Curseur Tangible et Déformable sur Dispositifs Mobiles pour Interagir à une Main sans Regarder l'Écran

Deformable Tangible Slider for Eyes-Free One-Handed Thumb Interaction on Mobile Devices

Juan Rosso[1], Céline Coutrix[1,2], Matt Jones[3], Laurence Nigay[1]

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

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

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

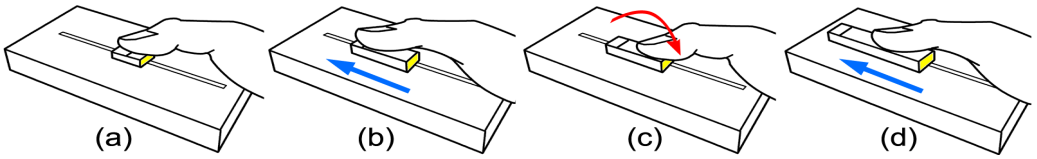

Figure 1: Le curseur tangible déformable permet des manipulations (flèches bleues) sans changement de prise en main du dispositif en permettant le débrayage (flèche rouge). Pour cela, le bouton du curseur se déforme (côté jaune) dans la direction opposée du mouvement du pouce (b et d).

ABSTRACT

Graphical sliders are widely used on mobile devices. However, with a single hand, reaching for far values is difficult : users change their grip and can drop the device. Moreover, sliders require visual attention to operate them. Envisioning mobile devices that dynamically extend tangible sliders out of the screen, the contribution of this work is a first attempt to experimentally study a deformable tangible slider that facilitate thumb interaction on mobile devices. The deformable tangible slider expands its cursor (Figure 1) to avoid hand-grip changes by maintaining the thumb within its comfortable area. Moreover, its tangible aspect allows eyes-free interaction. We first compared a low-fidelity prototype with a classic tangible slider. The prototype improves performance by 9.2% when targets are outside the thumb's comfortable area. We then designed a deformable slider that we compared to a classic tangible slider and a graphical one. Though the deformable slider is globally faster (14.3%) than the classic tangible one, the difference is not significant. While the graphical slider performs faster, the deformable tangible slider offers eyes- free interaction and stable hand-grip.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **Mobile devices**;

KEYWORDS

Deformable slider, Mobility, Thumb interaction, Tangible interaction.

RÉSUMÉ

Les curseurs graphiques sont largement utilisés sur les dispositifs mobiles. Cependant, atteindre des valeurs éloignées avec le pouce de la main qui tient le dispositif est difficile : les utilisateurs changent alors la prise en main du dispositif au risque de le faire tomber. De plus, les curseurs graphiques sollicitent l'attention visuelle pour les manipuler. En anticipant que les dispositifs mobiles pourront faire émerger de leurs écrans des curseurs physiques dynamiquement, notre contribution est une première exploration expérimentale d'un curseur tangible qui se déforme pour faciliter l'interaction mobile avec le pouce de la main qui tient le dispositif. Le curseur tangible se déforme pour que le pouce manipule toujours le curseur dans la zone d'action facilement atteignable (Fig. 1). Le curseur tangible déformable (1) évite les changements de prise en main en maintenant le pouce dans sa zone de confort, et (2) permet une interaction sans regarder le dispositif mobile. Nous avons d'abord comparé un prototype basse-fidélité avec un curseur classique tangible. Le prototype améliore les performances de 9.2% lorsque les cibles sont en dehors de la zone de confort du pouce. Nous avons ensuite conçu un curseur déformable que nous avons comparé à un curseur tangible classique et à un curseur graphique. Les résultats expérimentaux démontrent que le curseur tangible déformable est globalement plus rapide de 14.3% que le curseur tangible classique sans que les résultats soient significativement différents. Alors que le curseur graphique offre de meilleures performances que les deux autres curseurs tangibles, le curseur tangible déformable offre une

* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

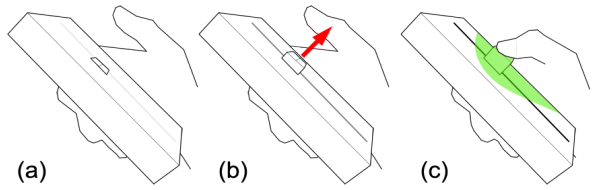

Figure 2: a) Le curseur graphique est affiché. b) Inspiré du concept d'*emergeable* [14], le curseur se transforme (flèche rouge) et devient tangible au-dessus de la surface de l'écran. c) Le curseur tangible est prêt à être manipulé. L'estimation de la zone fonctionnelle du pouce (en vert) issue de [2] indique la zone de manipulation confortable du curseur tangible avec le pouce.

interaction sans regarder le dispositif avec une prise en main du dispositif stable.

MOTS-CLEFS

Curseur déformable, Mobilité , Interaction au pouce, Interaction tangible.

1 INTRODUCTION

Sur les dispositifs mobiles, les curseurs graphiques sont couramment utilisés pour le contrôle continu de paramètres comme la luminosité et le volume sonore ou pour le contrôle distant d'appareils comme les consoles de mixage ou les panneaux de contrôle de maison intelligente. Ces curseurs peuvent être de grande taille et sont généralement positionnés verticalement ou horizontalement. De plus comme les utilisateurs préfèrent utiliser le dispositif mobile à une main [10], accéder à toutes les positions d'un curseur de grande taille est difficile comme illustré à la figure 2c.

Les problèmes d'accès à toutes les zones de l'écran avec le pouce de la main qui tient le dispositif s'étudient au regard de la zone dite fonctionnelle du pouce [2]. Cette dernière dépend de la prise en main du dispositif. Pour atteindre des cibles en dehors de la zone fonctionnelle du pouce, deux types de changement de prise en main du dispositif ont été observés : le changement de préhension du dispositif et le déplacement/translation du dispositif au sein de la main. Ces changements peuvent induire des prises en main inconfortables voir instables avec le risque de chute du dispositif. Plusieurs études [7, 21] ont visé à minimiser ces changements de prise en main dans le cas d'interfaces graphiques.

De plus, les curseurs graphiques impliquent que les utilisateurs regardent l'écran pour acquérir le bouton du curseur. L'interaction avec un curseur graphique implique donc l'attention visuelle de l'utilisateur. Au contraire les curseurs tangibles permettent l'interaction sans regarder le dispositif grâce au retour tactile [9, 14]. Plusieurs boutons physiques sont disponibles sur les dispositifs mobiles pour le contrôle de paramètres comme la luminosité ou le volume sonore. Néanmoins ces boutons ne permettent pas un contrôle continu des paramètres : par exemple modifier le volume sonore peut devenir fastidieux car l'appui du bouton doit être effectué plusieurs fois. Ceci est particulièrement gênant pour des utilisateurs ayant l'habitude d'un contrôle continu du paramètre comme le volume sonore sur une table de mixage. Ce constat a encouragé les études sur les curseurs tangibles sur dispositifs mobiles [9, 14].

En considérant un curseur tangible afin de permettre l'interaction sans regarder le dispositif, l'objectif est alors de minimiser les changements de prise en main dans le cas d'un curseur de grande taille. Une solution explorée par Rosso et al. [15] est de réduire la longueur de la glissière du curseur tangible afin de maintenir l'espace contrôle dans la zone fonctionnelle confortable du pouce. L'étude a comparé les performances pour des curseurs de 20mm et de 70mm de longueur. Les résultats ont montré une perte de performance due à la différence entre les fonctions de gain (*Control-Display CD gain*). Un petit mouvement avec le curseur de 20 mm provoquait un changement important du paramètre tandis qu'un petit mouvement avec le grand curseur de 70mm provoquait un changement minime du paramètre. Pour réduire le CD gain, la solution que nous explorons est alors le mécanisme de débrayage (*clutching*) permettant de maintenir les actions du pouce dans la zone fonctionnelle confortable. Il convient de noter que les études sur le débrayage ont été réalisées dans le cas de pointage relatif avec une souris ou un pavé tactile [3, 12] : les conclusions de ces études sont contradictoires. Dans cet article, nous nous concentrons sur le mécanisme de débrayage dans le cas de pointage absolu avec un curseur tangible.

En anticipant que les dispositifs mobiles pourront faire émerger de leurs écrans des contrôleurs physiques dynamiquement (concept d'*emergeable* par Robinson et al. [14]), comme un curseur cet article présente un curseur tangible déformable. Lorsque le curseur tangible est apparu et disponible sur l'écran (figure 2b), la longueur du bouton physique du curseur manipulé par le pouce augmente pour permettre le débrayage et donc des actions du pouce maintenues dans la zone fonctionnelle confortable (figure 1). La déformation du bouton physique manipulé est calculée par rapport à la valeur du paramètre contrôlé. Ainsi lorsque le bouton est déplacé vers le haut, le bouton du curseur se déforme vers le bas tout en maintenant le repère physique du bouton vers le haut (figure 1 a-b et c-d).

Il est important de noter l'utilité de garder le repère du bouton (trait sur le bouton à la figure 1) pour les cas où le paramètre à ajuster n'est pas directement perceptible (par exemple, ajuster le volume des haut-parleurs de musiciens distants) ou pour la reprise d'une tâche interrompue. Une telle observabilité de la valeur spécifiée, véhiculée par le repère du bouton déformable, ne serait pas fournie par un curseur non déformable qui se déplacerait automatiquement pour se repositionner dans la zone fonctionnelle confortable du pouce lors du débrayage. D'autres solutions comme un contrôle par vitesse ne permettraient pas cette observabilité de la valeur courante spécifiée. Enfin comme les curseurs sont des interacteurs graphiques couramment utilisés dans des applications mobiles comme une table de mixage, nous n'avons pas considéré un autre interacteur que le curseur.

Le scénario suivant illustre le besoin : *Bob est l'ingénieur du son d'un groupe de musique qui se produira en direct sur un lieu ouvert. Bob utilise un téléphone déformable capable de faire émerger des éléments tangibles de sa surface, imitant ceux qu'il utilise sur la console de mixage. Bob est chargé d'ajuster le volume des instruments de plusieurs haut-parleurs. Pour cela Bob se déplace pour ajuster le volume*

perçu en particulier dans les lieux où les instruments se chevauchent. En même temps, Bob doit communiquer avec les musiciens à distance par des signaux de la main. Bob utilise donc qu'une main pour interagir avec son téléphone déformable : il déplace du pouce le bouton du curseur déformable correspondant au volume de l'instrument d'un musicien avec qui il communique par des gestes de l'autre main. Le curseur est aussi grand que la longueur de l'écran pour fournir un réglage fin du volume. Il est positionné verticalement pour recréer la disposition du curseur de la console de mixage. Le bouton de curseur tangible se déforme lui permettant le débrayage du pouce pour le repositionner dans la zone fonctionnelle confortable. Bob répète cette procédure pour chaque instrument et haut-parleur dans le lieu afin de garantir le meilleur son en direct.

Le curseur tangible déformable autorise l'interaction sans regarder le dispositif avec le pouce maintenue dans la zone confortable. Néanmoins il convient d'étudier l'impact du débrayage sur les performances, dans ce cas de pointage absolu avec un curseur tangible. Cette étude pourrait être entreprise avec un curseur graphique mais l'interaction graphique impliquant l'attention visuelle a un impact sur les performances [14]. Aussi nous explorons l'impact sur les performances du débrayage avec un curseur tangible déformable en comparaison avec (1) le pointage absolu en manipulant un curseur tangible classique qui nécessite des changements de prise en main (changement de préhension du dispositif et/ou déplacement/translation du dispositif) pour des cibles au-delà de la zone fonctionnelle du pouce (2) le pointage absolu en manipulant un curseur graphique qui nécessite l'attention visuelle et des changements de prise en main du dispositif mobile.

Pour cette étude, nous avons d'abord effectué une expérience formative comparant un curseur tangible classique avec un prototype basse-fidélité d'un curseur tangible déformable composé d'un très long bouton (plus grand que la taille d'un téléphone mobile). Cette expérience montre les avantages du débrayage du pouce en comparaison avec les changements de prise de main lors de la manipulation d'un curseur tangible classique. Ce résultat nous a amené à concevoir et expérimenter un curseur tangible déformable que nous avons comparé à un curseur tangible classique et à un curseur graphique. Cette étude est donc dédiée à la comparaison expérimentale du changement de prise en main du dispositif avec le débrayage du pouce.

2 ÉTAT DE L'ART

Comme souligné par Rosso et al. [15], de nombreuses études ont montré la préférence et la dominance de l'interaction à une main avec le pouce qui tient le dispositif mobile. Ce constat a motivé plusieurs études basées sur la zone fonctionnelle confortable du pouce (figure 2). Par exemple Karlson et al. [10] a introduit trois niveaux de difficulté perçue (facile, moyen et difficile) pour l'interaction avec le pouce. De plus plusieurs travaux visent à estimer ou prédire la zone fonctionnelle du pouce comme le modèle prédictif de Bergström-Lehtovirta & Oulasvirta [2] (figure 2).

Pour atteindre des cibles en dehors de la zone fonctionnelle du pouce, il a été observé des changements de prise en main du dispositif [4, 8, 20] qui ont pour conséquence de déplacer la zone fonctionnelle du pouce. Eardley et al. [6] ont analysé les changements de prise en main lorsque l'utilisateur doit sélectionner des boutons placés à différentes positions sur l'écran. Deux types de petits mouvements ont été observés :

- Un changement de la position des doigts sur le dos du dispositif,
- un changement d'inclinaison du dispositif au sein de la main.

Nous notons ces deux mouvements des c*hangements de préhension* du dispositif. Lorsque ces changements de préhension ne sont pas suffisants pour atteindre une cible, il a été observé un déplacement/translation du dispositif au sein de la main décrit par Hoober [8]. Nous notons ces déplacements/translations du dispositif : *débrayage de la main* pour le distinguer du débrayage du pouce.

Pour éviter ces changements de prise en main (changements de préhension et débrayages de la main), de nombreuses solutions graphiques ont été proposées et sont décrites par Rosso et al. [15]. Au contraire cet article explore l'interaction tangible. Nous étudions un curseur tangible déformable qui tout en impliquant le débrayage du pouce (figure 1) évite des changements de prise en main c'est-à-dire le débrayage de la main.

3 EXPÉRIENCE FORMATIVE : DÉBRAYAGE DU POUCE VERSUS DÉBRAYAGE DE LA MAIN

Avant de concevoir un curseur tangible déformable et de mener une expérience, nous avons conduit une première expérience formative avec un prototype basse-fidélité d'un curseur tangible déformable. Ce prototype basse-fidélité comprend un très grand bouton (150 mm de longueur) permettant à tout instant le débrayage du pouce (figure 3-b). L'expérience vise à comparer les performances du débrayage du pouce en utilisant ce prototype avec celles des changements de préhension et de débrayages de la main en utilisant un curseur tangible classique.

L'expérience intra-sujet étudie donc l'impact des trois variables suivantes :

- *Longueur* du bouton du curseur tangible : Petit (classique), Large
- *Distance* à la cible : 116mm et 217mm
- *Largeur* de la cible : 7mm, 1,6mm, 0,7mm

La variable *Longueur* considère deux valeurs (figure 3) :

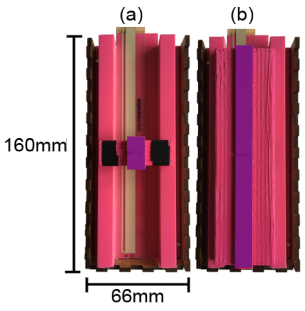

Figure 3: (a) le petit bouton (en violet) manipulé par l'utilisateur de manière absolue avec des changements de préhension et des débrayages de la main ; (b) le grand bouton (en violet) actionné par des mouvements de débrayage du pouce.

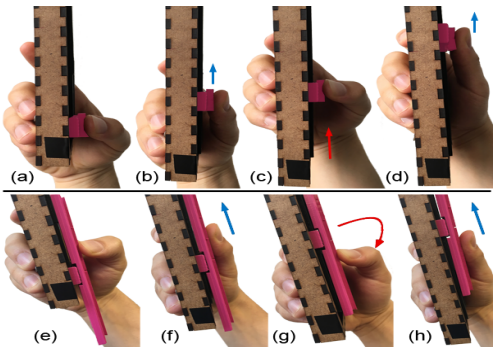

Figure 4: Haut : (a-b) Mouvement vers le haut du petit bouton (flèche bleue) avec la prise en main initiale. (c) Débrayage de la main (flèche rouge). (d) Continuation du mouvement avec la nouvelle prise en main du dispositif. Bas : (e-f) Mouvement vers le haut du grand bouton (flèche bleue) avec la prise en main initiale. (g) Débrayage du pouce (flèche rouge). (h) Continuation du mouvement sans modification de la prise en main initiale.

(1) Un petit bouton (20mm longueur × 10mm largeur × 8mm épaisseur) manipulé avec le pouce de la main qui tient le dispositif (figure 4-haut) : selon la valeur de la variable Distance, lorsque la cible est en dehors mais proche de la zone fonctionnelle, un changement de préhension est nécessaire et lorsque que la cible est loin de la zone fonctionnelle, le débrayage de la main est nécessaire (figure 4-haut).

(2) Un grand bouton (150mm longueur × 10mm largeur × 8mm épaisseur), qui constitue un prototype basse-fidélité d'un curseur déformable : l'utilisateur manipule le bouton du curseur par débrayage du pouce (figure 4-bas).

La variable Distance désigne la distance entre deux cibles consécutives affichées sur un écran distant (figure 3). En tant que première condition, la valeur de 116 mm entre les cibles consécutives à l'écran est choisie pour forcer les changements de préhension [15]. Cette distance dans l'espace moteur est égale à 90mm. Pour la deuxième condition, la valeur de 217mm a été fixée empiriquement pour forcer le débrayage de la main pour atteindre la cible [8]. Cette distance dans l'espace moteur est égale à 150mm. De plus les distances choisies correspondent aux téléphones mobiles modernes de grande taille [2].

La variable *Largeur* désigne la largeur de la cible. Trois largeurs différentes ont été choisies empiriquement afin d'analyser les performances dans le cas de mouvements précis ou grossiers : 0,7mm, 1,6mm et 7mm.

Les variables *Distance* × *Largeur* ont été complètement croisées, définissant les indices de difficulté (ID) suivants : 4,2 / 5 / 6,3 / 7/ 7,5 / 8,2, ID comme calculés dans [5]. Ces indices traduisent notre choix d'avoir des tâches aux difficultés faciles, moyennes et difficiles tout en évitant des tâches trop difficiles [18].

Compte tenu de ces conditions, nous formulons donc les trois hypothèses suivantes :

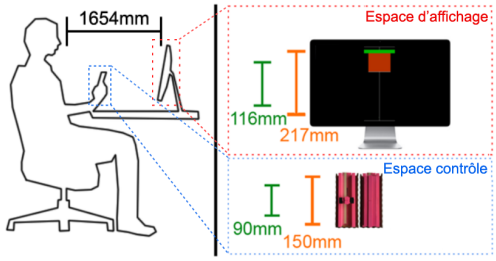

Figure 5: (Gauche) Les participants étaient assis devant l'écran, à une distance de 1654mm. (Droite) Longueurs en mm parcourues sur l'écran et avec le curseur tangible pour une distance de 116mm (en vert) et 217mm (en orange).

- H1 : pour la distance de 116mm et pour les largeurs de trois cibles : les changements de préhension nécessaires avec le petit bouton du curseur sont plus rapides que les débrayages du pouce nécessaires avec le grand bouton.
- H2 : pour la distance de 217mm et pour les largeurs de trois cibles : les débrayages du pouce (grand curseur) sont plus rapides que ceux de la main consistant à déplacer/translater le dispositif au sein de la main.
- H3 : Les débrayages du pouce avec le grand bouton offrent des meilleures performances que celles avec le petit bouton impliquant des changements de préhension et/ou des débrayages de la main dans le cas de petites cibles.

3.1 Matériel et participants

Un prototype unique a été construit avec les dimensions suivantes : 160mm (hauteur) × 66mm (largeur) × 20mm (épaisseur), définissant une épaisseur totale de 28mm avec les boutons. La longueur et la largeur étaient celles d'un smartphone moderne[2] pour s'approcher d'une prise en main communément utilisée. Le prototype a été construit en utilisant un panneau de fibres de 3mm d'épaisseur. Le curseur comprenant la glissière et les deux boutons (petit et grand) a été fabriqué avec une imprimante 3D Ultimaker 2 extended and using PLA as filament. Un potentiomètre à membrane [3] de 200mm de longueur capture les valeurs du bouton du curseur.

Pour relier le prototype au logiciel de l'expérience, le prototype est relié à une carte Arduino Mega 2560. La carte est elle-même connectée via un câble USB à un MacBook Pro de 15 pouces qui exécutait le logiciel de l'expérience. Ce logiciel affiche les tâches de pointage sur un écran Thunderbolt 27 pouces, ayant comme résolution 2560×1440, avec 109 pixels par pouce.

Dix volontaires (âgés entre 23 et 34 ans, M = 28, SD = 3,2, 8 hommes et 2 femmes) ont été recrutés sur le campus. Tous étaient droitiers et propriétaires d'un téléphone tactile. La distance moyenne entre le pouce et l'index avec la main ouverte des participants est égale à 16,8mm (SD = 1,44mm). La longueur moyenne de l'index est égale à 80mm. Ces données ont été utilisées pour vérifier que les distances proposées étaient bien en dehors de la zone fonctionnelle confortable du pouce selon le modèle prédictif proposé par Bergström-Lehtovirta & Oulasvirta [2].

2. https ://www.asus.com/Phone/ZenFone-2-Laser-ZE500KL/

3. https ://www.sparkfun.com/products/8679

3.2 Tâche expérimentale

Les participants ont effectué une tâche de pointage à distance comme le montre la figure 5. Cette tâche est habituellement étudiée (par exemple, [1, 3, 5, 16, 21]). Plus important c'est aussi une tâche couramment effectuée par les ingénieurs du son.

La tâche expérimentale (figure 6) était identique à celle présentée par Rosso et al. [15]. Elle consiste à positionner un curseur (contrôlé par l'utilisateur) à l'intérieur d'une zone cible affichée. Le curseur à l'écran avait une longueur de 232mm, définissant un gain contrôle-affichage (CD) de 1,5. Un scénario de ce type de tâches consiste à ajuster la luminosité de l'écran d'un téléviseur à distance : il s'agit d'un exemple de tâches communément effectuées de contrôle à distance d'un appareil avec un gain contrôle-affichage supérieur à 1. Le curseur de l'utilisateur est représenté par une fine ligne horizontale que l'utilisateur peut donc déplacer verticalement. Un retour visuel de la distance restante entre le curseur et la cible est affiché sous la forme d'une zone rouge le long du curseur (figure 6).

Comme lors d'études précédentes [5, 15], chaque tâche doit être terminée avec succès. Le taux d'erreur est donc nul. Les participants ont été invités à être aussi rapides que possible. La validation est faite en maintenant le curseur à l'intérieur de la cible pendant 1 seconde comme dans l'expérience décrite par Rosso et al. [15]. Evitant toute validation active, nous soustrayons cette seconde supplémentaire pour calculer le temps de déplacement lors de l'analyse. Une fois la tâche terminée avec succès, une nouvelle cible apparaît à une distance de 116mm ou 217mm de la position courante du curseur.

Pour la manipulation du grand bouton du curseur, la main des participants a été fixée avec du scotch au dos du prototype. Ceci permettait d'éviter tous mouvements de changement de préhension ou de débrayage de la main tout en laissant libre le pouce sur le devant du prototype pour des mouvements de débrayage du pouce.

Pour la manipulation du petit bouton, la distance de 217mm est supposée assez longue quelque soit la taille de la main du participant pour forcer des mouvements de débrayage de la main.

3.3 Protocole

Tout d'abord, les participants se sont entraînés avec le prototype en effectuant les tâches avec les différentes conditions (*Longueur* × *Distance* × *Largeur*). Au cours de cette formation, l'ordre de présentation des conditions a été aléatoire. Le participant informait l'expérimentateur quand il était prêt. Cet entraînement a duré en moyenne 10 minutes.

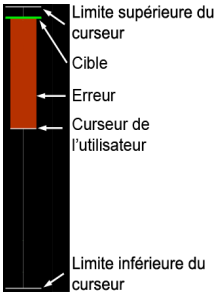

Figure 6: Capture d'écran de la tâche de pointage de l'expérience avec un curseur de 232mm / 1121px, une largeur de cible de 0,7mm / 3px et une distance de 217mm / 1048px.

Les tâches ont été effectuées dans un ordre pseudo-aléatoire dans 2 blocs : un bloc pour chaque condition de longueur de bouton du curseur. L'ordre des blocs suivait un contrebalancement par carré latin. Chaque bloc a été divisé en 6 sous-blocs représentant les combinaisons *Distance* × *Largeur*.

Les sous-blocs ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Les participants ont pu effectuer une pause après chaque sous-bloc. Pour chaque sous-bloc, 17 répétitions de la tâche de pointage ont été effectuées. La première répétition n'a pas été prise en compte dans l'analyse : ceci a permis d'éviter des résultats affectés par la position du curseur du sous-bloc précédent.

Un total de 1920 mesures du temps de déplacement a été recueilli : 10 participants × 16 répétitions × 2 longueurs de bouton × 2 distances × 3 largeurs de cible. Pour chaque *Longueur* × *Distance* × *Largeur*, nous avons recueilli 160 mesures du temps de déplacement.

L'objectif de l'étude étant de déterminer l'impact des débrayages du pouce, des changements de préhension et des débrayages de la main sur les performances, le temps de déplacement a été enregistré depuis le début de chaque tâche jusqu'à la validation dans la zone cible, en soustrayant le temps de validation d'une seconde.

De plus les positions du curseur à l'écran ont été enregistrées afin d'analyser les trajectoires de pointage des deux curseurs.

Enfin, les participants ont rempli un questionnaire SUS [13] en fin d'expérience pour recueillir l'utilisabilité perçue du curseur tangible avec un petit ou grand bouton. De plus au cours de l'expérience, les actions des participants ont été filmées, en particulier pour pouvoir étudier les changements de préhension et les débrayages de la main.

3.4 Résultats et discussion

Pour tracer le temps de déplacement selon les variables indépendantes, nous avons utilisé la moyenne géométrique car elle est la plus adaptée pour estimer le centre de la distribution [17]. Les essais ont été agrégés par participants et facteurs analysés. Un test de Shapiro-Wilk a révélé que nous ne pouvions pas assumer la normalité des données ($W = 0,8, p < 0,001$). Aussi, nous avons appliqué une transformation en vecteur de rangs [19].

Une analyse de variance (ANOVA à trois facteurs) montre que la *Distance* ($F(1, 99) = 44,9, p < 0,0001$) et *Largeur* ($F(2, 99) =$

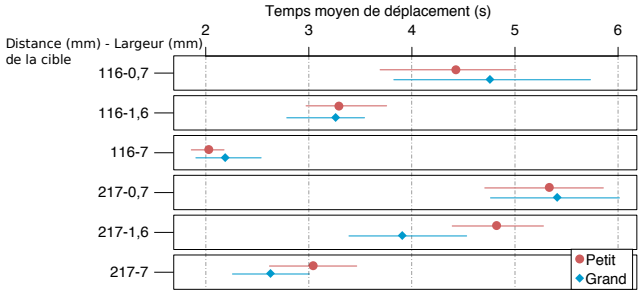

Figure 7: Temps moyen de déplacement en seconde pour les deux conditions de *Longueur* et pour les 6 conditions possibles de *Distance* × *Largeur* (axe des ordonnées). Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance à 95%.

168, $p < 0,0001$) ont un impact significatif pour le temps de déplacement. Nous avons utilisé des intervalles de confiance à 95% pour représenter ces différences significatives à la figure 7. Une interaction entre la *Longueur* du bouton et la *Distance* ($F(1,99) = 6, p < 0,05$) est aussi significative. À la lumière de cette interaction, nous avons poursuivi l'analyse des effets de la *Longueur* du bouton séparément pour chaque distance par une analyse de variance ANOVA à deux facteurs.

Les analyses de variance ANOVA ont montré que la *Largeur* a un impact significatif ($F(2,45) = 85,8, p < 0,0001$ et $F(2,45) = 86,2, p < 0,0001$) pour les conditions de *Distance* de 217mm et 116mm (figure 7). Ce résultat souligne que les conditions choisies pour la *Distance* et la *Largeur* étaient appropriées pour distinguer un ajustement fin et grossier selon la largeur de la cible.

Concernant la *Longueur* du bouton pour la *Distance* de 116mm, aucune différence significative n'a été trouvée ($F(1,45) = 1,6, p > 0,05$). Cela suggère que le changement de préhension et le débrayage du pouce offrent des performances comparables lorsque les déplacements requis sont proches de la zone fonctionnelle du pouce. Les séquences vidéo enregistrées de l'expérience montrent que les participants ont déplacé les doigts au dos du prototype avec le petit curseur. Avec le grand curseur, les débrayages du pouce sont confirmés par les trajectoires (figure 8) et observés dans les séquences vidéo.

Pour la *Distance* de 217mm, une différence significative a été trouvée pour la *Longueur* du bouton ($F(1,45) = 5,7, p < 0,05$). Le débrayage de la main prend plus de temps que celui du pouce, néanmoins il convient aussi de considérer le nombre de débrayages. Une moyenne de 2 débrayages de la main était nécessaire pour atteindre les cibles lors de l'utilisation du petit bouton : ceci est confirmé pour les conditions 217-0.7 et 217-7 dans le tracé de la trajectoire de la figure 8. Malgré l'augmentation du nombre de débrayages du pouce par rapport à la *Distance* de 116mm (+25%), le débrayage du pouce offre de meilleures performances que le débrayage de la main pour une *Largeur* de cible de 1,6mm (0,82 sec 19%) et de 7mm (0,49 secondes 17%).

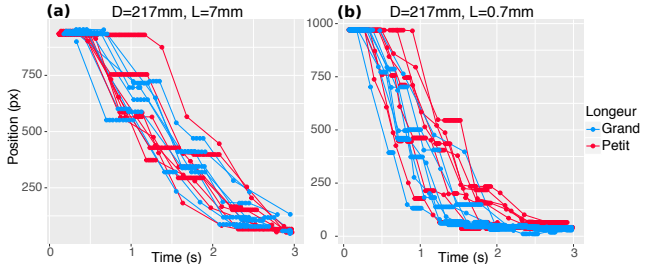

Figure 8: Pour les deux conditions de *Longueur* du bouton : trajectoires des positions du curseur dans l'espace d'affichage (axe des ordonnées) et temps de mouvement (axe des abscisses) : (a) 217-7 *Distance* × *Largeur*. (b) condition 217-0,7 *Distance* × *Largeur*. Un plateau indique un arrêt dans le mouvement du curseur (débrayage).

Les performances sont similaires pour la *Largeur* de cible de 0,7mm. Pour des tâches d'ajustement fin, nous expliquons ce résultat par le fait que les deux conditions de *Longueur* du bouton offrent des performances similaires lorsque le curseur est proche de la cible : le tracé de la trajectoire de la figure 8-b montre que la majeure partie du temps est passée entre 0px et 50px (position dans l'espace d'affichage) pour le petit et le grand bouton. En comparaison le tracé de la trajectoire de la figure 8-a pour une cible de 7mm montre qu'il était plus facile d'atteindre la cible.

Après normalisation des données comme expliquée dans [13], le score SUS est égal à 51% pour le petit bouton et 45% pour le grand bouton. Cela indique que les participants ont perçu le petit bouton comme plus utilisable. Les participants l'ont expliqué par la similitude entre l'interaction avec le petit bouton et l'interaction avec un curseur graphique. Néanmoins, les participants ont déclaré être fatigués après avoir utilisé le petit bouton. Ceci est confirmé par les séquences vidéos enregistrées : il a été observé que les participants détendaient les muscles de leur main pendant l'expérience.

En synthèse, nous retenons de cette expérience que :

- Le débrayage du pouce et le changement de préhension offrent des performances similaires dans le cas d'interaction au-delà mais proche de la zone fonctionnelle. L'hypothèse H1 n'est donc pas soutenue.
- Le débrayage du pouce offre de meilleures performances que le débrayage de la main pour des cibles qui sont loin de la zone fonctionnelle. L'hypothèse H2 est donc soutenue.
- En comparaison avec les changements de préhension ou les débrayages de la main, les débrayages du pouce offrent de meilleures performances dans le cas de petites cibles. L'hypothèse H3 est donc soutenue.
- L'interaction avec un curseur tangible provoque des changements de préhension quand la cible est proche de la zone fonctionnelle (zone en gris à la figure 9) et des débrayages de la main de type déplacement/translation du dispositif au sein de la main quand la cible est loin de la zone fonctionnelle (zone en gris clair à la figure 9). Ce constat renforce les trois niveaux de difficulté perçue (facile, moyen et difficile) pour l'interaction avec le pouce introduits par Karlson et al. [10].
- Il existe un seuil entre 1,6mm et 0,7mm de largeur de cible pour une distance de 217mm pour lequel le débrayage du pouce

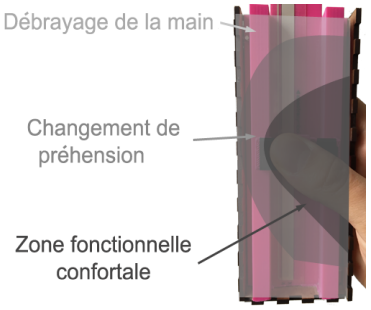

Figure 9: Zone en gris foncé : zone fonctionnelle confortable du pouce. Zone en gris clair : zone des débrayages de la main. Entre les deux zones (zone en gris) : zone des changements de préhension.

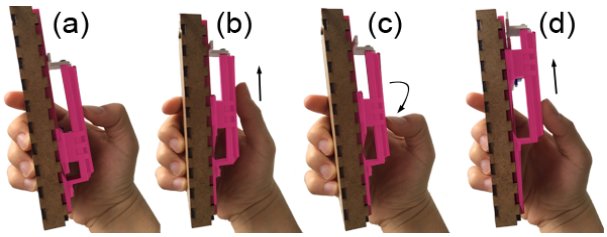

Figure 10: (a) Le bouton du curseur s'étend pour permettre l'interaction dans la zone confortable. (b) Mouvement vers le haut provoquant le déplacement vers le haut du repère du curseur et une déformation du bouton vers le bas. (c) Les débrayages du pouce sont possibles grâce à la déformation. (d) La déformation du bouton permet d'atteindre des cibles au-delà de la zone confortable sans changement de préhension.

et celui de la main offrent des performances similaires. Cela suggère que, lorsque la largeur de la cible est trop petite, les mouvements correctifs précis ont un impact plus important sur le temps que les mouvements pour se rapprocher de la cible.

4 EXPÉRIENCE AVEC UN CURSEUR TANGIBLE DÉFORMABLE

Le résultat de l'expérience précédente sur le débrayage du pouce versus de la main pour une distance de 270mm nous a motivé à concevoir un curseur tangible déformable et à le tester expérimentalement.

4.1 Conception du curseur tangible déformable

Le bouton déformable construit est constitué d'un bloc solide qui glisse dans la glissière du curseur, élargissant le bouton vers le haut et vers le bas (figure 10). Ce mécanisme nous permet de simuler la déformation du bouton du curseur. Le prototype simule donc la déformation tout en étant un prototype fonctionnel d'un curseur tangible déformable. Pour déplacer le bloc, nous avons utilisé un servomoteur à rotation continue FEETECH FS90R [4]. Un mécanisme d'engrenage transfère le mouvement de rotation du servomoteur en un mouvement bidirectionnel le long de l'axe du curseur (figure 11).

4. https ://tinyurl.com/mymmudy

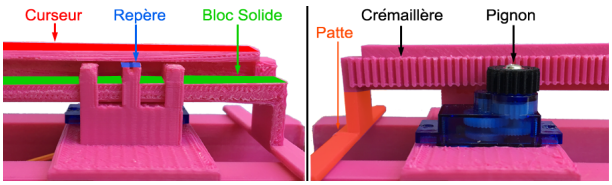

Figure 11: (Gauche) Un bloc solide glisse le long de la glissière du curseur, élargissant le bouton vers le haut et vers le bas. (Droite) Un servomoteur fait tourner un pignon/engrenage qui transforme le mouvement rotatif en translation selon l'axe de la glissière du curseur. Une patte physique (en orange) évite que le curseur ne se plie sous la pression du pouce.

En raison de l'épaisseur du servomoteur, les dimensions du bouton du curseur déformable sont : 46mm (longueur) × 54mm (largeur) × 23mm (épaisseur), donnant une épaisseur totale de 43mm. Un repère physique (figure 11) indique visuellement la position actuelle du bouton comme schématisé à la figure 1 par le trait sur le bouton. Deux pattes physiques aux deux extrémités du bouton sont ajoutées pour éviter que le curseur ne se plie sous la pression du pouce (figure 11).

4.2 Expérience comparative : variables indépendantes

Nous avons mené une expérience intra-sujet pour comparer le curseur tangible déformable conçu avec un curseur tangible classique et un curseur graphique. Selon les résultats de l'expérience précédente :

(1) La distance entre les cibles retenue est de 270mm.

(2) Un seuil de précision en terme de largeurs de cible entre 0,7mm et 1,6mm a été observé et est étudié dans cette expérience.

L'expérience étudie donc l'impact des deux variables suivantes :
- *Curseur* : non déformable, déformable et graphique
- *Largeur* de la cible : 0,9mm, 1,1mm et 1,4mm

La variable *Curseur* se compose de trois conditions :

(1) Un curseur tangible non déformable (figure 12-a) permet aux participants de manipuler le curseur de manière absolue, par débrayage de la main. Cette condition est similaire à la condition du petit bouton de l'expérience précédente.

(2) Un curseur tangible déformable (figure 12-b) permet par débrayage du pouce (figure 10) d'accéder à toutes les valeurs avec une prise en main du dispositif confortable et stable. Cette condition est similaire à la condition du grand bouton de l'expérience précédente mais avec le curseur tangible déformable que nous avons construit.

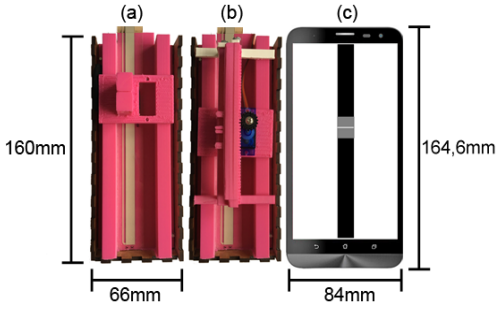

Figure 12: (a) Le curseur non déformable se comporte comme un curseur tangible classique. (b) Le curseur déformable permet le débrayage du pouce pour le maintenir dans la zone fonctionnelle confortable. (c) Le curseur graphique permet le pointage absolu comme le curseur non déformable.

(3) Un curseur graphique (figure 12-c) a été utilisé comme base de référence afin de comparer le curseur tangible déformable à la solution actuelle.

La variable *Largeur* représente la largeur de la cible. Afin d'analyser plus avant le seuil de précision constaté dans l'expérience précédente, trois largeurs différentes sont choisies entre 0,7mm / 3 px et 1,6mm / 7 px : 0,9mm, 1,1mm et 1,4mm.

4.3 Matériel et participants

Le bouton du curseur tangible non déformable a les mêmes dimensions en terme de largeur (54mm) et d'épaisseur (23mm) que celui du curseur tangible déformable conçu. Sa longueur est égale à 34mm. Il est composé de la base du servomoteur du curseur déformable, sans tous les composants déformables (figure 12-a).

Pour relier les deux curseurs tangibles déformables et non déformables au logiciel de l'expérience, nous avons réutilisé la solution de l'expérience précédente via une carte Arduino Mega 2560.

Pour le curseur graphique, un smartphone ASUS Zenfone 2 ZE601KL (écran de 6 pouces) a été utilisé. Les dimensions du téléphone impliquent des débrayages de la main pour atteindre les bords supérieurs et inférieurs de l'écran. Le bouton du curseur graphique a les mêmes dimensions que le bouton du curseur non déformable (figure 12-c). Le code a été développé en langage Java avec la boîte à outils pour Android de l'environnement Processing. Le curseur graphique communique les valeurs au logiciel de l'expérience par une connexion WiFi local.

Douze volontaires (âgés entre 23 et 34 ans, M = 28, SD = 3, 8 hommes et 3 femmes) ont été recrutés sur le campus. Aucun d'eux n'avait participé à l'expérience précédente. Tous étaient droitiers et propriétaires d'un téléphone tactile.

4.4 Tâche et procédure

Pour cette expérience, les participants ont effectué la même tâche que celle de l'expérience précédente (figure 5). Lors de la manipulation du curseur tangible déformable, la main des participants a été fixée avec du scotch au dos du prototype. Ceci permettait d'éviter des mouvements de débrayage de la main tout en laissant libre le pouce sur le devant du prototype pour des mouvements de débrayage du pouce.

Tout d'abord, les participants se sont entraînés en effectuant les tâches avec les différentes conditions (*Curseur* × *Largeur*). Au cours de cette formation, l'ordre de présentation des conditions a été aléatoire. Le participant informait l'expérimentateur quand il était prêt. Cet entraînement a duré en moyenne 8 minutes.

Les tâches ont été réalisées selon 3 blocs : un bloc pour chaque condition *Curseur*. L'ordre des blocs suivait un contrebalancement par carré latin. Chaque bloc a été divisé en 3 sous-blocs représentant les trois conditions *Largeur*. Les sous-blocs ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Les participants ont pu effectuer une pause après chaque sous-bloc. Pour chaque sous-bloc, 17 répétitions de la tâche de pointage ont été effectuées. La première répétition n'a pas été prise en compte dans l'analyse comme lors de l'expérience précédente.

Au total, 1728 mesures du temps de déplacement ont été collectées, par 12 participants × 16 répétitions × 3 curseurs × 3 largeurs de cible. Pour chaque *Curseur* × *Largeur*, nous avons recueilli 192 mesures du temps de déplacement.

Au cours de l'expérience, les actions des participants ont été filmées pour étudier les débrayages de la main. Les participants ont rempli un questionnaire SUS [13] en fin d'expérience pour recueillir l'utilisabilité perçue des trois curseurs.

4.5 Résultats

Comme dans l'expérience précédente, nous avons utilisé la moyenne géométrique pour tracer le temps de déplacement selon nos variables indépendantes. Les essais ont été agrégés par participants et facteurs analysés. Un test de Shapiro-Wilk a révélé que nous ne pouvions pas assumer la normalité des données ($W = 0,8, p < 0,001$). Ainsi, nous avons appliqué une transformation en vecteur de rangs [19].

Une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (*Curseur* et *Largeur*) sur le temps de déplacement montre un effet significatif principal sur le facteur *Curseur* ($F(2, 88) = 3,3, p < 0,05$). Nous avons utilisé des intervalles de confiance à 95% pour représenter ces différences significatives à la figure 13. Un test post-hoc de Tukey révèle une différence significative entre le curseur non déformable et le curseur graphique ($t(88) = 2,5, p < 0,05$,de Cohen $d = 0,42$). Bien qu'aucune différence significative n'ait été trouvée entre le curseur déformable et le curseur graphique, les résultats montrent que le curseur graphique est en moyenne $0,13s$ plus rapide. Nous expliquons les bonnes performances du curseur graphique par le fait que le dispositif était beaucoup plus fin (8mm contre 43mm pour les curseurs tangibles).

L'épaisseur du dispositif a un impact sur la taille de la zone fonctionnelle. Plus le dispositif est épais, plus la zone fonctionnelle est réduite en raison de la limitation des mouvements du pouce [2, 11]. Par conséquent, les participants ont effectué moins de débrayage à la main avec le curseur graphique qu'avec le curseur non déformable. La figure 15 (a-b) montre comment le curseur graphique permet d'effectuer des changements de préhension même avec une grande distance (217mm). Ce type de changements de prise en main n'avait pas été observé pour une grande distance lors de la première expérience avec un curseur tangible plus épais. Ce constat diminue donc le nombre de débrayages de la main. Les débrayages de la main ont néanmoins été observés mais pour des mouvements descendants (figure 15-c). Ceci est confirmé par les trajectoires du

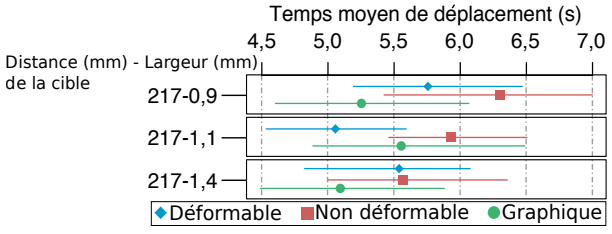

Figure 13: Temps moyen de déplacement en seconde pour les trois conditions du *Curseur* et pour les 3 conditions de *Largeur* (axe des ordonnées). Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance à 95%.

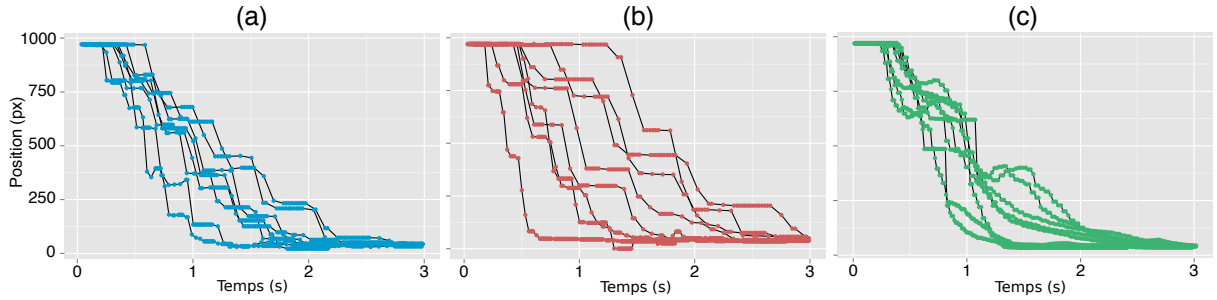

Figure 14: Pour les trois conditions du *Curseur* : trajectoires des positions du curseur dans l'espace d'affichage (axe des ordonnées) et temps de mouvement (axe des abscisses) (a) Déformable (b) Non déformable (c) Graphique. Un plateau indique un arrêt dans le mouvement du bouton du curseur (débrayage).

curseur de la figure 14 : la trajectoire du curseur non déformable (figure 14-b) inclut des débrayages de la main autour des positions 750px, 370px et 125px, tandis que, pour le curseur graphique (figure 14-c), les débrayages de la main sont présents uniquement autour de la position 620px.

De plus, la surface lisse du curseur graphique permet des mouvements précis avec le pouce car ils ne nécessitent aucune force initiale. En comparaison, les curseurs tangibles nécessitent d'appliquer une force initiale pour commencer un mouvement. La différence de pentes des trajectoires de la figure 14 suggère qu'il est plus facile d'accélérer / décélérer avec le curseur graphique. Cette assertion est appuyée par une différence significative ($\chi^2 = 120,09, p < 0,001$) trouvée entre les trois conditions de Curseur pour les points de trajectoire entre 50px et 200px de l'axe vertical (figure 15). Ceci est particulièrement important dans la zone proche de la cible comme le montrent les pentes des trajectoires après une seconde de la figure 14. Enfin, les participants étaient habitués à l'interaction tactile, alors qu'ils découvraient l'interaction avec un curseur tangible à une main.

Comme il n'y a pas de différence significative entre le curseur non déformable et le curseur déformable ($t(88) = 0,7, p > 0,05$,de Cohen $d = 0,12$) nous les comparons selon le temps moyen de déplacement. D'une part, pour le curseur non déformable, le temps augmente avec la précision requise c'est-à-dire des tailles de cibles plus petites (figure 13). Ce comportement est conforme aux résultats de l'expérience précédente. D'autre part, pour le curseur déformable, ce comportement est aussi observé entre les tailles de cibles 1,1mm et 0,9mm (figure 14). Pour ces deux conditions, le curseur déformable est plus rapide que le curseur non déformable (+0, 90s et +0, 49s respectivement) et que le curseur graphique (+0, 56s pour la condition 1.1mm seulement). Pour la condition de largeur de cible de 1,4mm, les performances de temps des curseurs déformables et non déformables sont similaires. Cela suggère qu'un curseur déformable améliore les performances pour des cibles très petites (<1,4mm) et offre des performances similaires à un curseur non déformable par pointage absolu pour des cibles plus larges.

Pour les deux curseurs tangibles, nous notons des temps plus élevés (+0, 3s en moyenne) que pour les deux curseurs tangibles de l'expérience précédente pour la plus petite taille de cible qui était 0,7mm. Nous expliquons cette différence par l'épaisseur des curseurs tangibles, plus épais dans cette expérience que dans la précédente (respectivement 43mm et 28mm). Ceci est confirmé par le fait que : (1) le nombre de débrayages du pouce pour le curseur déformable de cette expérience est supérieur à celui de l'expérience précédente (figure 16) ; et (2) le nombre de débrayages de la main pour le curseur non déformable de cette expérience est supérieur à celui de l'expérience précédente (figure 17).

Après normalisation des données [13], le score SUS est égal à 46% pour le curseur non déformable et 49% pour le curseur graphique. Cela indique que les participants ont perçu le curseur graphique comme le plus utilisable. Nous nous attendions à cette préférence car tous les participants utilisaient quotidiennement des téléphones tactiles. Néanmoins, les participants ont signalé une fatigue de la

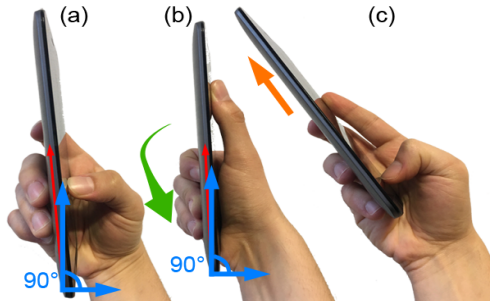

Figure 15: La ne épaisseur du Curseur graphique permet (b) des changements de préhension même avec une grande distance et (c) des débrayages de la main.

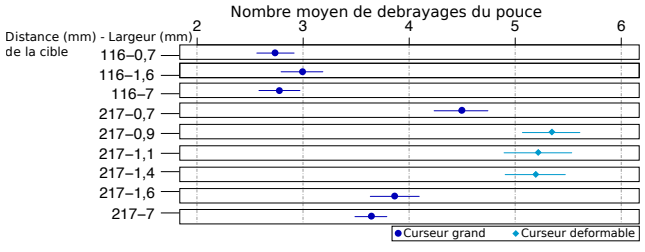

Figure 16: Nombre moyen de débrayages du pouce pour la condition *grand bouton* du curseur de l'expérience 1 et pour le *curseur déformable* de l'expérience 2. Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance à 95%.

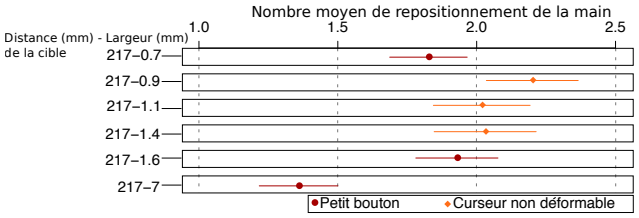

Figure 17: Nombre moyen de débrayages de la main pour la condition *petit bouton* du curseur de l'expérience 1 et pour le *curseur non déformable* de l'expérience 2. Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance à 95%.

main uniquement pour le curseur non déformable et le curseur graphique. Enfin, plusieurs participants ont commenté spontanément le curseur déformable en précisant qu'ils ont compris le mécanisme de bouton déformable sous-jacent afin de permettre le débrayage du pouce.

En synthèse, le curseur tangible déformable n'a pas montré de différence significative de performance par rapport aux curseurs graphique et tangible non déformable pour les largeurs proposées. Nous pensons que l'épaisseur des prototypes des curseurs tangibles a eu une incidence sur les performances et leur utilisabilité. Bien que le curseur graphique ait été plus rapide en moyenne, les participants se sont plaints de la fatigue engendrée par les changements de préhension et les débrayages de la main.

Le curseur tangible déformable offre les avantages d'une interaction sans regarder le dispositif et d'une prise de main confortable et sûre.

Il convient d'affiner la conception du curseur tangible déformable pour le rendre plus mince puisque les deux expériences ont souligné l'impact de l'épaisseur sur les mouvements du pouce et de la main. Cela nous permettra de conclure sur le seuil de précision en terme de largeurs de cible que nous avons observé dans la première expérience. La fatigue rapportée par les participants est un aspect important qu'il convient d'analyser plus en détail.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un curseur tangible déformable sur dispositifs mobiles pour une interaction sans regarder le dispositif avec le pouce de la main qui tient le dispositif.

(1) La tangibilité du curseur déformable permet une interaction sans regarder le dispositif ;

(2) Le bouton du curseur tangible se déforme pour que le pouce par débrayage manipule toujours le bouton dans la zone d'action facilement atteignable. Toutes les valeurs du curseur sont alors à portée du pouce avec une prise en main stable du dispositif mobile.

Nous avons exploré les performances d'un curseur tangible déformable en construisant deux prototypes Notre premier prototype basse-fidélité - un curseur tangible avec un bouton très long - nous a permis de mieux comprendre la manipulation et la performance d'un curseur déformable par rapport à un curseur classique tangible. Nous avons observé deux types de changements de prise en main lors de l'interaction avec un curseur tangible classique : changement de préhension et débrayage de la main (déplacement/translation du dispositif au sein de la main). Cela suggère deux niveaux de difficulté en dehors de la zone fonctionnelle confortable du pouce. Les résultats montrent que le débrayage du pouce nécessaire avec le curseur tangible déformable offre de meilleures performances que le débrayage de la main avec un curseur tangible classique pour des cibles qui sont éloignées de la zone fonctionnelle confortable.

Notre deuxième prototype est une première démonstration - implémentation d'un curseur tangible avec un bouton déformable en simulant la déformation du bouton. Les résultats de l'expérience ne montrent aucune différence significative de performance entre les curseurs déformables, non déformables et graphiques. En moyenne les participants étaient néanmoins plus rapides avec le curseur graphique mais le curseur tangible déformable autorise l'interaction sans regarder le dispositif, avec une prise en main confortable et stable du dispositif.

Les résultats mettent en évidence des atouts d'un curseur tangible déformable pour l'interaction sur dispositifs mobiles mais il convient maintenant d'affiner la conception du prototype en particulier en réduisant son épaisseur. Ces travaux se situent dans le contexte d'interfaces déformables pour dispositifs mobiles : en anticipant que les dispositifs mobiles pourront faire émerger de leurs écrans des contrôleurs physiques dynamiquement comme un bouton ou un curseur, nos travaux constituent une première étude sur la déformation du contrôleur lui-même pour s'adapter aux contraintes de l'interaction mobile.

6 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 ://ami-qual4home.inria.fr/fr/tools/cl/) - MSTIC (http ://fabmstic.liglab.fr/)

RÉFÉRENCES

[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 Bergström-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] Géry Casiez, Daniel Vogel, Ravin Balakrishnan, and Andy Cockburn. 2008. The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks. *HumanComputer Interaction* 23, 3 (2008), 215–250. DOI : http://dx.doi.org/10.1080/07370020802278163 arXiv:http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07370020802278163

[4] Youli Chang, Sehi L'Yi, Kyle Koh, and Jinwook Seo. 2015. Understanding Users' Touch Behavior on Large Mobile Touch-Screens and Assisted Targeting by Tilting Gesture. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 1499–1508. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702425

[5] Céline Coutrix and Cédric Masclet. 2015. Shape-Change for Zoomable TUIs : Opportunities and Limits of a Resizable Slider. In *HumanComputer 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

[6] Rachel Eardley, Steve Gill, Anne Roudaut, Stephen Thompson, and Joanna Hare. 2016. Investigating How the Hand Interacts with Different Mobile Phones. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct (MobileHCI '16)*. ACM, New York, NY, USA, 698–705. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/2957265.2961840

[7] 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

[8] Steven Hoober. 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.

[9] 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

[10] 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

[11] Huy Viet Le, Patrick Bader, Thomas Kosch, and Niels Henze. 2016. Investigating Screen Shifting Techniques to Improve One-Handed Smartphone Usage. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction (NordiCHI '16)*. ACM, New York, NY, USA, Article 27, 10 pages. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/2971485.2971562

[12] Mathieu Nancel, Daniel Vogel, and Edward Lank. 2015. Clutching Is Not (Necessarily) the Enemy. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 4199–4202. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702134

[13] U.S. Department of Health and Human Services. 2015. System Usability Scale (SUS). https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html. (2015). Accessed : 15-05-2017.

[14] 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

[15] Juan Rosso, Céline Coutrix, Matt Jones, and Laurence Nigay. 2016. Impact of Mobile Tangible Slider Design and Its Reachability on Pointing Performance. In *Actes de la 28ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '16)*. ACM, New York, NY, USA, 70–78. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/3004107.3004123

[16] 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

[17] Jeff Sauro and James R. Lewis. 2010. Average Task Times in Usability Tests : What to Report ?. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*. ACM, New York, NY, USA, 2347–2350. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/1753326.1753679

[18] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. 2004. Towards a Standard for Pointing Device Evaluation, Perspectives on 27 Years of Fitts' Law Research in HCI. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 61, 6 (Dec. 2004), 751–789. DOI : http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.001

[19] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. 2011. The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only Anova Procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)*. ACM, New York, NY, USA, 143–146. DOI : http://dx.doi.org/10.1145/1978942.1978963

[20] Jinghong Xiong and Satoshi Muraki. 2016. Thumb performance of elderly users on smartphone touchscreen. *SpringerPlus* 5, 1 (2016), 1218. DOI : http://dx.doi.org/10.1186/s40064-016-2877-y

[21] 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