

Le Pointage bi-échelle :
Evaluation de quatre variantes d'interfaces graphiques utilisateur

Didier Gonzalez ^{1,2} Didier Casalta ³ Yves Guiard ³ Denis Mottet ²

1/ Laboratoire d'Aérodynamique et de Biomécanique du Mouvement, CNRS & Université de la Méditerranée

2/ Laboratoire Sport Performance Santé, Université de Montpellier I

3/ Laboratoire Mouvement et Perception, CNRS & Université de la Méditerranée

Correspondance

Didier Gonzalez - Laboratoire d'Aérodynamique et de Biomécanique du Mouvement, USR 2164, CNRS & Université de la Méditerranée, CP 918, 163 Avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 9 (France)

- Tél : 04 91 26 62 42

- Fax : 04 91 41 16 91

- Email : gonzalez@morille.univ-mrs.fr

Résumé

Les interfaces graphiques courantes de nos ordinateurs créent un contexte nouveau pour poser la question classique du contrôle des mouvements de pointage, spécialement dans les tâches à très haut indice de difficulté. Un fait nouveau est que le mouvement comporte souvent deux phases successives. La première consiste en un *macro-pointage* (amener la vue dans la région de la cible, dans l'espace global du document) et la seconde en un *micro-pointage* (amener le curseur sur la cible, maintenant visible dans l'espace local de la vue), la composante macro du pointage occupant une proportion croissante du temps de mouvement quand la difficulté de la tâche augmente. Utilisant une approche chronométrique, nous avons examiné le pointage bi-échelle dans quatre situations-types d'interface utilisateur (bi-manuelle, uni-manuelle intégrée, uni-manuelle XY et avec barres de défilement). Nos données montrent que le procédé fort répandu des barres de défilement, qui interdit une manipulation directe du document, est peu efficace pour le pointage bi-échelle. Nous montrons que la manipulation directe améliore les performances, et qu'elle gagne à être réalisée dans un espace XY intégré. Nous évaluons et discutons enfin l'impact sur les performances d'une assignation séparée des deux composantes de la tâche de pointage aux deux mains (macro-pointage à la main gauche, micro-pointage à la main droite).

Titre courant

Pointage bi-échelle.

Mots clés

Pointage, pointage bi-échelles, interaction homme-machine, interaction bi-manuelle.

Abstract

The graphical user interfaces of our current computers create a new context for tackling the classic issue of aimed movement, especially in the case of highly difficult tasks. A new feature is that the pointing often involves two successive phases. The first phase consists of *macro-pointing* (bringing the view to the vicinity of the target, the document providing the global frame of reference of the movement) and the second of *micro-pointing* (bringing the cursor to the target, now visible in the local frame of reference of the view), with the macro component of pointing representing an increasing proportion of movement time as task difficulty is scaled up. Focusing on movement time, we investigated two-scale pointing in four categories of interface (with traditional scrollbars, with direct manipulation with separate and integrate spatial dimensions, with one and with two hands). Our data show that the efficiency of the widely spread scrollbars device is limited, presumably because it precludes the direct manipulation of the document. We also show that, with direct manipulation of the document, performance improves when the *XY* dimensions are integrate, rather than separated. Finally, we evaluate and discuss the impact on performance of separating the two components of the task between the two hands (macro-pointing to the non-preferred hand and micro-pointing to the preferred hand).

Keywords

Pointing, two-scale pointing, human-computer interaction, bi-manual interaction.

I. INTRODUCTION

I.1. La loi de Fitts

L'étude des mouvements de pointage vers une cible, véritable modèle réduit de comportement, est devenu un paradigme de recherche important à la fois au plan fondamental et au plan appliqué. Historiquement, les travaux fondamentaux sur le geste de pointage remontent à la fin du 19^e siècle (Woodworth, 1899) et se sont poursuivis avec la mise en évidence de la loi de Fitts, l'une des rares lois quantitatives de la motricité (Fitts 1954 ; Fitts & Peterson, 1964).

Cette loi, dont le domaine de validité est remarquablement large, stipule que le temps d'acquisition d'une cible (ou temps de mouvement, TM) croît linéairement avec la quantité d'information nécessaire à spécifier la cible, qui définit l'indice de difficulté de la tâche (ID) :

$$TM = a + b ID \quad (1)$$

Depuis le travail initial de Fitts, la définition de l' ID a fait l'objet de réévaluations (Mottet & Bootsma, 1997 ; Plamondon & Alimi, 1997). Les travaux récents ont bien montré que la proposition initiale de Fitts (1954) pour une cible de taille W à une distance D :

$$ID = \log_2 (2D/W) \quad (2)$$

pose de nombreux problèmes pratiques (notamment, l' ID est non défini si $D = 0$ et il est négatif si $D < W$) mais surtout théoriques. En effet, le théorème 17 de la théorie de l'information (Shannon & Weaver, 1949) montre que le débit informationnel I d'un système de transmission bruité de bande passante C et de rapport signal/bruit S/B s'écrit :

$$I = C \log_2 (S/B + 1) \quad (3)$$

Par analogie, la quantité d'information nécessaire pour se déplacer d'une distance D avec une tolérance d'erreur de W devient :

$$ID = \log_2 (D/W + 1). \quad (4)$$

On admet aujourd'hui que cette version de l' ID est à la fois en accord avec l'idée initiale de Fitts (1954) et la plus correcte conceptuellement (McKenzie, 1992).

I.2. Le pointage en interaction homme-machine

Située à l'intersection de l'informatique et de la psychologie, l'interaction homme-machine (IHM) a contribué depuis une vingtaine d'années à revivifier l'étude du mouvement orienté vers

une cible (Card, English, & Burr, 1978). Depuis l'apparition des ordinateurs graphiques et des périphériques d'entrée de type souris, en effet, c'est sur l'acte élémentaire de pointage que repose entièrement l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement graphique. Avec la souris, l'utilisateur peut déplacer un curseur d'écran, et en cliquant (par exemple sur un élément de menu) il va déclencher un programme qui, à son tour, pourra appeler un nouveau pointage (si, par exemple, le click a ouvert une boîte de dialogue). De fait, le pointage est devenu omniprésent dans l'interaction entre l'humain et l'ordinateur. Il est à ce point central dans l'interface graphique actuelle qu'on désigne souvent celle-ci comme l'interface *WIMP*, pour *Windows, Icons, Menus, and Pointers*. On ne s'étonnera pas, dès lors, que les chercheurs s'emploient activement à améliorer les conditions du pointage, notamment en mettant au point des procédés qui réduisent artificiellement la distance de la cible (McGuffin & Balakrishnan, 2002) ou produisent une expansion de la cible lorsque le curseur s'en approche (Zhai, Conversy, Beaudouin-Lafon & Guiard, 2003).

1.3. Notion de pointage bi-échelle

Le sens du terme pointage est conforme à son étymologie : pointer (par exemple avec un pointeur laser) c'est faire correspondre un point avec une cible occupant une certaine surface. Les chercheurs se sont focalisés jusqu'à ce jour sur le cas du curseur ponctuel. Or ce cas n'épuise pas le problème du pointage, comme le montrent bien nos interfaces graphiques courantes : le *défilement de la vue dans le document* (ou du document sous la vue), destiné à rendre visible une partie du document située en dehors de la vue courante, se laisse également modéliser comme un pointage. Pour acquérir une cible située hors de la vue courante et dont la localisation approximative est connue, il est d'abord nécessaire de faire défiler le document de manière à capturer la cible avec la vue—pas encore avec le curseur. Dans la tâche de défilement, le curseur, tout comme la cible, est une surface (Fitts, 1954, Expérience 2), mais nous avons toujours affaire à une tâche de pointage dont les paramètres restent parfaitement définis selon l'Equation 1. Comme l'illustre la Figure 2, D est la distance séparant le centre de la cible du centre de la vue et W est la somme de la largeur de la cible et de la largeur de la vue.

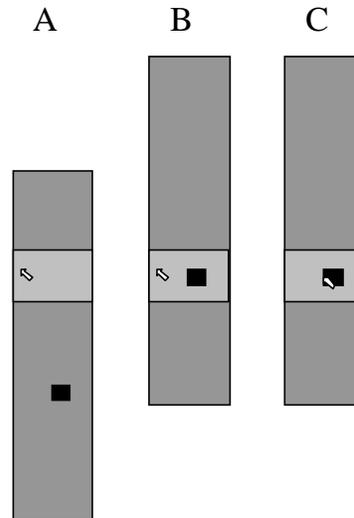


Figure 1. Défilement du document (rectangle gris foncé) derrière la vue (rectangle gris clair) et déplacement du curseur (flèche) dans une tâche d'acquisition de cible (carré noir) réduite à la seule dimension verticale. On illustre un document qui se déplace sous une vue fixe, mais le repérage inverse reviendrait au même. Initialement (en A), la cible est hors de la vue. De A à B, le défilement a permis de capturer la cible avec la vue. Il reste alors à acquérir la cible en déplaçant le curseur, ce qui est fait entre B et C.

En principe, rien n'empêche l'utilisateur, dans la tâche schématisée dans les Figures 1 et 2, de procéder en une seule étape. En effet, puisque la vue emmène le curseur avec elle, il est possible de pousser l'action de défilement jusqu'à faire coïncider le curseur avec la cible : en ce cas, il ne resterait plus qu'à cliquer à l'issue de la phase de défilement. Toutefois, ce n'est pas l'utilisation prévue par les concepteurs et l'observation montre à l'évidence que ce n'est pas de cette manière que procèdent les utilisateurs. Typiquement, l'acte de défilement de vue et le pointage proprement dit s'enchaînent en deux phases de pointage distinctes, la première représentant une première approche de type *macro* (atteindre le voisinage de la cible en faisant apparaître cette dernière quelque part dans la vue) et la seconde un mouvement terminal de type *micro* (amener le curseur en coïncidence avec la cible).

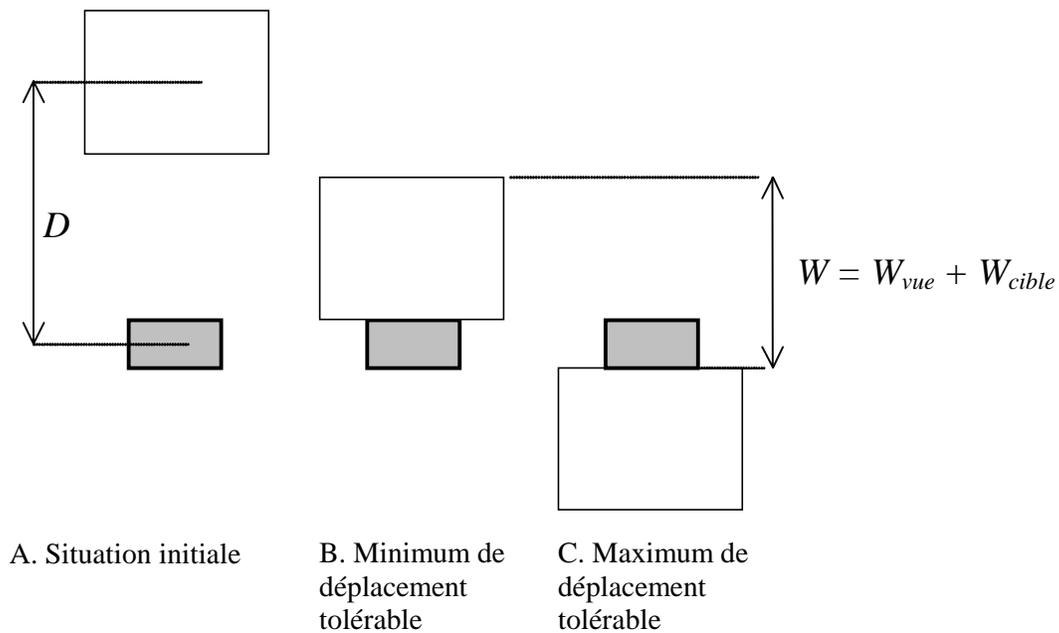


Figure 2. Caractérisation de l'acquisition d'une cible (petit rectangle gris) avec une vue (grand rectangle blanc) comme un pointage. On considère une tâche à une seule dimension (pointage sur l'axe vertical). En A, dans la situation initiale, D se définit comme la distance entre le centre de la vue et le centre de la cible. En B et en C sont représentés respectivement l'*undershoot* maximal et l'*overshoot* maximal autorisés. La tolérance W pour ce type de pointage est égale à la somme de la largeur de la vue et de la largeur de la cible.

Le gain, c'est-à-dire le coefficient de proportionnalité de la fonction liant l'amplitude des déplacements à l'entrée et celle des déplacements obtenus à l'écran, est en général très différent dans les interfaces graphiques habituelles selon que l'on déplace la vue dans le document (pointage macro) ou le curseur dans la vue (pointage micro). Supposons par exemple qu'un déplacement vertical de 5 cm environ effectué sur le tapis de souris permette au curseur d'écran de couvrir toute la hauteur de la fenêtre d'application, soit environ 600 pixels : on n'aura pas besoin d'une plus grande amplitude pour faire défiler dans la fenêtre, avec la barre de défilement, 50 pages de document—soit 30.000 pixels, ce qui représente un gain 50 fois plus élevé.

Le paradigme du pointage s'inscrit dans l'espace, souvent réduit à une dimension pour la modélisation et l'expérimentation, tandis que celui de la *navigation* fait intervenir une dimension supplémentaire, l'*échelle* (Furnas & Bederson, 1995). Guiard, Beaudouin-Lafon & Mottet (1999) et Guiard, Bourgeois, Mottet & Beaudouin-Lafon (2001) ont mis l'accent sur l'utilité du modèle

classique du pointage de Fitts pour l'étude du problème émergent de la navigation au sein des mondes électroniques complexes que produisent aujourd'hui en abondance les technologies de l'information. Introduisant le paradigme du pointage *bi-échelle*, Guiard *et al.* (1999) ont montré que l'acte de navigation est analysable comme un enchaînement de pointages exécutés à des niveaux d'échelle décroissants. Un tel recours coordonné à une série d'échelles de contrôle permet la maîtrise de niveaux de difficulté qui sont impraticables dans le cadre du pointage traditionnel uni-échelle. En effet, alors que, dans la littérature classique sur la loi de Fitts, l'*ID* maximum utilisable dans le pointage manuel classique, à cause des limitations du système perceptivo-moteur humain, n'excède pas 9 ou 10 bits, Guiard *et al.* (1999) ont montré que l'introduction d'un deuxième niveau d'échelle rend praticables, pour le mouvement manuel, des tâches de pointage dont l'*ID* atteint 12 bits et davantage.

C'est un fait que, dans nos applications usuelles, pointer consiste très souvent à déplacer une fenêtre dans un document qui peut être très vaste de manière à capturer la cible (un mot par exemple) avec la fenêtre (pointage *macro*) puis à déplacer le curseur vers le mot, à l'intérieur de la fenêtre, pour acquérir la cible (pointage *micro*) : c'est sur ce nouveau paradigme du pointage bi-échelle que nous nous penchons dans la présente étude.

1.4. Modes d'entrée : procédés uni- et bi-manuels

Outre l'analyse du pointage bi-échelle, nous nous intéressons ici au mode d'entrée. De nombreux travaux ont mis en évidence l'avantage des périphériques d'entrée exploitant l'aptitude des humains à coordonner les actions des deux mains (Guiard, 1987 ; Hinckley, Pausch, Proffitt, Patten, & Kassell, 1997 ; Leganchuk, Zhai, & Buxton, 1999). Il y a une quinzaine d'années, Buxton & Myers (1986) ont montré que les utilisateurs avaient une habileté accrue avec deux mains prenant en charge, l'une la composante macro, l'autre la composante micro. Par la suite, des techniques variées de manipulation bi-manuelle directe ont alors été proposées et évaluées (Kabbash, Buxton, & Sellen, 1994 ; Kurtenbach, Fitzmaurice, Baudel, & Buxton, 1997), pour les mêmes conclusions.

La présente étude, inscrite dans la continuité du travail de Guiard *et al.* (1999), est une première exploration dans l'espace à deux dimensions du paradigme du pointage bi-échelle que ces auteurs ont défini, et qui distingue les pointages macro et micro. Nous avons exploré quatre conditions, en faisant varier les conditions de la performance : (1) le type de manipulation du

document (directe ou indirecte), (2) les relations entre les dimensions spatiales x et y (séparées ou intégrées) et (3) la division inter-manuelle du travail (uni-manuel ou bi-manuel). Au lieu de nous borner à comparer des scores de performance globaux comme le temps total d'atteinte d'une cible, nous avons évalué les conditions en analysant le mouvement de façon continue de manière à distinguer les phases macro et micro du pointage.

Nous avons utilisé dans notre étude une tâche de pointage à deux niveaux d'échelle, dont l' ID était de 12.0 bits (Equation 4). Comme nous l'avons vu, l' ID reste parfaitement mesurable dans le cas du pointage à deux niveaux d'échelle. Il s'analyse comme une somme de deux ID , un ID macro pour le pointage initial sur la cible avec la vue et un ID micro pour le pointage terminal sur la cible avec le curseur. L' ID macro est une fonction logarithmique du rapport entre la distance initiale (D) à couvrir et une tolérance égale à la somme des largeurs de la vue et de la cible ($W_{vue} + W_{cible}$). Quant à l' ID micro, entièrement dépendant de la qualité du premier pointage, il est une fonction logarithmique du rapport entre la distance *résiduelle* du pointage ($D_{rés}$, l'écart entre le curseur et la cible) et la largeur de la cible (W_{cible}). L'utilisateur contrôle en fait deux objets mobiles, la vue dans le document et le curseur dans la vue, l' ID étant définissable séparément pour chaque mobile dans son référentiel propre (Figure 1).

II. METHODES

II.1. Sujets

Seize participants (15 hommes et 1 femme) âgés entre 19 et 38 ans (moyenne : 25 ans ; écart-type : 4.3 ans), volontaires, bénévoles, et fortement droitiers selon le questionnaire de préférence manuelle de Oldfield (1971), ont participé à cette étude.

II.2. Le document, la vue et la cible

La vue, de forme carrée (544*544 pixels), donnait sur un document carré de 17200*17200 pixels—elle ne donnait donc à voir que 1/1000^e de la surface du document. Le document contenait 58 cercles équidistants (200 pixels d'espacement). Le gain écran/tablette utilisé pour le pointage macro était de 35 pixels par point, contre 1 pour le pointage micro. La cible, située au début de chaque essai à une distance invariable de 8190 pixels du point d'origine, était un carré

de 2 pixels de côté (soit $W = 2$ pixels). La difficulté de la tâche (ID_{total}), constante pour toutes les conditions, était donc égale à 12.0 bits.

II.3. Dispositifs d'entrée

Les participants utilisaient une tablette graphique WACOM sur laquelle pouvaient être utilisés deux outils, un stylet et un mulot (*puck*) assimilables respectivement à un stylo sans encre et à une souris sans fil—à ceci près que ce dispositif d'entrée était utilisé en mode absolu¹. Selon la pression enregistrée sur sa pointe, le stylet basculait entre deux modes de contrôle. Dans le *mode pression* (plus de 85 % de l'échelle de pression, soit plus de 220 sur les 256 niveaux de pression existants), le stylet sur la tablette permettait de faire défiler le document sous la vue. Dans le *mode sans pression*, le stylet déplaçait le curseur dans la vue.

Les participants devaient soit manipuler le stylet avec la main droite (condition uni-manuelle), soit manipuler le mulot avec la main gauche et le stylet avec la main droite (condition bi-manuelle). Le mouvement, effectué à l'écran d'un micro-ordinateur situé face au participant, était ainsi contrôlé sur la tablette (Figure 3). Cet écran comportait deux fenêtres : une fenêtre d'information rectangulaire, située sur la droite de l'écran, à l'usage de l'expérimentateur, et une fenêtre de manipulation, que nous désignerons comme la vue (carrée, occupant les trois quarts de l'écran, soit 544*544 pixels). De surcroît, deux barres de défilement, l'une horizontale et l'autre verticale, formant une représentation macro du document, étaient visibles sur les bords droit et inférieur de la fenêtre de manipulation.



¹ Ces périphériques d'entrée sont dits absolus parce que c'est la tablette qui code leurs positions successives, dans son repère fixe. La souris est au contraire le prototype d'un dispositif relatif. C'est la souris elle-même—et non la

Figure 3. La manipulation du mulot et du stylet sur la tablette graphique permettait la réalisation de la tâche de pointage visualisée sur l'écran.

II.4. Tâche

Les participants devaient amener le curseur le plus rapidement possible sur une cible située à une grande distance hors de la vue, mais dont la position était bien repérée grâce à un *gradient de courbure* (Benhamou, 1989 ; Benhamou & Bovet, 1992 ; Guiard *et al.*, 2001) : la surface du document était couverte par un ensemble de cercles concentriques équidistants, au centre de laquelle figurait la cible à atteindre (Figure 4).

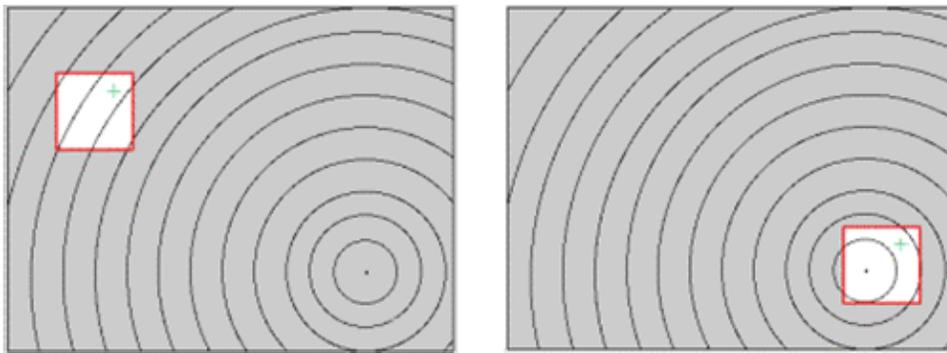


Figure 4. Schématisation à deux dimensions du paradigme du pointage bi-échelle. Le document est représenté en gris, la vue (c'est à dire le sous-ensemble du document qui se trouve visualisé par le programme) est montrée en blanc et le curseur a la forme d'une croix. La cible est située au centre d'un ensemble de cercles concentriques. A gauche est illustrée la situation initiale pour le pointage macro, qui a pour fonction d'amener la cible dans la vue. Noter que le curseur, solidaire de la vue, est emmené passivement pendant cette première phase, conservant sa position à l'intérieur de la vue. Pour le premier pointage : $ID_{macro} = \log_2 (D / (W_{vue} + W_{cible}) + 1)$. A droite, la situation à l'issue du pointage macro : la cible étant à présent dans la vue (la distance restante à parcourir est notée $D_{rés}$), le curseur va pouvoir se diriger vers la cible. Pour le second pointage : $ID_{micro} = \log_2 (D_{rés} / W_{cible} + 1)$. A l'issue du pointage terminal micro, le curseur vient se placer en coïncidence avec la cible.

L'espacement entre les cercles avait été prévu de telle sorte que plusieurs arcs étaient toujours visibles dans la vue. La courbure de ces arcs spécifiait la distance à la cible (la courbure est l'inverse du rayon), et leur orientation spécifiait la direction de la cible (dans la direction

surface sur laquelle elle se déplace—qui code ses déplacements dans son repère égo-centré mobile.

indiquée par la demi-droite interne perpendiculaire à la tangente à n'importe quel arc). Le gradient de courbure continu et homogène utilisé a permis de donner aux participants des informations de direction et de distance utilisables pour réussir la tâche malgré un *ID* considérable de 12 bits. Dès lors, les participants ne pouvaient rencontrer aucun problème de désorientation dans l'espace du document. A chaque instant ils savaient où aller rechercher la cible. La motivation de ce procédé était pour nous d'éliminer le problème cognitif de la navigation, qui dépasse notre sujet, de manière à nous focaliser au niveau exclusivement sensori-moteur correspondant à l'exécution du mouvement d'atteinte de la cible.

La tâche se décomposait donc en un pointage macro (avec la vue dans le document) et un pointage micro (avec le curseur dans la vue), la première permettant une approche à fort gain et la seconde un ajustement terminal à haute résolution. Les participants devaient amener le curseur dans la cible et l'y laisser, sans cliquer. Après un délai de 500 ms, un son bref était émis et une nouvelle vue présentée.

II.5. Acquisition et traitement des données

Les données étaient relevées toutes les 20 ms (50 Hz),

- (1) dans le repère de la tablette : les coordonnées *xy* du mulot et du stylet et l'état du stylet (pressé ou non pressé),
- (2) dans le repère du document : les coordonnées *xy* de la vue micro, du curseur et de la cible,
- (3) dans le repère de la vue : les coordonnées *xy* du curseur et
- (4) l'état de la cible (sélectionnée ou non). Les données ont été traitées sous *Matlab*.

Les variables dépendantes étaient de deux types :

- *Variables temporelles* (Figure 5) :

Le *temps total* (*TT*), de l'initialisation de l'essai à l'atteinte de la cible, qui se décompose en un *temps de réaction* (*TR*), depuis l'initialisation de l'essai jusqu'au début du déplacement de la vue, et un *temps de mouvement* (*TM*), depuis le début du déplacement de la vue jusqu'à la sélection de la cible. Le *TM* est lui-même décomposable en un *temps de pointage macro* (TP_{macro}), du début du déplacement de la vue à l'immobilisation de la vue, et d'un *temps de pointage micro* (TP_{micro}), de l'immobilisation de la vue à l'atteinte de la cible.

D'où
$$TT = TR + TM, \quad (5)$$

et
$$TM = TP_{macro} + TP_{micro} \quad (6)$$

- Variables liées à la précision spatiale des pointages :

A partir de la distance résiduelle ($D_{rés}$) entre le curseur et la cible à l'issue du pointage macro, c'est-à-dire au moment de l'immobilisation de la vue, sont calculés :

- l'indice de difficulté du pointage micro (ID_{micro}), à l'issue du pointage macro et
- l'indice de la difficulté effectivement prise en charge par le pointage macro (ID_{macro} effectif), donné par :

$$ID_{macro} \text{ effectif} = ID_{total} - ID_{micro}. \quad (7)$$

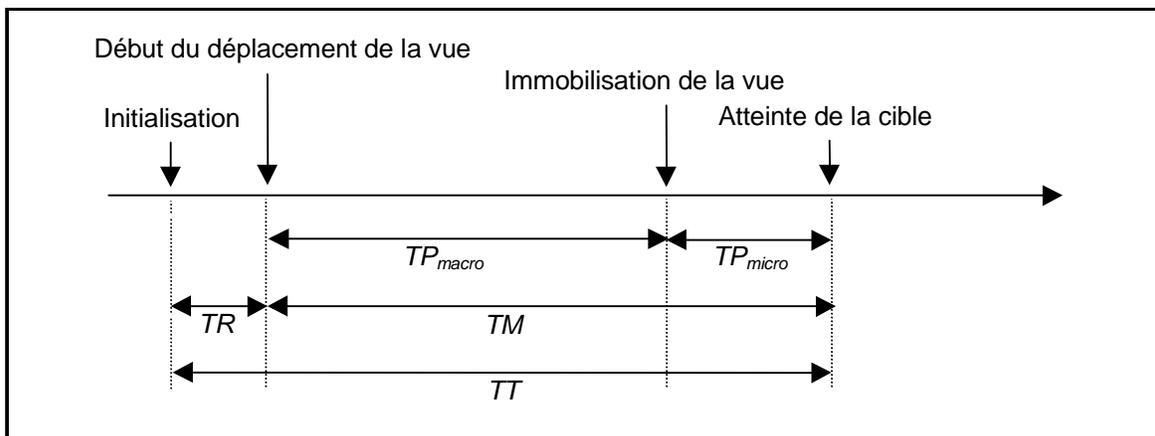


Figure 5. Décomposition temporelle du pointage, de l'initialisation de l'essai jusqu'à l'atteinte de la cible.

II.6. Conditions expérimentales

Dans cette expérience, nous avons fait varier les conditions du pointage macro, le pointage micro étant inchangé, en manipulant donc trois variables, chacune à deux niveaux : (1) le type de manipulation du document (manipulation indirecte avec les barres de défilement versus manipulation directe), (2) les relations entre les dimensions spatiales x et y (xy séparées versus xy intégrées) et (3) la division inter-manuelle du travail (répartition versus non répartition entre les deux mains des composantes macro et micro du pointage). Toutefois, nous avons utilisé un type de plan expérimental permettant des comparaisons de conditions deux à deux, un seul contraste factoriel étant créé dans chaque cas. Nous avons donc testé quatre conditions, conçues comme disposées sur une échelle d'ordre, chaque condition se distinguant de la précédente (de la

suivante) par l'ajout (le retrait) d'une caractéristique bien définie susceptible, en principe, de faciliter la performance (Figure 6).

	Condition			
	BAR-DEF	MAN-DIR	DIM-INT	BI-MAN
Manipulation du document	Indirecte	Directe		
Dimensions $X Y$	Séparées		Intégrées	
Division inter-manuelle micro-macro	Non			Oui

Figure 6. Les modalités de chacune des conditions expérimentales de la tâche de pointage.

Dans la condition *barres de défilement* (BAR-DEF), le participant doit déplacer la vue dans le document en actionnant les barres de défilement : la manipulation du document est indirecte en ce sens qu'il faut atteindre les barres de défilement avec le curseur pour le déplacer. Les dimensions spatiales xy sont séparées en ce sens que le défilement est soit horizontal soit vertical. Enfin, il n'y a pas de répartition inter-manuelle du travail puisque la main préférée, à l'aide du stylet, effectue seule, tour à tour, les deux sous-tâches.

Dans la condition *manipulation directe* (MAN-DIR), le participant manipule le document avec le stylet, sans passer par le détour des barres de défilement. Cette manipulation ressemble à celles du monde réel, à ceci près qu'ici le déplacement s'effectue sur un seul axe à la fois, vertical ou horizontal, un seuil angulaire de 45° contrôlant la bascule du déplacement vertical au déplacement horizontal. La bascule entre pointage macro et pointage micro se fait, on l'a déjà noté, par une variation de pression sur la pointe du stylet.

La condition *dimensions intégrées* (DIM-INT), dans laquelle disparaît le seuil angulaire appliqué au mouvement du stylet, assure l'*intégration* des dimensions spatiales xy : le déplacement du document, toujours par manipulation directe, peut dès lors être effectué à volonté dans une direction arbitraire.

La condition *bi-manuelle* (BI-MAN) se caractérise de surcroît par une répartition des deux sous-tâches entre les deux mains : le pointage macro est assuré par la main gauche avec le mulot, le pointage micro par la main droite avec le stylet. Dans cette condition, qui reproduit le prototype d'interface testé par Buxton & Myers (1986), on introduit la possibilité d'un recouvrement temporel entre le pointage macro et le pointage micro.

II.7. Procédure

Les participants ont effectué chacun 32 acquisitions de cibles dans chacune des conditions (soit un total de 128 tâches élémentaires), réparties en 4 blocs de 8 mouvements, et selon 16 directions azimutales réparties également à partir du point d'origine de chaque essai, la distribution des positions de cibles étant aléatoire (la distance, on l'a déjà mentionné, était constante, de 8190 pixels). L'enchaînement des blocs de 8 mouvements était aléatoire. A la fin de chaque bloc de 8 mouvements apparaissait à l'écran le *TT* moyen du bloc, le participant étant invité par l'expérimentateur à améliorer le score de ses essais précédents. La session expérimentale durait environ 45 minutes.

III. RESULTATS

Nos variables dépendantes ont été soumises à une analyse de variance selon le plan 4 conditions (BAR-DEF, MAN-DIR, DIM-INT, BI-MAN) * 4 essais, ainsi qu'à des comparaisons post hoc deux à deux (tests de Newman-Keuls). Une amélioration monotone de la performance était attendue, avec BAR-DEF < MAN-DIR < DIM-INT < BI-MAN.

III.1. Performance globale

Les participants ont mis en moyenne 7.5 s par essai pour atteindre la cible, *TR* inclus. Comme l'illustre la Figure 7, le temps total *TT* est très fortement influencé par le facteur condition ($F(3,45) = 57.41, p < .0001$); il l'est aussi par le facteur essai ($F(3,45) = 17.62, p < .0001$), sans qu'il y ait interaction entre les deux facteurs ($F(3,45) = 1.77, p > .05$).

L'amélioration de la performance de condition à condition n'est pas strictement monotone : une comparaison post hoc montre un avantage de la condition DIM-INT sur la condition BI-MAN ($p < .002$).

A première vue, la Figure 7 montre des patterns de résultats quasiment identiques pour les variables *TT*, *TM* et TP_{macro} : l'effet du facteur condition s'est essentiellement porté sur le *TM* (à l'exclusion du *TR*), l'effet observé sur le *TM* reflétant lui-même essentiellement le TP_{macro} (à l'exclusion du TP_{micro}).

L'effet du facteur essai est une amélioration monotone de la performance. Ce facteur n'interagit avec le facteur condition sur aucune de nos variables dépendantes.

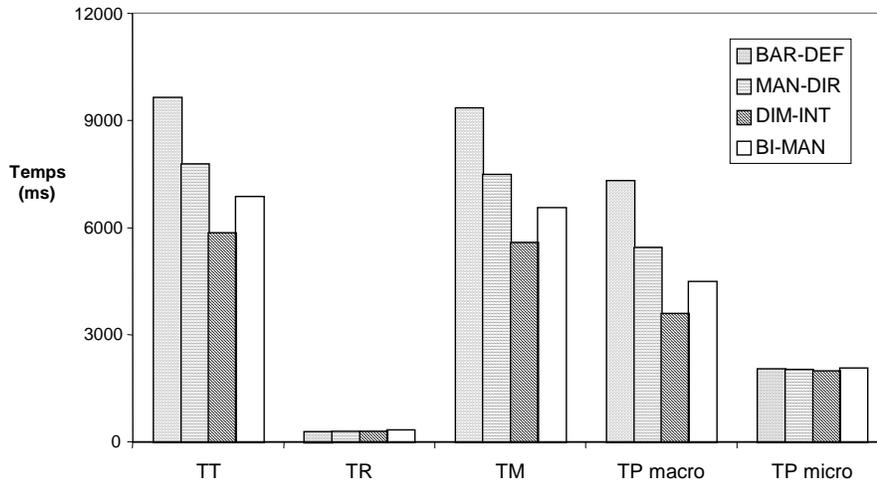


Figure 7. Décomposition temporelle du pointage en fonction des conditions expérimentales.

III.2. Temps de Mouvement

Si l'on décompose le *TT*, on obtient le *TR* et le *TM*, qui occupent respectivement 4% (300 ms en moyenne) et 96% (7.2 s en moyenne) du *TT*. Le *TR*, très court, est insensible au facteur condition.

C'est essentiellement la composante *TM* qui varie avec le facteur condition ($F(3,45) = 58.42, p < .0001$). On constate d'abord que la manipulation directe de la vue est plus rapide que la manipulation indirecte ($p < .001$). Certes, le temps mis pour acquérir les deux barres de défilement dans la condition BAR-DEF disparaissant dans la condition MAN-DIR, ce qui explique sans doute, en partie ou en totalité, le gain de temps observé (1.11 s en moyenne). Pourtant, un tel résultat n'était pas évident : le pointage intégré en manipulation directe limite la vitesse de défilement, ce qui n'est pas le cas avec les barres de défilement, qui permettent de couvrir n'importe quelle distance (sur une seule dimension) en une seule phase de mouvement (c'est à dire avec un seul pic de vitesse).

L'intégration des dimensions spatiales (condition DIM-INT) améliore sensiblement la performance (le *TM* est plus long de 1.15 s pour MAN-DIR que pour DIM-INT, $p < .001$), ce qui reflète la facilité accrue de la navigation. Enfin, la répartition des tâches aux deux mains

(condition BI-MAN) engendre aussi un gain de performance par rapport aux conditions BAR-DEF et MAN-DIR (le TM est plus long pour MAN-DIR que pour BI-MAN, $p < .01$), du fait du pointage macro plus naturel réalisé dans les deux dimensions simultanément. Cependant, les meilleures performances demeurent celles réalisées dans la condition DIM-INT (le TM est plus court pour DIM-INT que pour BI-MAN, $p < .01$) : contrairement à nos attentes, la division du travail (pointage macro à la main gauche et pointage micro à la main droite, d'après Guiard, 1987) n'améliore pas la performance dans cette tâche.

III.3. Décomposition du mouvement : vitesse et précision dans les phases macro et micro

Portons notre attention à présent sur le TP_{macro} , la partie du TM qui est la cible du facteur condition, et celle qui prend le plus de temps (5.2 s en moyenne, soit 72% du TM). En premier lieu, le TP_{macro} suit le même pattern de résultats que le TT et le TM . Il est fortement influencé par le facteur condition, $F(3,45) = 57.26$, $p < .0001$, mais, comme le montre la Figure 8, le TP_{macro} pour la condition DIM-INT est plus court que pour la condition BI-MAN ($p < .01$). Nous allons donc nous intéresser à ce contraste entre les conditions DIM-INT et BI-MAN, notamment pour trouver quelle fraction de l' ID total est prise en charge par la composante macro du pointage (ID_{macro} effectif).

Pour l' ID_{macro} effectif, on observe un fort effet du facteur condition, $F(3,45) = 164.69$, $p < .0001$. On remarque que l' ID_{macro} effectif est plus élevé pour BI-MAN que pour DIM-INT ($p < .001$) : il apparaît ainsi que la main gauche fait mieux que la droite pour ce pointage macro, mais en prenant plus de temps. On ne peut pas donc, au vu de ces deux résultats, trancher sur la supériorité de l'une ou de l'autre condition. Dans les autres conditions les participants ont poussé moins loin la tâche macro—en laissant une plus forte charge résiduelle au pointage terminal micro. Nous allons devoir prendre en compte un nouveau critère afin de déterminer quelle condition est la plus performante : l'indice de performance du pointage macro, IP_{macro} (mesuré en bits/s), donné par l'équation suivante (suggérée par Fitts, 1954) :

$$IP_{macro} = ID_{macro} \text{ effectif} / TP_{macro}. \quad (8)$$

L'analyse de variance montre un effet significatif du facteur condition ($F(3,45) = 106.39$, $p < .0001$). De la même façon que pour le TP_{macro} , la condition DIM-INT l'emporte sur la condition BI-MAN ($p < .01$).

Finalement, si l' ID_{macro} effectif est plus élevé en condition BI-MAN, la mesure de l'indice de performance du pointage macro est tout de même plus grande pour la condition DIM-INT que pour la condition BI-MAN, ce qui montre une supériorité de la main droite pour la tâche de pointage macro.

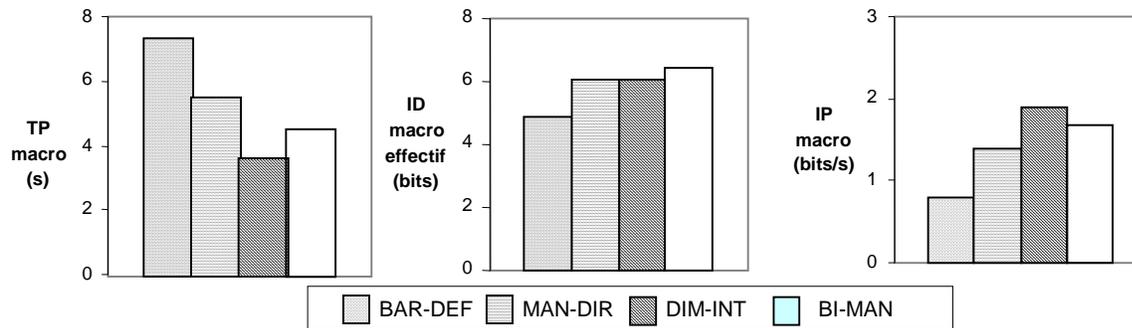


Figure 8. Variations du temps de pointage (TP_{macro}), de l'indice de difficulté effectif (ID_{macro} effectif) et de l'indice de performance (IP_{macro}) lors du pointage macro avec la vue.

Considérons à présent la phase de pointage micro (Figure 9). Le TP_{micro} , qui constitue 28% du TM (en moyenne 2.0 s), n'est pas affecté par le facteur condition ($F(3,45) < 1$). Toutefois, l' ID_{micro} , c'est-à-dire la difficulté résiduelle, complément de ce qui a été fait pendant le pointage macro (ID_{macro} effectif), varie avec le facteur condition ($F(3,45) = 164.69, p < .0001$): il est plus grand pour BAR-DEF que pour les autres conditions, et diminue avec les conditions, la différence entre MAN-DIR et DIM-INT n'étant pas cependant significative ($p > .05$). On constate ici que c'est dans la condition BAR-DEF que la difficulté laissée au pointage micro est la plus importante. Pourtant, la technique des barres de défilement est celle qui est la plus largement utilisée.

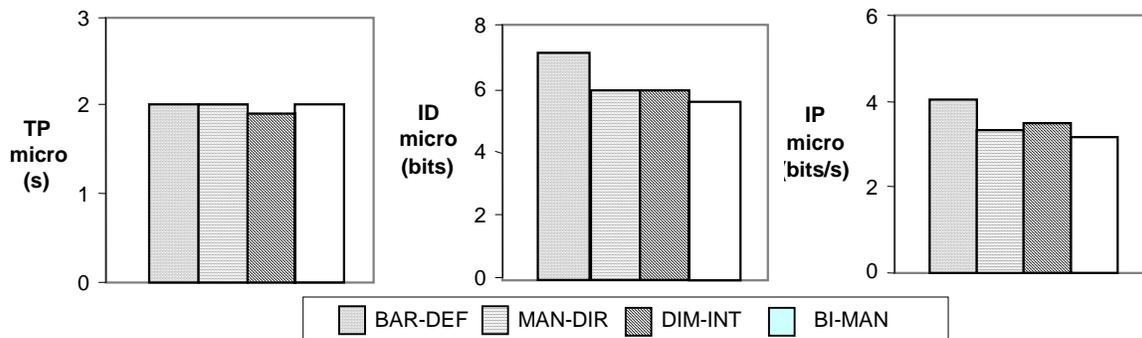


Figure 9. Variations du temps de pointage (TP_{micro}), de l'indice de difficulté résiduelle (ID_{micro}) et de l'indice de performance (IP_{micro}) lors du pointage micro avec le curseur

L'analyse de variance de l'indice de performance du pointage micro, IP_{micro} (mesuré en bits/s), et donné par l'équation suivante,

$$IP_{micro} = ID_{micro} / TP_{micro}, \quad (9)$$

montre un effet significatif du facteur condition, $F(3,45) = 41.44$, $p < .0001$, la condition BAR-DEF présentant le meilleur indice de performance ; mais les différences, entre MAN-DIR et DIM-INT d'une part ($p > .05$), et entre MAN-DIR et BI-MAN d'autre part ($p > .05$), ne sont pas significatives.

On remarque donc ici que, comme la distance résiduelle à la fin du pointage macro, $D_{rés}$, se réduit de condition à condition ($F(3,45) = 357.52$, $p < .0001$), l' ID_{micro} en fait de même, réduisant ainsi la distance à parcourir avec le curseur pour le pointage micro, et la difficulté du pointage micro. Cependant, l' IP_{micro} plus élevé en condition BAR-DEF reflète un meilleur rendement à l'issue du pointage macro réalisé avec les barres de défilement : la cible est plus éloignée, mais comme les participants mettent le même TP_{micro} pour l'atteindre, ils obtiennent un indice de performance plus élevé.

IV. DISCUSSION

De façon globale (Tableau 1), nos résultats montrent que déplacer la vue dans le document en actionnant les barres de défilement (condition BAR-DEF) est de loin la méthode la plus lente pour le pointage macro, mais la plus précise pour le pointage micro. La manipulation directe du document (condition MAN-DIR) améliore le temps et la précision du pointage macro, ainsi que

la précision du pointage micro. L'intégration des dimensions spatiales xy , avec la condition DIM-INT, améliore encore les performances (temps et précision) lors du pointage macro, et devient plus performant lors du pointage micro. Enfin, la répartition des deux sous-tâches aux deux mains ne montre pas d'amélioration supplémentaire pour la phase de pointage macro par rapport à la condition DIM-INT ; lors du pointage micro, la performance est même affaiblie.

	BAR-DEF	MAN-DIR	DIM-INT	BI-MAN
TT (s)	9,64	7,79	5,86	6,87
TR (s)	0,28	0,30	0,29	0,33
TM (s)	9,35	7,49	5,58	6,54
TP macro (s)	7,32	5,46	3,60	4,50
TP micro (s)	2,03	2,03	1,98	2,05
ID macro (bits)	4,8	6,0	6,0	6,4
ID micro (bits)	7,2	6,0	6,0	5,6
IP macro (bits/s)	0,8	1,4	1,9	1,7
IP micro (bits/s)	4,0	3,3	3,5	3,1

Tableau 1. Décomposition temporelle (TT , TR , TM , TP_{macro} , TP_{micro}) et variations de la précision du pointage (ID_{macro} , ID_{micro} , IP_{macro} , IP_{micro}) en fonction des conditions expérimentales.

Nos attentes concernant l'effet de la division inter-manuelle du travail, avec un pointage macro confié à la main gauche et un pointage micro confié à la main droite, ne sont pas corroborées. Il s'avère que la main préférée seule a un meilleur rendement que le couple main droite-main gauche, pour les deux types de pointages. Ce résultat est étonnant car nous avons choisi une division du travail conforme à la logique décrite par Guiard (1987), avec la main gauche qui effectue une tâche résolument macro et la droite une tâche micro. Sur le plan théorique, notre expérience semble donc remettre en cause la généralisation du modèle de division du travail de Guiard (1987) aux tâches de navigation-pointage dans les interfaces graphiques. Cependant, sur le plan technique, il est possible qu'un espace de travail trop réduit ait obligé les sujets à ralentir leur geste pour éviter des collisions entre mulot et stylet (Leganchuk, Zhai, & Buxton, 1999).

Le modèle de la chaîne cinématique (Guiard, 1987 ; Guiard et Ferrand, 1996) a été souvent mis en avant dans le domaine de l'interaction homme-machine. Ce modèle identifie trois régularités concernant l'organisation spontanée du mouvement bi-manuel humain : dans le cas d'un droitier, le mouvement de la main droite (1) se construit dans un repère fourni par la main

gauche, (2) offre une granularité spatio-temporelle plus fine (les composantes macro de la tâche étant typiquement assignées à la main non préférée) et (3) intervient plus tard dans l'action bi-manuelle (précession de la main gauche dans l'action). D'autres travaux semblent nécessaires pour préciser les conditions dans lesquelles les mouvements bi-manuels seraient plus avantageux que les mouvements uni-manuels.

D'un point de vue technique, notre tablette WACOM ne présentant qu'une surface de mouvement de 30*30 cm (soit 0.9 m²), il se peut que le partage de cette surface entre les deux mains ait obligé les sujets à ralentir leur mouvement. Il paraît donc nécessaire de tenter une nouvelle comparaison (condition contrôle) entre les modes uni- et bi-manuel en offrant aux participants une surface de travail plus grande (une tablette de plus grand format ou deux tablettes, une pour chaque main), afin d'éviter l'artefact éventuel que nous avons évoqué.

Enfin, il nous semble utile de continuer à travailler au plan théorique sur le paradigme du pointage bi-échelle ou multi-échelle qui pose des problèmes fort originaux en termes de contrôle de la motricité. Un des enjeux est de mettre au point, à la frontière de la psychologie fondamentale et de l'interaction homme-machine, un paradigme adapté à l'étude expérimentale de la navigation dans les mondes d'information bi-échelles (que représentent la plupart des applications bureautiques) et multi-échelles (que représentent les applications « zoomables »). Notre approche se fonde sur deux options théoriques : en premier lieu, avoir recours au modèle, simple et général, du pointage de Fitts, qui fait intervenir comme variables critiques la distance D et la tolérance W , modèle qu'il s'agit d'adapter au problème de la navigation à travers la notion de pointage multi-échelle ; en second lieu, nous mettons l'accent sur la variable d'échelle. Notre souci sera de faire progresser, notamment grâce aux diagrammes échelle-espace de Furnas et Bederson (1995), notre compréhension du rôle de l'échelle, variable dont les théoriciens du contrôle moteur se sont peu préoccupés jusqu'à aujourd'hui.

REFERENCES

- Accot, J. & Zhai, S. (2003). Refining Fitts' law models for bivariate pointing. *Proceedings of CHI'03 Conference. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 193-200). New York : ACM Press.
- Benhamou, S. (1989). An olfactory orientation model for mammals' movements in their home ranges. *Journal of Theoretical Biology*, 139, 379-388.

- Benhamou, S., & Bovet, P. (1992). Distinguishing between elementary orientation mechanisms by means of path analysis. *Animal Behavior*, *43*, 371-377.
- Buxton, W., & Myers, B. (1986). A study in two-handed input. *Proceedings of CHI'86 Conference*, 321-326, ACM.
- Card, S.K., English, W.K., & Burr, B.J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step-keys, and text keys for text selection on a CRT. *Ergonomics*, *21*, 301-613.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, *47*, 381-391.
- Fitts, P.M., & Peterson, J.R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, *67*, 103-112.
- Furnas, G.W., & Bederson, B.B. (1995). Space-scale diagrams : understanding multiscale interfaces. *Proceedings of CHI'95 Conference*, 234-241, ACM.
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bi-manual action : the kinematic chain as a model. *Journal of Motor Behavior*, *19*, 486-517.
- Guiard, Y., Beaudouin-Lafon, M., & Mottet, D. (1999). Navigation as multiscale pointing : extending Fitts' model to very high precision tasks. *Proceedings of CHI'99 Conference*, 450-457, ACM.
- Guiard, Y., Bourgeois, F., Beaudouin-Lafon, M., & Mottet, D. (2001). Beyond the 10-bit barrier: Fitts' law in multi-scale electronic worlds. *Proceedings of IHM-HCI 2001* (pp. 573-87). Lille, France.
- Guiard, Y., & Ferrand, T. (1996). Asymmetry in bimanual skills. In D. Elliott & A. Roy (Eds.), *Manual asymmetries in motor performance* (pp. 175-195). Boca Raton : CRC Press.
- Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D., Patten, J., & Kassell, N. (1997). Cooperative bimanual action. *Proceedings of CHI'97 Conference*, 27-34, ACM.
- Kabbash, P., Buxton, W., & Sellen, A. (1994). Two-handed input in a compound task. *Proceedings of CHI'94 Conference*, 417-423, ACM.
- Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Baudel, T., & Buxton, W. (1997). The design of a GUI paradigm based on tablets, two-hands, and transparency. *Proceedings of CHI'97 Conference*, 35-42, ACM.
- Leganchuk, A., Zhai, S., & Buxton, B. (1999). Manual and cognitive benefits of two-handed input: an experimental study. *ACM Transactions on Computer Human Interaction*, ACM.

- McGuffin, M., & Balakrishnan, R.(2002). Acquisition of expanding targets. *Proceedings of CHI'02 Conference*, 57-64, ACM.
- McKenzie, I.S. (1992). Fitts' Law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- McKenzie, I.S. & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *Proceedings of CHI'92 Conference*, 219-226, ACM.
- Mottet, D., & Bootsma, (1997). Le problème de la précision des mouvements: de Woodworth (1899) à l'approche dynamique. *Science & Motricité*, 29-30, 3-11.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness. *Neuropsychologia*, 9, 97.
- Plamondon, R., & Alimi, A. M. (1997). Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 20 (2), 279-349.
- Shannon, C.E., & Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. *Urbana : University of Illinois Press*.
- Woodworth, R.S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review, Monograph Supplement*, 3 (whole N°13), 1-114.
- Zhai, S., Conversy, S., Beaudouin-Lafon, M., & Guiard Y. (2003). Human on-line response to target expansion. *Proceedings of CHI'03, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 177-184). New York : ACM Press.

Remerciements

Les auteurs remercient Michel Beaudouin-Lafon (Laboratoire de Recherche en Informatique, CNRS & Université de Paris Sud) pour de stimulantes discussions lors de la préparation de cette étude.

English Figure Captions

Figure 1. Scrolling the document (dark grey rectangle) behind the view (clear grey rectangle) and moving the cursor (arrow) in a one-dimensional target-acquisition (black square) task along the vertical dimension. The figure shows the document moving under a stationary view, but the reverse representation would amount to the same. Initially (in A), the target is out of the view. From A to B, scrolling task allow to catch the target with the view. It only remains to get the target by moving the cursor, which is done between B and C.

Figure 2. Characterization of the target-acquisition (little grey rectangle) with the view (big white rectangle) as a pointing task. A one-dimensional task is only consider (a vertical-axis pointing). In the initial situation (A), D is the distance between the view center and the target center. In B and C, the maximal *undershoot* and maximal *overshoot* authorized are respectively represented. The margin W for this kind of pointing is equal to the amount of the view width and the target width.

Figure 3. Handling the puck and the stylus on the graphical tablet allowed the pointing task realization visible on the screen.

Figure 4. Representation of the bi-scaled pointing paradigm in two dimensions. The document is showed in grey, the view (i.e. the document subset which is visualised by the software) in white and the cursor is represented by a cross. The target is the center of a whole concentric circles. On the left, the initial situation for macro-pointing, that is used in order to bring the target in the view. The cursor, linked with the view, is carried passively during this first phase, maintaining his position inside the view. For the first pointing task : $ID_{macro} = \log_2 (D/(W_{vue} + W_{cible}) + 1)$. On the right, final situation at the end of macro-pointing: the target is now inside the view (the distance remaining to cover si noted $D_{rés}$) and the cursor is going to go up to the target. For the second pointing task : $ID_{micro} = \log_2 (D_{rés} / W_{cible} + 1)$. At the end of the final micro-pointing, the cursor must be in coincidence with the target.

Figure 5. Pointing-task temporal decomposition, from trial initialization to target acquisition.

Figure 6. The experimental conditions modes of the pointing task.

Figure 7. Pointing-task temporal decomposition according to experimental conditions.

Figure 8. Variations of pointing time (TP_{macro}), effective difficulty index (ID_{macro} *effectif*) and performance index (IP_{macro}) during macro-pointing with the view.

Figure 9. Variations of pointing time (TP_{micro}), residual difficulty index (ID_{micro}) and performance index (IP_{micro}) during micro-pointing with the cursor.

Table 1. Temporal decomposition (TT , TR , TM , TP_{macro} , TP_{micro}) and variations of the pointing accuracy (ID_{macro} , ID_{micro} , IP_{macro} , IP_{micro}) as a function of experimental conditions.