

Curseurs Tangibles sur Dispositifs Mobiles : Impact de la Conception sur les Performances

Juan Rosso¹, Céline Coutrix^{1,2}, Matt Jones³, Laurence Nigay¹

¹Univ. Grenoble Alpes, LIG, CNRS
F-38000 Grenoble, France
{juan-pablo.rosso,celine.coutrix,
laurence.nigay}@imag.fr

²University of Stuttgart
70569 Stuttgart, Germany
celine.coutrix@vis.uni-stuttgart.de

³FIT Lab, Swansea University
SA2 8PP, UK
matt.jones@swansea.ac.uk

RÉSUMÉ

L'interaction tactile est omniprésente sur les dispositifs mobiles et les avancées technologiques ont permis des écrans plus grands. Les utilisateurs peuvent alors interagir avec plus de contenu affiché à l'écran, mais il est plus difficile pour les utilisateurs d'atteindre toutes les parties de l'écran avec le pouce de la main qui tient le dispositif mobile. Dans le même temps, les interfaces tangibles déformables sur mobile sont étudiées : l'ajout de contrôles ou widgets tangibles sur l'écran plat du mobile définit une nouvelle perspective sur le problème de l'accessibilité pour l'interaction au pouce. Dans cet article, nous étudions les performances de l'interaction mobile au pouce à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'action facilement atteignable avec le pouce pour manipuler un curseur tangible. Les résultats expérimentaux démontrent que la taille de l'espace moteur a un impact significatif sur les performances. Au contraire la différence de performances entre les actions à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'action facilement atteignable avec le pouce est marginale.

Mots Clés

Interaction tangible ; Glissière tangible ; Mobilité ; Interaction à une main ; Interaction au pouce.

ABSTRACT

Touch interaction is almost omnipresent on mobile devices and technological advances have made screens bigger. The users can then interact with more content displayed on screen but it is more difficult for the users to reach all the parts of the screen with one thumb. At the same time, researchers are exploring mobile interaction with deformable tangible interfaces. Bringing tangible objects to the flat screen brings a new perspective on the reachability problem of the thumb. In this work, we explore the impact on performance for thumb interaction within and outside the functional area of the thumb, while operating a tangible slider. Experimental results demonstrate that the size of

the motor space has a significant impact on performance. Operations within and outside the easily reachable area of the thumb show marginal difference of performance.

Author Keywords

Tangible interaction; Tangible slider; Mobile interaction; One-handed interaction; Thumb interaction

ACM Classification Keywords

H.5.2. Information Interfaces and Presentation: User Interfaces

INTRODUCTION

L'interaction tactile sur supports mobiles peut permettre un contrôle discret (appui d'un bouton sur l'écran) ou continu (glissement d'un curseur). Les curseurs graphiques sont utilisés pour le contrôle continu d'une grande variété de paramètres comme la luminosité de l'écran ou le volume du son mais aussi pour interagir avec des appareils distants comme une console de mixage¹ ou un panneau de commande d'une maison intelligente².

L'interaction mobile à une main souffre de la difficulté d'atteindre toute la surface de l'écran avec le pouce de la main qui tient le dispositif mobile. La zone qui peut être atteinte facilement avec le pouce est appelée zone fonctionnelle du pouce (figure 1). Plusieurs modèles pour calculer la zone fonctionnelle du pouce ont été proposés [2, 7, 9, 13]. Sur la base de ces modèles, la difficulté d'atteindre tous les widgets peut être résolue par un arrangement flexible des widgets graphiques sur l'écran tactile [6].

Cependant, tandis que les widgets graphiques offrent la flexibilité d'arrangement sur l'écran, ils ne permettent pas d'interagir sans regarder l'écran du mobile. Au contraire l'interaction tangible permet l'interaction sans regarder l'écran [14], une propriété importante en situation de mobilité. L'apport des widgets tangibles déformables (curseurs et boutons) pour l'interaction mobile a été démontrée dans [19]. Dans les deux études expérimentales décrites dans [14, 19], les participants ont pu effectuer un contrôle continu d'un objet distant sans regarder l'écran grâce à la tangibilité du widget, en interagissant à une main tandis que l'autre main portait le dispositif mobile.

1. <https://itunes.apple.com/us/app/x32-q/id587363794>

2. <http://tinyurl.com/qcygsqy>



Figure 1. Zone fonctionnelle du pouce en vert [7] : une estimation du niveau de difficulté faible pour interagir au pouce sur un dispositif mobile.

Les interfaces déformables sur dispositifs mobiles permettent de définir de nouveaux widgets qui sont physiques et donc tangibles sur le dessus de la surface de l'écran plat, par exemple un curseur physique qui serait comme posé sur l'écran plat. Par déformation, ces interfaces permettent un arrangement flexible des widgets tangibles sur la surface de l'écran. Le scénario suivant motive ce besoin conjoint de flexibilité et de tangibilité :

Alice est allée faire des courses pour un diner. A la caisse, en attendant de pouvoir payer ses courses, elle pense à régler la température chez elle. Pour cela elle prend son téléphone déformable d'une main et commence à déplacer un curseur tangible avec l'index de l'autre main. Ce curseur fait presque toute la hauteur de l'écran de son téléphone. Comme le caissier lui demande de payer et qu'il y a la queue derrière elle, elle décide de continuer à régler la température en rentrant chez elle avec ses courses d'une main et son téléphone de l'autre. Pour cela le curseur tangible se déforme en réduisant sa hauteur afin de permettre une interaction plus facile avec le pouce de la main qui tient le téléphone et éviter des changements de prise en main du téléphone qui pourrait finalement glisser et tomber par terre. Arrivée à la maison, elle reçoit un appel sur son téléphone fixe. Tout en parlant, elle interagit avec sa télé pour chercher dans une vidéo le bon endroit qui explique une recette de dessert pour son diner. Pour cela elle utilise son téléphone mobile déformable d'une main pour faire défiler la vidéo. Ayant raccroché elle continue sa recherche dans la vidéo mais avec deux mains pour ajuster précisément sur le début des explications du dessert. Alice est alors prête pour préparer son dessert.

Lorsque les widgets tangibles sont manipulés par le pouce de la main qui tient le dispositif, comme illustré dans le scénario, deux questions se posent : (a) La manipulation facile des widgets tangibles est-elle définie par la zone fonctionnelle du pouce définie pour des widgets graphiques ? (b) Dans le but d'interagir au-delà de la zone facilement atteignable, les widgets tangibles, grâce au retour haptique qu'ils procurent, permettent-ils un changement de prise

en main du dispositif plus facile qu'avec les widgets graphiques ?

Dans ce travail, nous visons à explorer quel phénomène - (a) ou (b) - a l'impact le plus fort sur les performances. Pour cela nous étudions l'impact sur les performances de la conception d'un curseur tangible et sa facilité de manipulation résultante sur un dispositif mobile.

Pour la conception du curseur tangible, nous étudions deux paramètres de conception : la taille et l'orientation de la glissière le long de laquelle se déplace le curseur. Ces deux paramètres ont en effet un impact sur la facilité de manipulation au regard de la zone fonctionnelle du pouce (figure 1). Nous avons donc construit quatre prototypes en considérant les combinaisons des deux paramètres de conception : Grand curseur Vertical, Grand curseur Incliné, Petit curseur Vertical, et Petit curseur Incliné (figure 3). Seule le Grand curseur Vertical implique des actions en dehors de la zone facilement atteignable avec le pouce.

Les participants ont effectué une tâche de pointage en tenant chaque prototype avec une ou deux mains. Pour l'interaction à une main, les résultats ont montré une différence de performances marginale (+ 0,7%) entre les deux grands curseurs (vertical et incliné) et une différence considérable (+ 29%) entre les petits et les grands curseurs. Ces résultats nous permettent de conclure que :

1. Quelle que soit la facilité de manipulation du curseur tangible (zone fonctionnelle du pouce de niveau de difficulté faible ou non), c'est la taille de l'espace moteur qui influence significativement les performances ;
2. Le changement de prise en main du dispositif afin d'interagir au-delà de la zone facilement atteignable avec le pouce est favorisé par la tangibilité du curseur, puisque ce changement a un impact marginal sur les performances.

INTERACTION AU POUCE

Etude de la zone fonctionnelle du pouce

En situation mobile, le nombre de mains utilisées pour interagir est limité : en effet selon la situation de mobilité il peut être difficile d'utiliser les deux mains. Une étude qui consistait à observer 780 personnes [13] a mis en évidence trois manières d'interagir avec un dispositif mobile : 49% des personnes observées interagissent avec la même main qui tient le téléphone, 36% interagissent avec une main tout en tenant l'appareil avec l'autre main et 15% interagissent avec les deux mains. De plus une étude de terrain par Karlson et al. [16] a été conduite auprès de 50 participants pour étudier comment ils interagissaient avec leur téléphone mobile dans un aéroport : 45% des participants ont utilisé une main et seulement 19% ont utilisé les deux mains. Les auteurs de [16] ont également mené une enquête en ligne sur les préférences d'interaction des utilisateurs. Ils rapportent que 66% des utilisateurs préfèrent utiliser une seule main et seulement 9% préfèrent utiliser les deux mains.

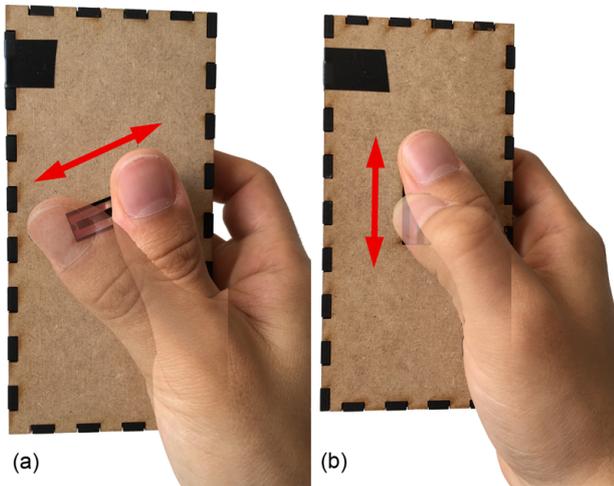


Figure 2. (a) Mouvement difficile : adduction-abduction du pouce. (b) Mouvement facile : flexion-extension du pouce [3, 16].

La dominance et la préférence de l'interaction mobile à une seule main avec le pouce ont motivé plusieurs études sur la zone fonctionnelle du pouce (Figure 1). Ceci est important car les progrès technologiques rendent possibles des écrans de dispositifs mobiles plus grands. Les utilisateurs peuvent alors interagir avec plus de contenu affiché à l'écran, mais il est plus difficile pour eux d'atteindre toutes les parties de l'écran avec le pouce. Une étude empirique par Karlson et al. [16] a montré que les zones difficiles à atteindre lors de l'interaction avec le pouce impliquent un ralentissement significatif du mouvement (entre 7% et 12%). Cette étude a également montré que certains mouvements du pouce (Figure 2a) sont plus difficiles que d'autres (Figure 2b). Enfin, l'étude a introduit trois niveaux de difficulté perçue par l'utilisateur : facile, moyen et difficile.

Plusieurs estimations heuristiques de la zone fonctionnelle du pouce ont été proposées [7, 9, 13, 22]. De plus, Bergström-Lehtovirta & Oulasvirta [2] ont proposé un modèle prédictif pour calculer la zone fonctionnelle du pouce. Les paramètres en entrée du modèle sont la taille de l'écran, la taille de la main et la position de l'index au dos du dispositif. Le modèle définit en sortie la zone fonctionnelle, qui est une zone sous une courbe parabolique (figure 1).

Accès facile à des éléments au-delà de la zone fonctionnelle de niveau de difficulté faible

Techniques d'interaction graphique

Pour pallier la difficulté d'accès avec le pouce à certaines zones de l'écran, plusieurs techniques d'interaction graphique ont été proposées. Ainsi Karlson & Bederson ont proposé ThumbSpace [15], une technique qui génère une vue proxy d'une zone de l'écran affichée dans la zone fonctionnelle du pouce, permettant ainsi l'accès facile avec le pouce aux cibles de cette zone de l'écran. Roudaut et al. ont présenté MagStick [20] une technique à curseur décalé. Le curseur est contrôlé par un bâtonnet télescopique qui est manipulé par le pouce et qui permet d'atteindre facilement des cibles en dehors de la zone fonctionnelle de niveau de difficulté faible. Yu et al. [23] ont conduit un étude

pilote qui a révélé que les utilisateurs préfèrent une interaction tactile directe au pouce plutôt que les techniques ThumbSpace [15] et MagStick [20] et que les utilisateurs considéreront ces techniques lorsque les cibles sont vraiment difficiles à atteindre. Yu et al. [23] ont également présenté deux techniques : la première technique, similaire à ThumbSpace [15] mais avec un fonctionnement nécessitant une seule action continue du pouce. Comme ThumbSpace, la technique génère une vue proxy d'une partie de l'écran, qui est affichée dans la zone fonctionnelle du pouce. La seconde technique repose sur un widget circulaire graphique qui est affiché à l'intérieur de la zone facile d'accès avec le pouce. Le widget est composé de quatre boutons qui permettent à l'utilisateur d'accéder facilement aux cibles à proximité des coins de l'écran.

Effet secondaire : changement de prise en main du dispositif

Pour atteindre des cibles en dehors de la zone fonctionnelle du pouce, il a été observé un changement de prise en main du dispositif : un décalage de la position du dispositif dans la main ou un changement de l'angle d'inclinaison de la main. Ce changement de prise en main du dispositif permet de décaler la zone fonctionnelle du pouce. Ce changement est fréquemment observé, en particulier avec les téléphones mobiles avec de grands écrans (de plus de 5 pouces en diagonale). Ainsi pour minimiser ces changements de prise en main du dispositif qui peuvent être hasardeux (tenue inconfortable et instable, risque de chute du dispositif), Hong & Lee [12] proposent un widget circulaire similaire à celui de Yu et al. [23] affiché dans la zone facile d'accès pour le pouce. Ce widget circulaire est affiché dans la zone facile d'accès avec le pouce et permet l'accès aux commandes fréquentes. Ce widget est inspiré de la zone circulaire ou rectangulaire des téléphones avec un clavier physique : cette zone généralement au dessus du clavier est destinée au pouce et permet d'accéder aux commandes fréquentes comme [Ok], [Back] ou [Menu].

Le changement de prise en main du dispositif a été tellement observé que les expérimentations [2, 17] prennent en compte la prise en main du dispositif ou contraignent les participants à tenir le dispositif dans une position fixe (par exemple en indiquant la position des doigts sur le dos du téléphone). De plus des travaux visent à capter ces changements de prise en main du dispositif afin d'adapter l'interaction : ainsi Goel et al. ont proposé une technique, GripSense [10], qui identifie la prise en main du dispositif à partir des capteurs embarqués (accéléromètre, gyroscope) et des interactions tactiles. De plus Negulescu & McGreener [18] ont présenté une technique qui permet de prédire le point de sélection avant le touché sur l'écran avec le pouce, en se basant sur la prise en main du dispositif qui est captée par les capteurs embarqués (accéléromètre, gyroscope).

Tous les travaux liés à la zone fonctionnelle du pouce ont été effectués pour les interfaces graphiques. Étant donné que les avantages de la tangibilité ont été démontrés pour les dispositifs mobiles (widgets tangibles fixés par l'utilisateur sur l'écran [14] et widgets tangibles émergeant

de l'écran déformable [19]), nous nous concentrons sur la zone fonctionnelle du pouce pour des widgets tangibles. En effet ces widgets tangibles définissent une nouvelle perspective sur le problème de l'accessibilité pour l'interaction au pouce. Spécifiquement pour l'interaction à une main avec le pouce, nous visons (a) à confirmer l'impact de la zone fonctionnelle du pouce pour le cas d'un curseur tangible et (b) à étudier si la tangibilité du curseur aide le changement de prise en main du dispositif.

EXPERIENCE

Pour la conception d'un curseur tangible déformable sur dispositif mobile, nous avons mené une expérience évaluant l'impact de l'orientation et de la taille d'un curseur tangible sur les performances de pointage et sur la prise en main. L'expérience (intra-sujets) étudie l'impact des trois variables suivantes :

- **Orientation** : curseur Vertical ou Incliné
- **Longueur** : Petit ou Grand curseur
- **Nombre de Mains (NM)** : interaction à Une Main ou à Deux Mains

La variable Orientation comprend deux valeurs : Vertical (90 degrés) et Incliné (68 degrés). Nous avons choisi l'orientation verticale car elle est la plus répandue sur les dispositifs usuels (par exemple les consoles de mixage ou les panneaux de contrôle de maison intelligente). Hirokata [11] a mesuré un angle de rotation moyen de 68,1 degrés avec le pouce. Nous avons choisi un angle de 68 degrés pour correspondre à la zone fonctionnelle du pouce.

La variable Longueur est la distance de déplacement du curseur. Ses valeurs sont 20mm et 70mm. Pour définir la plus grande longueur (70mm), nous avons calculé la longueur de la corde D entre les deux points de part et d'autre de l'angle de rotation du pouce. Sa valeur est donnée par l'équation suivante : $D = 2r \sin(\frac{\theta}{2})$, avec r le rayon, c'est-à-dire la longueur du pouce et θ l'angle sous-tendu par la corde, c'est-à-dire l'angle de rotation du pouce. Hirokata [11] a mesuré la longueur moyenne d'un pouce (r) de 60,4 mm et un angle de rotation moyen (θ) de 68,1 degrés. Nous obtenons donc une ligne droite moyenne maximale (D) que le pouce peut effectuer de 70,16 mm. Nous soulignons le fait que les deux valeurs de la variable Longueur (20 mm et 70 mm) se situent dans la gamme des curseurs commerciaux qui varient en longueur de 15 mm à 100 mm³.

Le variable NM représente la façon dont le dispositif mobile est pris en main : avec une seule main, pour l'interaction avec le pouce de la main qui tient le dispositif et avec deux mains, par exemple une main tenant le dispositif et l'autre manipulant le curseur.

Matériel et Participants

Nous avons développé quatre prototypes (figure 3, haut) : deux avec un curseur Vertical (a et c) et deux avec un curseur Incliné (b et d). Pour chacune de ces Orientations,

3. Par exemple : <http://tinyurl.com/hlsc4be>

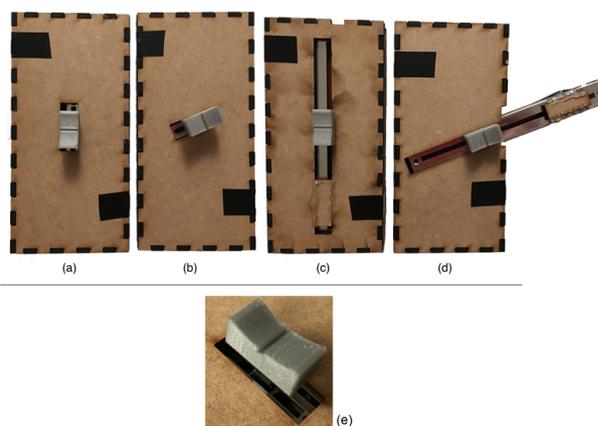


Figure 3. Prototypes : (a) Petit curseur Vertical, (b) Petit curseur Incliné, (c) Grand curseur Vertical et (d) Grand curseur Incliné (e) Tous les prototypes ont un bouton de forme concave pour permettre une interaction avec le pouce.

nous avons développé un prototype avec un Petit curseur (a et b) et un avec un Grand curseur (c et d). Nous avons utilisé des curseurs Bourns⁴ : PTA2043-2015CPB103 avec 20mm de déplacement et PTB0143-2010BPB103. Ce dernier a 100mm de déplacement, que nous avons limité à 70mm (figure 3c et 3d). Nous envisageons que le Grand Curseur tangible qui sort de l'écran soit réalisable dans le futur, grâce aux recherches sur les matériaux programmables⁵.

Le bouton de chaque prototype a une forme concave afin de permettre l'interaction avec le pouce (figure 3e). Tous les prototypes, sans considérer les curseurs, avaient les mêmes dimensions : 137mm (hauteur) × 66mm (largeur) × 20mm (épaisseur). Leur longueur et largeur étaient celles d'un dispositif mobile actuel⁶ pour permettre une prise en main similaire à celle des dispositifs mobiles actuels. Les prototypes ont été construits à l'aide de médium de 3mm d'épaisseur, découpé au laser.

Pour relier les prototypes au logiciel de l'expérience, les quatre prototypes sont connectés à une carte Arduino Mega 2560. La carte est elle-même connectée via USB à un ordinateur MacBook Pro 15 pouces (courant 2015) exécutant le logiciel. Le logiciel expérimental affiche les tâches de pointage sur son écran Retina avec une résolution de 110 pixels par pouces.

Dix volontaires (âgés entre 22 et 33 ans, $M = 27,2$, $SD = 3,1$, 7 hommes et 3 femmes) ont été recrutés sur le campus. Tous étaient droitiers et utilisateurs au quotidien d'un téléphone à écran tactile. En moyenne la distance entre le pouce et l'index de la main ouverte des participants est égale à 16,5 mm ($SD = 1,45$ mm). Cette distance entre le pouce et l'index de la main ouverte permet de calculer la zone fonctionnelle du pouce comme expliqué dans [2].

4. see footnote 3

5. Par exemple : <http://tinyurl.com/27nyr5>

6. iPhone 6s : <http://www.apple.com/iphone-6s/specs/>

Tâche expérimentale

Les participants ont effectué une tâche de pointage (figure 4). Cette tâche est souvent étudiée (par exemple dans [1, 5, 8, 20, 23]). C'est aussi une tâche élémentaire souvent effectuée avec des curseurs, par exemple pour se déplacer dans la liste de chaînes de la télévision. La tâche expérimentale (figure 4) consiste à positionner un curseur (contrôlé par l'utilisateur) à l'intérieur d'une zone cible affichée. Le curseur de l'utilisateur se déplace le long d'une fine ligne blanche verticale de 140mm / 606px. Le curseur est représenté par une fine ligne horizontale, que l'utilisateur peut donc déplacer verticalement. La taille de la zone cible à l'écran est de 7mm / 31px afin de ressembler à une zone cible d'une tâche écologique, par exemple pour choisir la chaîne de la télévision. L'erreur de pointage est affichée (en rouge à la figure 4) entre le curseur de l'utilisateur et la cible.

Lors de l'expérience, nous avons demandé aux participants d'être aussi rapides que possible. Comme pour certaines études antérieures (par exemple [8]), chaque tâche de pointage doit être terminée avec succès. Le taux d'erreur est donc nul. Comme le mécanisme de validation du pointage n'est pas l'objet de notre expérience, mais qu'il peut néanmoins provoquer des erreurs [21], nous avons choisi d'éviter toute validation active. Nous avons demandé aux utilisateurs de garder le curseur à l'intérieur la zone cible pendant 1 seconde. Ce mécanisme de validation est utilisé [24] pour permettre d'éviter une action supplémentaire pour confirmer le pointage. Ce faisant, nous nous assurons que nos résultats ne dépendent pas du mécanisme de validation. Pour notre analyse, nous soustrayons cette seconde supplémentaire pour calculer le temps de déplacement. Une fois la tâche terminée avec succès, une nouvelle cible apparaît à une distance de 100 mm / 433 px de la position courante du curseur de l'utilisateur.

La taille et la distance de la cible correspondent à un indice de difficulté de Fitts (ID) de 4, ce qui est un indice moyen dans la plage des ID utilisée par Casiez et al. [5]. Cette valeur est calculée avec l'équation suivante : $ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right)$, où D est la distance entre le curseur de l'utilisateur et la cible, et W est la taille de la cible. La différence entre les fonctions de gain (control-display CD gain, ratio entre le déplacement du curseur tangible et le déplacement du curseur à l'écran) pour les deux Grands

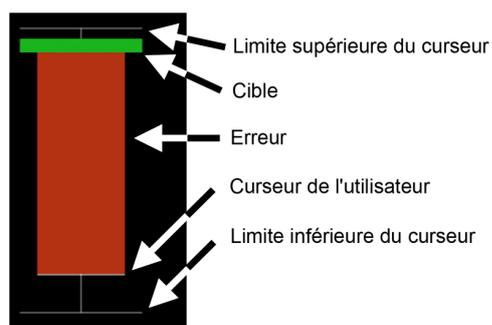


Figure 4. Capture d'écran de la tâche expérimentale de pointage avec un déplacement maximale de 140mm / 606px, une cible de 7mm / 31px et une distance de pointage de 100mm / 433px.

curseurs (= 2) et pour les deux Petits curseurs (= 7) sont dans la gamme des fonctions de gains qui n'affectent pas de manière significative le temps de déplacement [5].

Nous avons mesuré le temps de déplacement (TD) à partir du début de chaque tâche jusqu'à la validation dans la zone cible. Nous soustrayons de ce temps la seconde nécessaire pour la validation. Nous avons également compté le nombre de changements de prise en main du dispositif mobile grâce aux vidéos enregistrées. Enfin, nous avons recueilli l'utilisabilité perçue de chaque prototype et les préférences des utilisateurs via un questionnaire SUS [4].

Protocole

Pour commencer, nous avons présenté les quatre prototypes aux participants. Ils se sont entraînés avec les quatre prototypes jusqu'à ce qu'ils signalent à l'expérimentateur qu'ils étaient prêts pour l'expérience.

L'ordre de présentation de la variable NM est pseudo-aléatoire, en 2 blocs : un bloc pour Une Main et un bloc pour Deux Mains, afin d'éviter de changer la prise en main trop souvent. La moitié des participants ont commencé avec Une Main pendant le premier bloc et ont continué avec Deux Mains pendant le second bloc ; et vice-versa pour l'autre moitié des participants. Avec les Deux Mains, les participants ont été libres de choisir comment prendre en main le prototype.

Chaque bloc est divisé en 4 sous-blocs représentant les 4 combinaisons possibles des variables Longueur × Orientation. Les quatre sous-blocs ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Les participants ont pu effectuer une pause entre chaque sous-bloc. Dans chaque sous-bloc, les participants ont réalisé 17 répétitions de la tâche de pointage. La première répétition n'a pas été prise en compte dans l'analyse. Ceci nous a permis d'éviter que les résultats soient trop influencés par la condition précédente.

Un total de 1280 mesures du temps de déplacement a été recueilli via les 10 participants × 16 répétitions × 2 Nombres de Mains × 2 Longueurs × 2 Orientations. Pour chaque Nombre de Mains × Longueur × Orientation, nous avons recueilli 160 mesures du temps de déplacement.

Pendant l'expérience, les actions des participants étaient filmées afin de pouvoir étudier a posteriori la prise en main des prototypes. Pour cela nous avons annoté les vidéos en notant les changements de prise en main (translation et rotation du dispositif dans la main). Nous avons aussi noté la prise en main initiale et les déplacements des doigts sur le dos du dispositif. En fin d'expérience, les participants ont répondu à un questionnaire SUS pour recueillir l'utilisabilité perçue des 4 prototypes présentés (2 Longueurs × 2 Orientations). Nous avons aussi recueilli leurs préférences lors d'un entretien clôturant l'expérience.

RESULTATS ET DISCUSSION

Pour l'interaction à Deux Mains, le Grand curseur Vertical est le plus performant ($TD = 1,33s$ pour le Grand curseur

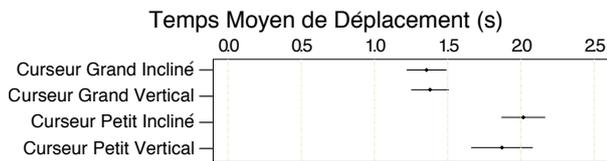


Figure 5. Temps moyen de déplacement (en seconde) pour l'interaction à Une Main pour les 4 combinaisons de Longueur et d'Orientation. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

Vertical vs. $TD = 1,35s$ pour le Grand curseur Incliné). Pour l'interaction à Une Main (figure 5), la différence entre le Grand curseur Incliné et celui Grand et Vertical est marginale. Comme dans tous les cas, le Grand curseur Vertical est parmi les plus performants, nous concluons que la déformation du dispositif mobile visant de meilleures performances grâce à un arrangement flexible du curseur n'est donc pas nécessaire.

Nous nous concentrons maintenant sur l'interaction à une main. Nous allons présenter nos résultats à la lumière des niveaux de difficulté bas, moyen et élevé de la zone fonctionnelle du pouce. Dans Karlson et al. [16] des zones de difficulté (facile, moyenne et difficile) ont été proposées en fonction de la difficulté perçue par les utilisateurs. Cependant aucune frontière n'est décrite entre ces 3 zones. Dans cet article, nous définissons le niveau de difficulté élevé par la zone dans laquelle le changement de prise en main est nécessaire et affecte considérablement les performances. Le niveau de difficulté moyen est la zone dans laquelle un changement de prise en main est nécessaire mais n'affecte que légèrement les performances. Le niveau de difficulté bas est la zone dans laquelle les utilisateurs ne doivent pas changer la prise en main du dispositif mobile pour accomplir la tâche. Dans la suite de ce paragraphe nous verrons que nos résultats mettent en évidence les niveaux de difficulté bas et moyen. Le niveau de difficulté élevé n'est pas observé dans notre étude.

Pour les deux Petits curseurs, la zone fonctionnelle du pouce reste par conception dans le niveau de difficulté bas (figures 6a et 6b). Aucun changement de prise en main n'est nécessaire. L'orientation du Grand curseur Incliné évite également tout changement de prise en main, et reste donc également dans le niveau de difficulté faible (figure 6c). Seul le Grand curseur Vertical nécessite un changement de prise en main pour effectuer les tâches de pointage pendant l'expérience. En moyenne 9/10 participants ont changé de prise en main. Ces 9 participants ont changé en moyenne 16 fois de prise en main (entre 15 et 17 fois). Seul ce Grand curseur Vertical relève par conception de la zone fonctionnelle du pouce de niveaux de difficulté moyen ou élevé (figure 6d).

Un test de Shapiro-Wilk a révélé que les variances de nos données n'étaient pas homogènes. Nous avons donc analysé nos données à l'aide d'un test non paramétrique de Friedman. Ce test a révélé un impact de la Longueur du curseur sur le temps de déplacement ($\chi^2 = 25.6, p < 0.001$) (figure 5). Nous expliquons cette différence par la difficulté d'effectuer la tâche dans un petit espace moteur.

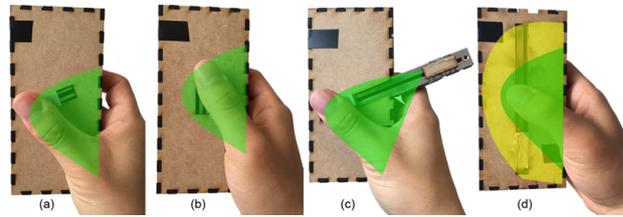


Figure 6. Le niveau de difficulté faible (en vert) et le niveau de difficulté moyenne (en jaune) de la zone fonctionnelle du pouce sur les quatre prototypes.

La tâche était difficile avec les Petits curseurs tangibles ($TD = 1,92s$) et beaucoup plus facile avec les Grands curseurs tangibles ($TD = 1,35s$).

Les tests à posteriori (Wilcoxon avec correction de Bonferroni) ont montré une petite différence ($p < 0,03$) entre les Petits curseurs Vertical ($TD = 1,84s$) et le Petit curseur Incliné ($TD = 1,99s$). Entre les Grands curseurs, la différence est encore plus faible (différence de $TD = 0,14s$; $p < 0,5$). Pour les Petits curseurs, puisque les deux orientations relèvent du niveau de difficulté faible de la zone fonctionnelle du pouce, l'amélioration (+0.15s) suggère que les mouvements verticaux sont légèrement plus efficaces que les mouvements en diagonale lorsqu'ils sont effectués avec le pouce (figure 2). Ce résultat sur les curseurs tangibles étend les résultats de Karlson et al. [16] pour l'interaction tactile, qui préconise l'utilisation de mouvements orthogonaux plutôt que pour des mouvements en diagonale pour l'interaction avec le pouce sur les écrans tactiles.

La différence de temps de déplacement entre les deux Orientations des Grands curseurs est marginale. Pourtant, comme attendu par nos choix de conception, nous avons observé que tous les participants ont changé leur prise en main du dispositif mobile (rotation et translation) lorsqu'ils essayaient d'atteindre la cible avec le Grand curseur Vertical (figure 7). Au contraire avec le Grand curseur Incliné, tous les participants ont gardé la même prise en main. Le changement de prise en main vers une zone de difficulté moyenne (figure 6d) a donc peu d'impact sur le temps de déplacement. Nous expliquons cela par le retour haptique passif que le curseur tangible fournit.

Nous avons remarqué que lors d'un changement de la prise en main du dispositif mobile, un changement continu de la prise en main du bouton a eu lieu également. Bien que ce changement n'ait pas eu d'effet sur la performance pendant notre expérience, nous pensons que pour les plus grands curseurs (>70mm), le changement de prise en main du bouton pourrait avoir un impact sur les performances. En particulier, l'effet pourrait être plus important si les utilisateurs devaient repositionner complètement leur pouce sur le bouton pendant la tâche, comme lorsque les utilisateurs repositionnent la souris pour effectuer des déplacements importants.

Le Grand curseur Vertical a été perçu le plus utilisable par les participants, suivi par le Petit curseur Vertical (tableau 1). Nous expliquons ceci par la familiarité des participants

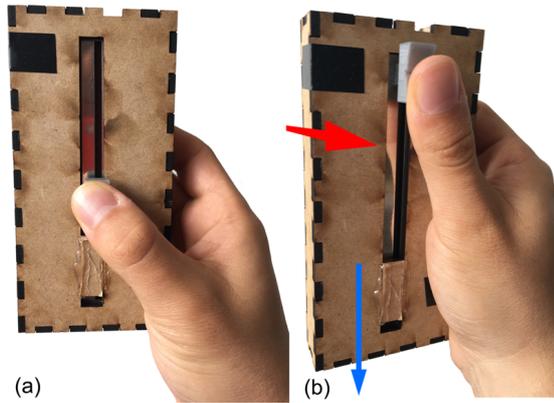


Figure 7. (a) Prise en main initiale. (b) Rotation (flèche rouge) et translation (flèche bleue) du dispositif pour atteindre la cible avec le Grand curseur Vertical. Un changement continu dans la prise en main du bouton est également observé.

Tableau 1. Scores SUS pour chaque combinaison de Longueur \times Orientation pour l'interaction à Une Main.

| Longueur | Orientation | Score SUS |
|---------------|-------------|-----------|
| Petit Curseur | Vertical | 73,75 |
| Petit Curseur | Incliné | 68,75 |
| Grand Curseur | Vertical | 76,875 |
| Grand Curseur | Incliné | 68,75 |

avec cette Orientation : certains participants ont indiqué qu'ils préféraient l'Orientation Verticale parce qu'elle ressemblait aux gestes de balayage utilisés quotidiennement avec leur dispositif mobile tactile. Cependant, plusieurs participants ont fait remarquer que le Grand curseur Incliné était plus confortable à utiliser : « je trouve le grand curseur incliné mieux pour le pouce car c'est dans la même direction que le mouvement du pouce » ; « je choisirais le grand curseur incliné car il offre une meilleure ergonomie pour l'interaction avec le pouce » ; « je préfère le curseur incliné car il était plus facile à utiliser à une main » ; « pour une main, je trouve le grand curseur incliné plus facile à manipuler ». Le niveau de difficulté de la zone fonctionnelle du pouce aurait donc un impact sur la préférence plutôt que la performance.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les interfaces tangibles déformables pour les dispositifs mobiles définissent une nouvelle perspective sur le problème de l'accessibilité pour l'interaction avec le pouce de la main qui tient le dispositif mobile. Nos résultats expérimentaux pour des curseurs tangibles ont montré que :

1. la taille de l'espace moteur influence significativement les performances (différence significative des performances entre grands et petits curseurs) ;
2. le changement de prise en main nécessaire au-delà de la zone fonctionnelle du pouce (passage du niveau de difficulté facile à celui moyen) a un impact marginal sur les performances.

Au contraire des performances, les préférences des participants soulignent l'importance de maintenir les actions dans la zone fonctionnelle du pouce de niveau de difficulté bas. Ces résultats définissent de premiers éléments

pour la conception d'interfaces tangibles déformables pour l'interaction à une main.

Nos travaux actuels et futurs concernent tout d'abord l'extension de cette expérimentation en considérant différentes tailles de curseur. Notre objectif est de définir la limite supérieure de taille à partir de laquelle les performances avec un curseur tangible se dégradent. L'identification de cette limite permettra de définir la zone correspondant à un niveau de difficulté élevé qui implique un changement important dans la prise en main du dispositif et du bouton. Ceci permettra de confirmer et mesurer expérimentalement les trois niveaux de difficulté (facile, moyenne et difficile) perçue par les utilisateurs dans l'étude de Karlsson et al. [16]. Nous souhaitons aussi comparer ces résultats avec des curseurs graphiques afin de mesurer les différences de performances et de changement de prise en main. Aussi, nous souhaitons étudier l'interaction à deux mains avec un curseur tangible et en particulier l'interaction avec les deux pouces que nous avons observée lors d'une étude pilote. Enfin nous envisageons aussi de considérer d'autres widgets tangibles sur mobile comme un bouton et un menu.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cet article a été partiellement financé par l'agence nationale de la recherche (ANR-11-LABX-0025-01, ANR-11-EQPX-0002, ANR-15-CE23-0011-01). Les prototypes ont été développés dans les deux fablab : - AmiQual4home (<https://amiqual4home.inria.fr/fr/tools/cl/>) - MSTIC (<http://fabmstic.liglab.fr/>)

BIBLIOGRAPHIE

1. Ravin Balakrishnan and I. Scott MacKenzie. 1997. Performance Differences in the Fingers, Wrist, and Forearm in Computer Input Control. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97)*. ACM, New York, NY, USA, 303–310. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/258549.258764>
2. Joanna Bergstrom-Lehtovirta and Antti Oulasvirta. 2014. Modeling the Functional Area of the Thumb on Mobile Touchscreen Surfaces. In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 1991–2000. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2556288.2557354>
3. Sebastian Boring, David Ledo, Xiang 'Anthony' Chen, Nicolai Marquardt, Anthony Tang, and Saul Greenberg. 2012. The Fat Thumb : Using the Thumb's Contact Size for Single-handed Mobile Interaction. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services Companion (MobileHCI '12)*. ACM, New York, NY, USA, 207–208. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2371664.2371711>
4. John Brooke. 1996. SUS : A quick and dirty usability scale. In *Usability evaluation in industry*, Patrick W. Jordan, Bernard Weerdmeester, B. Thomas, and Ian Lyall McLelland (Eds.). CRC Press, London, 189–194. <https://doi.org/10.1080/10447319608839558>

[//www.crcpress.com/product/isbn/9780748404605](http://www.crcpress.com/product/isbn/9780748404605)
ISBN : 9780748404605.

5. Géry Casiez, Daniel Vogel, Ravin Balakrishnan, and Andy Cockburn. 2008. The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks. *Human-Computer Interaction* 23, 3 (2008), 215–250. DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/07370020802278163>
6. Lung-Pan Cheng, Hsiang-Sheng Liang, Che-Yang Wu, and Mike Y. Chen. 2013. iGrasp : Grasp-based Adaptive Keyboard for Mobile Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. ACM, New York, NY, USA, 3037–3046. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2470654.2481422>
7. Josh Clark. 2012. Designing for touch (section “Rule of thumb”). <http://www.creativebloq.com/design/designing-touch-2123037>. (2012). Accessed : 15-05-2016.
8. Céline Coutrix and Cédric Masclet. 2015. Shape-Change for Zoomable TUIs : Opportunities and Limits of a Resizable Slider. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9296. Springer International Publishing, 349–366. DOI : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22701-6_27
9. Dustin Curtis. 2011. 3.5 inches. <http://dcurt.is/3-point-5-inches>. (2011). Accessed : 15-05-2016.
10. Mayank Goel, Jacob Wobbrock, and Shwetak Patel. 2012. GripSense : Using Built-in Sensors to Detect Hand Posture and Pressure on Commodity Mobile Phones. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '12)*. ACM, New York, NY, USA, 545–554. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2380116.2380184>
11. Nambu Hirotaka. 2003. Reassessing Current Cell Phone Designs : Using Thumb Input Effectively. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '03)*. ACM, New York, NY, USA, 938–939. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/765891.766081>
12. Jonggi Hong and Geehyuk Lee. 2013. TouchShield : A Virtual Control for Stable Grip of a Smartphone Using the Thumb. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13)*. ACM, New York, NY, USA, 1305–1310. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2468356.2468589>
13. Steven Hooper. 2011. How Do Users Really Hold Mobile Devices ? <http://www.uxmatters.com/mt/archives/2013/02/how-do-users-really-hold-mobile-devices.php>. (2011). Accessed : 15-05-2016.
14. Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, and Jean-Daniel Fekete. 2012. Tangible Remote Controllers for Wall-size Displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12)*. ACM, New York, NY, USA, 2865–2874. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2207676.2208691>
15. Amy K. Karlson and Benjamin B. Bederson. 2007. ThumbSpace : Generalized One-handed Input for Touchscreen-based Mobile Devices. In *Proceedings of the 11th IFIP TC 13 International Conference on Human-computer Interaction (INTERACT'07)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 324–338. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1776994.1777034>
16. Amy K. Karlson, Benjamin B. Bederson, and Jose L. Contreras-Vidal. 2008. Understanding One-Handed Use of Mobile Devices. In *Handbook of Research on User Interface Design and Evaluation for Mobile Technology*. IGI Global, Hershey, PA, USA, Chapter 6, 86–101. DOI : <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-59904-871-0.ch006>
17. Huy Viet Le, Sven Mayer, Katrin Wolf, and Niels Henze. 2016. Finger Placement and Hand Grasp During Smartphone Interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '16)*. ACM, New York, NY, USA, 2576–2584. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2851581.2892462>
18. Matei Negulescu and Joanna McGrenere. 2015. Grip Change As an Information Side Channel for Mobile Touch Interaction. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 1519–1522. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702185>
19. Simon Robinson, Céline Coutrix, Jennifer Pearson, Juan Rosso, Matheus Fernandes Torquato, Laurence Nigay, and Matt Jones. 2016. Emergeables : Deformable Displays for Continuous Eyes-Free Mobile Interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*. ACM, New York, NY, USA, 3793–3805. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858097>
20. Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. 2008. TapTap and MagStick : Improving One-handed Target Acquisition on Small Touch-screens. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '08)*. ACM, New York, NY, USA, 146–153. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/1385569.1385594>
21. Adriano Scoditti, Thomas Vincent, Joëlle Coutaz, Renaud Blanch, and Nadine Mandran. 2011. TouchOver : Decoupling Positioning from Selection on Touch-based Handheld Devices. In *Actes de la 23ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2011)*. Nice, France, 37–40. DOI : <http://dx.doi.org/10.1145/2044354.2044362>
22. Luke Wroblewski. 2012. Responsive navigation : Optimizing for touch across devices. <http://www.lukew.com/ff/entry.asp?1649>. (2012). Accessed : 15-05-2016.
23. Neng-Hao Yu, Da-Yuan Huang, Jia-Jyun Hsu, and Yi-Ping Hung. 2013. Rapid Selection of Hard-to-access Targets by Thumb on Mobile Touch-screens. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer*

Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '13). ACM, New York, NY, USA, 400–403. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1145/2493190.2493202>

24. Xinyong Zhang, Wenxin Feng, and Hongbin Zha. 2012. Modeling Dwell-based Eye Pointing at

Two-dimensional Targets. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '12)*. ACM, New York, NY, USA, 1751–1756. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1145/2212776.2223704>