mais c'est la comparaison entre l'axe vertical et horizontal qui permet au sujet de donner sa réponse.



**Figure 16.** Stratégie des axes

**Stratégie du macro-balayage horizontal et vertical (MaB)**

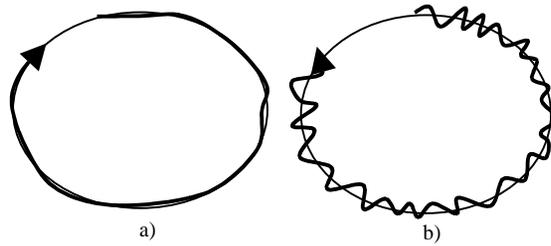
Elle consiste à faire un balayage dans les deux sens (vertical et horizontal) sur la forme (figure 17). Elle semble la moins efficace pour la détection de l'orientation et l'estimation de la taille (seulement 28% et 35% respectivement pour la taille et l'orientation (figures 13 et 14)).



**Figure 17.** Stratégie du macro-balayage

**Stratégie du contour (Co)**

Dans cette stratégie, le sujet fait le tour de la forme en utilisant un suivi continu ou un microbalayage : avec le suivi continu, le sujet fait le tour de la forme en essayant d'être en contact permanent avec elle (les picots restent pratiquement tout le temps levés) (figure 18a).

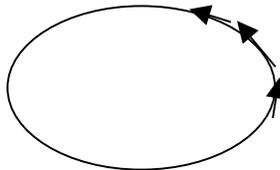


**Figure 18.** *Stratégie du contour : a) suivi continu ; b) microbalayage*

Durant le micro balayage, le sujet effectue une oscillation rythmique sur la forme ; il la quitte volontairement pour la retrouver en essayant de garder un intervalle régulier entre le moment où il la quitte et le moment où il la retrouve (figure 18b). La stratégie du contour est très efficace pour l'orientation. En effet, selon la figure 14, les taux de réussite atteignent les 52% lorsqu'elle est utilisée seule et les 50% lorsqu'elle est combinée avec la stratégie des axes. En faisant le tour de la forme, cette stratégie permet aux sujets d'avoir une idée plus précise sur le mouvement elliptique qu'ils exécutent. En fonction de la forme, ils peuvent être plus ou moins précis sur son orientation car leur mouvement de main est soit plus arrondi soit aplati (verticalement ou horizontalement).

#### ***Stratégie des extrémités (E)***

Cette stratégie a été combinée avec la stratégie des axes. Elle permet en plus d'avoir une idée sur la tangente de la forme. En effet, les sujets essayent de toucher avec le bord de la matrice les différentes extrémités de la forme comme s'ils dessinaient la tangente de cette dernière afin d'obtenir une information supplémentaire sur la courbure (figure 19). Elle semble efficace pour l'orientation et la taille de la forme (figures 13 et 14).



**Figure 19.** *Stratégie des extrémités*

## **8 Discussion**

Les résultats ont montré, quelle que soit la matrice utilisée, qu'il y a une surestimation de la taille réelle de la forme (T4). Ceci va dans le sens de notre hypothèse selon laquelle la perception est basée sur l'activité du sujet dans l'espace numérique ; l'activité du sujet dans l'espace corporel jouant un rôle d'ajustement afin de confirmer ou d'infirmer la perception dans l'espace numérique. En effet, avec la plus petite matrice M1, les sujets situent les tailles des formes explorées entre

les tailles les plus grandes, c'est-à-dire T1 et T2. Ainsi l'illusion<sup>10</sup> de parcourir une plus grande distance sur une même portion de l'espace réel semble effective en dépit du fait que les sujets ont des difficultés à distinguer clairement T1 et T2. A ce niveau d'échelle, les mouvements de la main avec M1 ne sont pas si différents des mouvements de la main avec M2 parce que l'intervalle d'oscillation est relativement identique. Nous pensons que les performances seront meilleures pour T1 si les mouvements de la main avec M1 deviennent plus petits que les mouvements de la main avec M2. Ceci peut être obtenu avec un apprentissage plus long ; six essais sont probablement insuffisants pour permettre la distinction entre deux tailles adjacentes.

Avec M2, les réponses des sujets sont plus précises et en général sans confusion. Le rapport entre la taille de la matrice et la taille de la figure qui semble le plus efficace pour cette expérience est limité par la valeur du seuil minimal  $C = 0,2$ .

En effet, rappelons que ces résultats nous ont permis de définir les seuils de confort minimal et maximal qui correspondent aux valeurs du facteur C égales respectivement à 0,2 et 0,4. En effet, quelque soit la taille des figures, les performances pour le facteur  $C = 0,2$  ne dépassent pas les 28% alors qu'elles atteignent les 48% pour la valeur de C qui est juste au-dessus (0,3). Les performances avec un rapport 0,3 sont meilleures que celles obtenues avec les autres valeurs de C. Ce résultat est important car il nous informe sur la valeur du zoom avant. En effet, la plus petite matrice M1 est sensée être le niveau de zoom qui fournit la meilleure résolution et donne plus de détails au sujet. Par ailleurs, elle amène le sujet à parcourir une plus grande distance « subjective » que celle parcourue avec M4 mais ne lui permet pas d'avoir un ajustement précis de ses mouvements. A ce stade, le positionnement sur la figure et son accrochage deviennent délicats d'où la chute des performances à ce niveau. Quant au seuil de confort maximal ( $C = 0,4$ ), il correspond au moment où le sujet reçoit une information globale mais très peu détaillée et qui ne lui permet pas de statuer sur la forme en question. En effet, avec les plus grandes matrices (M3 et M4), les réponses des sujets sont plus dispersées et plus confuses.

Il reste à généraliser ses valeurs à d'autres formes géométriques (angulaires par exemple). Notre première impression est que ces valeurs de seuils resteront inchangées puisque le facteur C (hauteur de la figure - hauteur du champ récepteur) est indépendant de la nature de la figure et que la loi de puissance deux tiers peut s'appliquer à d'autres formes. Ici nous avons choisi des formes elliptiques dans un souci de comparaison avec les travaux de Viviani. Nous souhaitons utiliser ces résultats afin de vérifier cette loi de puissance deux tiers et voir si les trajectoires des sujets conservent les propriétés d'un geste. L'autre résultat important est celui relatif à l'orientation des formes et ce, indépendamment de la taille des matrices, et donc indépendamment de C. Une hauteur égale à 4 cm (groupe 3) a permis aux sujets d'être plus précis sur l'orientation de la forme alors que pour les hauteurs inférieures (groupes 1 et 2), les sujets avaient plus de mal à se prononcer sur l'orientation. Le fait d'effectuer de plus grands mouvements permet aux sujets de reproduire le geste elliptique avec une précision supérieure.

Enfin, les stratégies confirment que les sujets basent leurs réponses sur les mouvements produits dans le monde virtuel puisqu'ils prennent en compte la taille de la matrice (qui est virtuelle) relativement à la taille de la forme. En effet, les meilleures performances sont obtenues avec la stratégie des axes (qui est utilisée par

---

<sup>10</sup> L'illusion est perçue du point de vue de l'expérimentateur car le sujet ne vit pas son expérience en tant qu'illusion puisque le sujet pense réellement que les tailles changent.

la majorité des sujets). Ceci est paradoxal parce que ces stratégies font appel aux déplacements de la main qui se font dans l'espace corporel mais nous pensons que les sujets sont immergés dans la tâche virtuelle qu'ils ont à accomplir et s'approprient ces stratégies au profit de l'espace numérique. Ainsi, en fonction de la taille de la matrice, les sujets réduisent ou augmentent leur vitesse de mouvements afin de percevoir correctement les formes. Cette variation de vitesse n'est pas spontanée au début mais devient de plus en plus intuitive. En effet, au début de l'expérience, les sujets pensent à la tâche qu'ils ont à accomplir et leur exploration n'est pas immersive mais cognitive (Auvray, 2004). Afin d'éviter une exploration cognitive, nous avons choisi d'aider les sujets en leur donnant un feedback concernant leurs réponses lors de la phase d'apprentissage afin de leur donner la possibilité de corriger leur première estimation de la taille et de situer celle-ci parmi les autres.

Enfin, la stratégie des axes apparaît plus efficace pour l'appréciation de la taille car elle est centrée plus sur une estimation de distance plutôt que sur une reproduction de mouvements. Les stratégies du suivi continu et des extrémités semblent mieux convenir à l'orientation car elles permettent en quelque sorte de reproduire la forme ou d'estimer sa courbure.

## **9 Conclusion et perspectives**

Les sujets arrivent à déployer des stratégies opérantes et qui diffèrent selon le type de tâches (repérer une orientation et estimer une taille) qui leur sont demandées. Repérer une orientation revient à produire le mouvement de cette orientation et estimer une taille revient à parcourir une distance sur un espace donné ce qui permet ici d'induire une illusion de taille. En effet, afin d'estimer les différentes tailles, ils parcourent une distance sur un espace fixe mais ont l'illusion que ces tailles changent alors qu'elles demeurent fixes tout au long de l'expérience (seules les matrices changent de taille).

L'illusion sera beaucoup plus évidente si les sujets manipulent successivement les tailles durant un même essai. Pour cette raison, dans un travail futur, nous allons soumettre les sujets à une manipulation continue des tailles de matrices.

Nous avons obtenu deux seuils de confort : un seuil minimal qui correspond à une valeur  $C = 0,2$  et un seuil maximal qui correspond à une autre valeur  $C = 0,4$  et qui se rapportent respectivement à des limites du zoom avant et arrière. Le zoom sur la fenêtre de capture est donc fructueux si le rapport entre la figure et la matrice se situe entre ces seuils et si la taille des formes explorées est suffisamment grande (à partir de 4 cm). Si le rapport entre la matrice et la forme se situe entre ces seuils, nous avons constaté que la perception dans l'espace numérique peut être mieux exploitée afin d'immerger les sujets dans le monde virtuel. Ainsi, dans un monde virtuel, l'espace numérique peut contraindre et calibrer l'espace corporel d'un sujet immergé dans ce monde. Cependant, certaines interférences peuvent apparaître en le faisant revenir au monde réel et en rendant difficile la distinction entre deux objets adjacents. Nous devons maintenant définir dans la suite du travail des pas de zoom pertinents pour la reconnaissance des objets. Ce choix est important pour déterminer le seuil différentiel, c'est-à-dire l'écart minimal entre deux tailles donnant lieu à un sentiment de changement d'échelle.

Enfin, afin de valider l'apport d'une fonction zoom haptique dans un PDA, nous comptons mettre les sujets en situation d'usage en les soumettant à une tâche de pointage qui consiste à pointer visuellement sur des objets non visibles à l'écran et disponibles uniquement via un zoom haptique. Le Stylet PDA utilisé est le

Tactipen (Lecolinet et Mouret, 2005) qui a été réalisé à partir de la coque d'un surligneur, choisi suffisamment large pour contenir une cellule Braille (8 picots). Le surligneur a été vidé de son contenu et le stylet PDA et la cellule Braille y ont été insérés (figure 20). Le dispositif est relié, par le biais d'un câble, à l'électronique de commande.



Figure 20. Tactipen

L'idée est d'utiliser le Tactipen avec un PDA dans une tâche de pointage d'objets non visibles à l'écran et disponibles uniquement par le biais d'un zoom haptique. Le zoom est virtuel et est effectué sur la matrice. Les écrans des PDAs étant petits, il est plus fonctionnel de garder la taille de l'image fixe et accéder au détail via un zoom sur matrice afin d'éviter aux sujets l'utilisation excessive des barres de défilements. Voici le détail de la situation de validation.

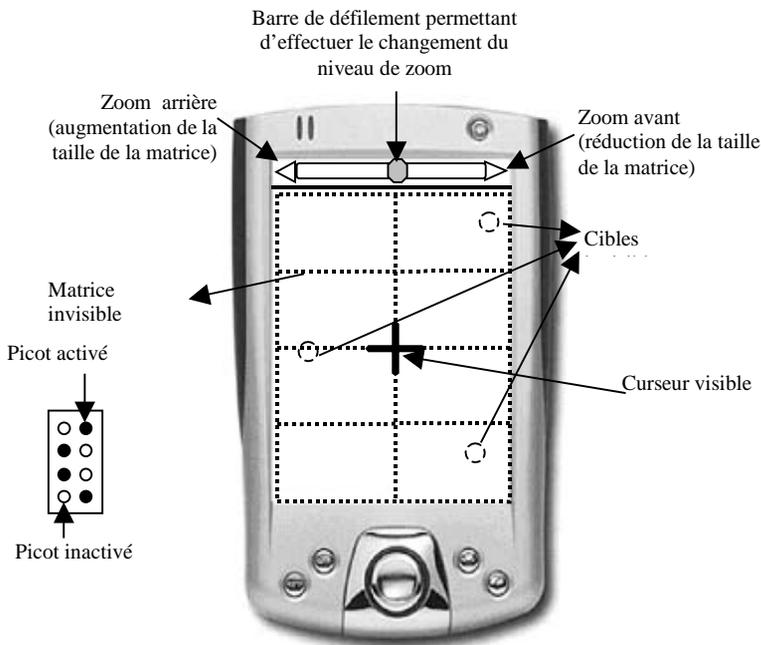
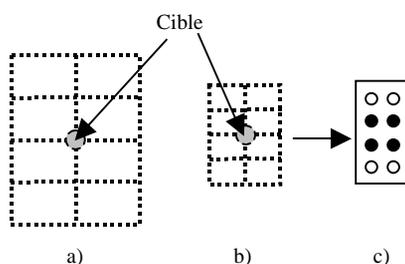


Figure 21. Une version mobile de Tactos destinée à une tâche de pointage sur un PDA

Comme le montre la figure 21, le jeu consiste en la détection tactile de plusieurs cibles non visibles. Les sujets ont pour tâche de pointer sur les cibles à partir du moment où elles deviennent perceptibles tactilement. Ils doivent

manipuler un « zoom discret sur matrice » en utilisant une jauge affichée sur la partie supérieure de l'écran du PDA (pour le zoom avant et le zoom arrière). La plus grande taille de matrice a exactement la taille de l'écran afin de permettre une vue globale de la position des cibles présentes. Les matrices ne sont pas visibles à l'écran afin de permettre au sujet de choisir « la bonne matrice », la matrice ayant une résolution correspondante à la cible. En effet, chaque cible est définie de manière à être sensible à une résolution spécifique qui diffère d'une cible à l'autre.

En d'autres termes, seule une taille spécifique de matrice sera en mesure de détecter la cible et la faire apparaître à l'écran (figures 22a et 22b). Le curseur (la croix en gras sur la figure 21), est visible afin de permettre un pointage précis sur les cibles. Quand le sujet aura trouvé la bonne résolution et pointe sur la cible, les quatre picots centraux seront activés (figure 22c) en faisant apparaître la cible à l'écran. Le jeu se terminera quand le sujet aura trouvé toutes les cibles.



**Figure 22.** a) Les quatre champs élémentaires sur la cible : la taille de la matrice est trop grande pour faire apparaître la cible « mauvaise résolution », b) Les quatre champs élémentaires sur la cible : la résolution correspond et active les quatre picots centraux (c).

Un des objectifs de cette future expérience est de tester la précision des sujets dans une tâche de pointage en trouvant les facteurs les menant au choix de la « bonne matrice ». Les stratégies de la présente étude ont montré que les sujets basaient leurs réponses sur la taille relative entre la matrice et la forme. Enfin, le pointage avec un zoom virtuel nous permettra de comparer ces résultats avec les seuls travaux effectués dans le domaine de pointage sur les interfaces zoomables qui opérationnalisent un zoom réel (Bourgeois *et al.*, 2001 ; Bourgeois et Guiard, 2002 ; Guiard et Beaudouin-Lafon, 2004).

## Remerciements

Ce travail s'inscrit dans un projet dédié aux interfaces zoomables et a bénéficié du soutien financier du CNRS (PI –TCAN – Dept. STIC).

## Références

Auvray, M. (2004). *Immersion et perception spatiale. L'exemple des dispositifs de substitution sensorielle*. Thèse de doctorat, Laboratoire de psychologie expérimentale de l'Université Paris 5, Paris, France.

Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*. New York, Academic Press.

- Beaudouin-Lafon, M. (2000). Instrumental Interaction: an Interaction Model for Designing Post-WIMP User Interfaces. In *Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction (CHI'00)*, ACM Press, 446-453.
- Bederson, B.B., Hollan, J.D. (1994). Pad++: A Zooming Graphical Interface for Exploring Alternate Interface Physics. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'94)*, ACM Press, 17-26.
- Bederson, B.B., Meyer, J., Good, L. (2000). Jazz: An Extensible Zoomable User Interface Graphics Toolkit in Java. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'00)*, CHI Letters, 2(2): 171-180.
- Bederson, B.B. (2001). PhotoMesa: A Zoomable Image Browser Using Quantum Treemaps and Bubblemaps. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'01)*, CHI Letters, 3(2): 71-80.
- Bederson, B.B., Clamage, A., Czerwinski, M.P., Robertson, G.G. (2004). DateLens: A Fisheye Calendar Interface for PDAs. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 11(1), 90-119.
- Bourgeois, F., Guiard, Y. (2002). Multiscale Pointing: Facilitating Pan-Zoom Coordination. In *Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction (CHI'2002)*, ACM Press, 758-759.
- Bourgeois, F., Guiard, Y., Beaudouin-Lafon, M. (2001). Pan-Zoom Coordination in Multi-Scale Pointing. In *Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction (CHI'2001)*, ACM Press, 157-158.
- Brewster, S.A., King, A. (2005). The Design and Evaluation of a Vibrotactile Progress Bar. In *Proceedings of WorldHaptics'05 (March 18-20, 2005, Pisa, Italy)*, IEEE Press, 499-500.
- Furnas, G., Bederson, B.B. (1995). Space-scale diagrams: Understanding multiscale interfaces. In *Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction (CHI'95)*, ACM Press, 234-241.
- Guiard, Y., Beaudouin-Lafon, M., Mottet, D. (2004). Target acquisition in multiscale electronic worlds. *International Journal of Human Computer Studies*, 61(6), 875-905.
- Harrison, B.L., Fishkin, K., Gujar, A., Mochon, C., Want, R. (1998). Squeeze me, hold me, tilt me! An exploration of manipulative user interfaces. In *Proceedings of CHI'98*, ACM Press, 17-24.
- Harrison, B.L., Kurtenbach, G., Vincente, K.J. (1995). An Experimental Evaluation of Transparent User Interface Tools and Information Content. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'95)*, ACM Press, 81-90.
- Hightower, R.R., Ring, L., Helfman, J., Bederson, B.B., Hollan, J.D. (1998). PadPrints: Graphical Multiscale Web Histories. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'98)*, ACM Press, 121-122.
- Hinckley, K., Pierce, J., Sinclair, M., Horvitz, E. (2000). Sensing Techniques for Mobile Interaction. In *Proceedings of UIST'00*, ACM Press, 91-100.

- Jern, M., Ricknäs, D., Stam, F., Treloar, R. (1993). Visual User Interface for PDAs. In *Proceedings of International Conference on Information Visualization (IV'03)*, 16-18 July 2003, London, IEEE Computer Society.
- Jones, M., Marsden, G., Mohd-Nasir, N., Boone K., Buchanan, G. (1999). Improving Web Interaction on Small Displays. *International Journal of Computer and Telecom. Network*, Vol. 31, 1129-1137.
- Jul, S., Furnas, G.W. (1998). Critical Zones in Desert Fog: Aids to Multiscale Navigation. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST 98)*, ACM Press, 97-106.
- Kamba, T., Elson, S.A., Harpold, T., Stamper, T., Sukaviriya, P.N. (1996). Using Small Screen Space More Efficiently. In *Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction (CHI'96)*, ACM Press, 383-390.
- Kurze, M. (1998). TGuide: a guidance system for tactile image exploration. In *Proceedings ACM Conference on Assistive Technologies*, ACM Press, 85-91.
- Kwang L.B., Grice R.A. (2003). Embedded-Zooming Applications for PDAs. In *IPCC'03*, September 21-24, Orlando, Florida, held by *IEEE Professional Computer Society*, 2003.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C.A., Viviani, P. (1983). The law relating kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Lecolinet, E., Mouret, G. (2005). TACTIBALL, TACTIPEN, TACTITAB ou comment « toucher du doigt » les données de son ordinateur. In *17<sup>ème</sup> Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'05)*, ACM Press, 227-230.
- Lee, G., Hannaford, B. (2003). Anisotropies of Touch in Haptic Icon Exploration. In *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 27-31, Las Vegas.
- Lenay C., Cannu S., Villon P. (1997). Technology and Perception: the Contribution of Sensory Substitution Systems. In *Proceedings Second International Conference on Cognitive Technology*, Aizu, Japan, Los Alamitos: IEEE, 44-53.
- Lenay C., Gapenne O., Hannelton S., Marque C., Genouëlle C. (2003). Sensory Substitution, Limits and Perspectives. In Y. Hatwell, A. Streri, E. Gentaz (Eds.), *Touch for Knowing: cognitive psychology of haptic manual perception*, John Benjamins Publishers, Amsterdam, 275-292.
- Oakley, I., Ängeslevä, J., Hughes, S., O'Modhrain, S. (2004). Tilt and feel: Scrolling with vibrotactile display. In *Proceedings of EuroHaptics*, 5 - 7 June, Munich, Germany.
- O'Regan, J.K., Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939-1011.
- Perlin, K., Fox, D. (1993). Pad: An Alternative Approach to the Computer Interface. In *Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Conference on Computers Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'93)*, San Diego, California, 57-64.
- Pook, S., Lecolinet, E., Vaysseix, G., Barillot, E. (2000). Context and interaction in zoomable user interfaces. In *AVI 2000*, ACM Press, 227-231.

- Poupyrev, I., Maruyama, S., Rekimoto, J. (2002). Ambient Touch: Designing tactile interfaces for handheld devices. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'02)*, ACM Press, 51-60.
- Poupyrev, I., Maruyama, S. (2003). Tactile Interfaces for Small Touch Screens. In *Proceedings of User Interface and Software Technology (UIST'03)*, ACM Press, 217-220.
- Sribunruangrit, N., Marque, C., Lenay, C., Hanneton, S., Gapenne, O., Vanhoutte C. (2004). Speed-Accuracy Tradeoff During Performance of a Tracking Task Without Visual Feedback. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 12 (1), 131-9.
- Stewart, J., Gapenne, O. (2004). Reciprocal Modelling of Active Perception of 2-D Forms in a Simple Tactile-Vision Substitution System. *Minds and Machines*, 14, 309-330.
- Yee, K.-P. (2003). Peephole Displays: Pen Interaction on Spatially Aware Handheld Computers. In *Proceedings of CHI'03*, ACM Press.
- Ziat, M., Gapenne, O., Lenay, C., Stewart, J. (2002). Prothèses Perceptives : Acuité dynamique et stratégies d'explorations. In *Journée du RESCIF*, Collège de France, Paris, p. 50.
- Ziat, M. (2004). Scaling form or sensor: A question for the design of a pseudo-haptic zoom dedicated to PDA. In *Doctoral Consortium, Designing Interactive Systems (DIS'04)*, Cambridge, Massachusetts, 1- 4 August.
- Ziat, M., Gapenne, O. (2005). Etude préliminaire visant la détermination de seuils de confort pour un zoom haptique. In *17<sup>ème</sup> Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'05)*, ACM Press, 3-10.
- Ziat, M., Gapenne, O., Lenay, C., Stewart, J. (2004). Acuité perceptive via une interface pseudo-haptique, In *16<sup>ème</sup> Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'04)*, ACM Press, 263-266.
- Ziat, M., Gapenne, O., Stewart, J., Lenay, C. (2005). A comparison of two methods of scaling on form perception via a haptic interface. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI'05)*, Trento, Italy, October 4-6, 2005.