



**HAL**  
open science

## L'étude des différences de performance d'utilisateurs âgés par une analyse biomécanique du mouvement : postures du poignet lors de l'interaction tactile

Lilian Genaro Motti, Nadine Vigouroux, Philippe Gorce

### ► To cite this version:

Lilian Genaro Motti, Nadine Vigouroux, Philippe Gorce. L'étude des différences de performance d'utilisateurs âgés par une analyse biomécanique du mouvement : postures du poignet lors de l'interaction tactile. 29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, AFIHM, Aug 2017, Poitiers, France. 10 p., 10.1145/3132129.3132142 . hal-01578628

**HAL Id: hal-01578628**

**<https://hal.science/hal-01578628>**

Submitted on 29 Aug 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'étude des différences de performance d'utilisateurs âgés par une analyse biomécanique du mouvement : postures du poignet lors de l'interaction tactile

## *The Study of the Differences in Performances of Older Aged Users through the Biomechanical Analysis of their Movements: Postures of Users' Wrist during Tactile Interaction*

Lilian Genaro Motti Ader  
IRIT – Université de Toulouse  
118 Route de Narbonne  
31062 Toulouse, France  
genaro@irit.fr

Nadine Vigouroux  
IRIT – Université de Toulouse  
118 Route de Narbonne  
31062 Toulouse, France  
vigourou@irit.fr

Philippe Gorce  
Handibio – Université de Toulon  
Avenue de l'université  
83957 Toulon, France  
gorce@univ-tln.fr

### ABSTRACT

It is necessary to understand the difficulties older aged users find for executing the gestures of tactile interaction in order to avoid their digital exclusion. We have studied the differences in performances between older and younger adult users through a biomechanical analysis of their movements. In this paper, we present the analysis of the postures of the users' wrist during interaction with their fingers on a tablet, horizontally placed on a desk. Results show a greater angular amplitude for older participants which could explain the longer times and the increased number of errors for this group of users. The main contribution of our study is to bring new perspectives for the design and evaluation of interaction with touchscreen.

### CCS CONCEPTS

• CCS → **Human-centered computing** → **Human computer interaction (HCI)** → **HCI design and evaluation methods** → *Laboratory experiments*

### KEYWORDS

Movement analysis, touchscreen, tactile interaction, elderly persons, wrist articulation.

### RÉSUMÉ

Il est nécessaire de comprendre les difficultés que les utilisateurs âgés rencontrent lors de l'exécution des gestes

d'interaction tactile afin d'éviter leur exclusion numérique. Nous avons réalisé une étude sur les différences de performance entre utilisateurs âgés et plus jeunes par une analyse biomécanique du mouvement. Dans le présent article, nous présentons l'analyse des postures du poignet des utilisateurs lors de l'interaction avec leurs doigts sur une tablette tactile, horizontalement placée sur une table. Les résultats montrent une plus grande amplitude angulaire chez les participants âgés, ce qui peut expliquer le temps plus long et le plus grand nombre d'erreurs pour ce groupe d'utilisateurs. La principale contribution de notre étude est d'ouvrir des nouvelles perspectives pour le design et l'évaluation de l'interaction avec des écrans tactiles.

### MOTS-CLEFS

Analyse du mouvement, écran tactile, interaction tactile, personnes âgées, articulation du poignet.

## 1 INTRODUCTION

Avec l'émergence des dispositifs équipés d'écrans tactiles, il est nécessaire de comprendre les difficultés que les utilisateurs âgés peuvent rencontrer pour exécuter les gestes d'interaction. Une nouvelle approche est d'étudier les performances des utilisateurs par une analyse biomécanique de leurs mouvements. L'analyse des postures et positions des corps des utilisateurs révèle les stratégies que les utilisateurs adoptent pour exécuter les gestes et accomplir des tâches d'interaction avec ces technologies [6, 11, 19]. Ainsi des précédentes études ont montré qu'il est possible d'étudier comment les caractéristiques des mouvements des utilisateurs peuvent avoir des conséquences sur leurs performances d'interaction, en fonction des différentes situations d'utilisation des dispositifs équipés d'écrans tactiles [1, 8].

Nous avons fait une analyse de l'état de l'art sur les études du mouvement des utilisateurs lors de l'interaction avec des écrans tactiles. Nous en avons déduit que l'évaluation conjointe des performances et des mouvements des

---

© ACM, 2017. This is the author's version of the work. It is posted here by permission of ACM for your personal use. Not for redistribution.  
The definitive version was published in Actes de la 29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'17, August 28–September 1, 2017, Poitiers, France  
<https://doi.org/10.1145/3132129.3132142>

utilisateurs âgés restait à faire. Comprendre les différences entre les utilisateurs lors de l'exécution des gestes d'interaction peut aider des designers à proposer des interfaces adaptées et apporter des solutions pour améliorer l'ergonomie des dispositifs tactiles. Avec le vieillissement de la population, cela est particulièrement important pour améliorer l'interaction pour des personnes âgées en évitant ainsi leur exclusion numérique.

Pour cette raison, nous avons réalisé une étude associant l'analyse des mouvements avec l'analyse des données d'interaction enregistrées par le système interactif. Notre principal objectif est d'expliquer les différences de performances d'interaction entre adultes âgés et plus jeunes. La principale contribution de notre étude est d'avoir identifié des différences dans les caractéristiques des mouvements du poignet entre ces deux groupes d'utilisateurs. Les résultats de notre étude ouvrent des nouvelles perspectives pour l'évaluation de l'ergonomie de l'interaction avec des dispositifs tactiles.

L'ensemble de cet article est organisé de la façon suivante. Tout d'abord, l'analyse de l'état de l'art nous a permis de déterminer les spécifications de notre protocole expérimental. Ensuite, nous décrivons l'expérience, l'analyse des données et les résultats obtenus. Enfin, nous discutons l'utilisabilité de l'interaction tactile d'un point de vue ergonomique et les défis de la mise en place en conclusion de cette expérience multidisciplinaire.

## 2 ÉTAT DE L'ART

Nous avons inventorié l'état de l'art sur l'analyse du mouvement de l'interaction tactile afin d'identifier la configuration des expériences et les méthodes qui ont été appliquées. Parmi les études publiées, nous en avons sélectionné treize évaluant les postures et les mouvements d'utilisateurs adultes durant l'utilisation d'écrans tactiles [1, 4–9, 11, 13–15, 18, 19]. Ces études sont parues entre 2011 et 2017 dans des journaux et conférences dans les domaines de l'Ergonomie, de la Modélisation du mouvement humain, de l'Accessibilité et de l'Interaction Homme-Machine (IHM).

Les personnes âgées sont un groupe d'utilisateurs très hétérogène. Les changements liés au vieillissement humain sur les habiletés cognitives, motrices et sensorielles sont variables d'une personne à une autre [2]. D'autres facteurs comme l'éducation, le métier et l'expérience préalable avec l'usage d'ordinateurs et téléphones portables peuvent aussi influencer les attitudes des utilisateurs envers les nouvelles technologies [10]. Des études en IHM envisagent de fournir des informations et directives pour aider les designers à répondre à la diversité des capacités et difficultés des utilisateurs. Par contre, recruter les participants âgés peut présenter des difficultés comme le déplacement jusqu'au laboratoire, la durée de l'expérience et l'accessibilité de la tâche [2]. Dans la présente étude, nous nous sommes efforcés de faciliter la participation des adultes plus âgés.

L'objectif de cet état de l'art a été de définir l'équipement et la configuration de l'expérience pour l'étude des mouvements des utilisateurs âgés durant une tâche d'interaction avec un écran tactile. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux critères

appliqués pour la mise en place de protocoles expérimentaux des études sélectionnées, plus particulièrement en ce qui concerne :

- les caractéristiques des participants ;
- l'équipement utilisé pour l'enregistrement du mouvement ;
- la configuration de l'expérience et les dispositifs utilisés.

### 2.1 Caractéristiques des participants

Parmi les études sélectionnées, dix études avaient des participants adultes sans aucune difficulté motrice ou trouble musculo-squelettique qui pouvait perturber l'interaction avec les écrans tactiles. Les trois autres études ont évalué les mouvements de participants avec des déficiences affectant le contrôle moteur des membres supérieurs (ex. Infirmité motrice cérébrale, Sclérose multiple, maladie de Parkinson) [4, 5, 13]. Nous n'avons pas trouvé d'étude analysant les mouvements de personnes âgées durant l'interaction avec des écrans tactiles.

Dans le cas des études en biomécanique, l'homogénéité des caractéristiques des participants a pour objectif de faciliter le choix des indices biomécaniques (ex. les angles articulaires). Parmi les études analysées, deux auteurs ont mesuré et reporté les tailles et poids des participants [14] ; trois autres ont indiqué la taille des mains [11, 18, 19] et pour une d'entre elles, cela a été aussi un critère d'inclusion [11]. En effet, des utilisateurs avec de morphologies différentes adoptent des stratégies de mouvements différentes et cela a un impact sur leur confort en fonction de la situation d'utilisation de technologies [12]. Un groupe homogène de participants permet aux auteurs d'évaluer les angles articulaires en utilisant une même configuration pour tous les participants. En plus, il est possible de classifier des groupes d'utilisateurs par les caractéristiques de leurs mouvements, en comparant par exemple les stratégies de mobilisation des articulations des membres supérieurs [7].

D'un autre côté, dans les études en IHM, l'homogénéité des profils utilisateur (ex. tranches d'âge, difficultés motrices, utilisateurs experts ou novices) permet d'identifier des besoins spécifiques pour certains groupes d'utilisateurs. Avoir de l'expérience préalable avec des technologies était un critère d'inclusion dans les études analysées pour cet état de l'art. Quatre études avaient recruté des participants experts pour les tâches de saisie de texte [8, 9, 14, 15]. Trois études ont demandé à leurs participants leur expérience préalable d'utilisation d'écrans tactiles : deux ont recruté des personnes familières de ce type de technologie [18, 19] et une a recruté des novices [11]. Pour des études sur des personnes, prendre en compte leurs différents profils utilisateur peut être utile en vue d'expliquer la variabilité des performances.

### 2.1 Équipement utilisé pour l'enregistrement des mouvements

Le Tableau 1 recense l'équipement utilisé pour l'enregistrement des mouvements des utilisateurs et les parties du corps impliquées dans l'exécution des gestes d'interaction avec les écrans tactiles.

**Tableau 1: Équipement pour le suivi du mouvement**

Type d'équipement	Mesures et parties du corps
Suivi de mouvement ( <i>motion capture</i> )	Postures des mains, poignets, avant-bras, bras, tronc et tête [6, 7, 18, 19] ou corps entier [1]
Electromyographie (EMG)	Activité musculaire des doigts, mains, avant-bras, bras, nuque [8, 9, 11, 14, 15, 19]
Electrogoniomètre	Angles articulaires des poignets et coudes [15, 19]
Plateforme de force	Force, orientation et pression de l'appui manuel [4, 5, 13]

L'équipement utilisé pour le suivi et l'enregistrement des mouvements est souvent volumineux et requiert un environnement contrôlé, comme dans un laboratoire en université, afin d'éviter des bruits ou interférences dans le signal enregistré. Cependant, ces équipements ont l'avantage d'être non-invasifs. Pour le suivi du mouvement, des marqueurs ou des capteurs doivent être attachés ou placés sur la peau ou sur des vêtements proches du corps des participants.

Afin de mesurer l'inconfort et d'identifier des risques de développement de troubles musculo-squelettiques, des équipements d'enregistrement d'activité musculaire ou angles articulaires ont été utilisés. Contrairement aux équipements de suivi de mouvement, l'électromyographe ou le goniomètre peuvent gêner l'exécution des mouvements durant une tâche d'interaction.

Les plateformes de mesure de la force mise en œuvre par les utilisateurs sont connectées sur les dispositifs et généralement n'affectent pas leurs mouvements. Cet équipement peut être employé pour estimer la force et l'orientation du mouvement à partir de la pression exercée sur le dispositif mais ne donne pas des informations sur les postures et positions des utilisateurs.

Les équipements de suivi de mouvement permettent de repérer, en plus des postures de l'utilisateur, la position et son déplacement autour des dispositifs tactiles, dans les différentes configurations d'utilisation [1].

## 2.2 Configuration des études et dispositifs avec écran tactile

Les dispositifs avec écran tactile ont des tailles variées et peuvent être utilisés dans différentes configurations. Le Tableau 2 recense les tailles d'écran des dispositifs utilisés et leur configuration d'utilisation. Certaines études comparent les mouvements d'interaction des utilisateurs sur différentes tailles d'écran en positions et orientations différentes [1, 6, 7, 11, 18, 19]. D'autres comparent l'interaction sur des écrans tactiles avec l'utilisation d'autres équipements, comme claviers et ordinateurs portables [4, 8].

**Tableau 2: Tailles d'écran des dispositifs utilisés et configuration des études**

Taille de l'écran	Configuration de l'étude
Grand (15 pouces ou plus) (ex. <i>tabletop</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixe en position verticale* (kiosque) [1, 4, 5, 13, 14]</li> <li>• Fixe en position horizontale [8, 9]</li> </ul>
Moyen (6 à 12 pouces) (ex. <i>tablette tactile</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixe en position verticale* (avec support) [18, 19]</li> <li>• Fixe en position horizontale [6, 7, 9, 15, 18]</li> <li>• Porté à la main [1, 11]</li> </ul>
Petit (3 à 6 pouces) (ex. <i>smartphone</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixe en position horizontale [6, 7]</li> <li>• Porté à la main [1, 11]</li> </ul>

\* Angle d'inclinaison égal ou supérieur à 60°

Parmi les études sélectionnées, six enregistreraient les données des interactions sur l'écran pour évaluer les performances des utilisateurs [1, 5, 6, 8, 13, 15]. Les autres reportent seulement les données de mouvement. En effet, toutes les études montrent que les utilisateurs adaptent leurs mouvements selon la configuration et la position de l'écran tactile.

Quatre études ont évalué les effets de la configuration de l'usage des dispositifs tactiles non seulement sur les mouvements des utilisateurs mais également sur leurs conséquences sur les performances des utilisateurs. Les facteurs qui ont un effet sur le temps et la précision des gestes d'interaction selon les études analysées sont : la présentation de l'interface graphique (ex. la taille des boutons) [1, 9], les caractéristiques des dispositifs (ex. la taille de l'écran) [1, 11], les techniques d'interaction (au doigt ou avec un stylet) [11] ainsi que la configuration de l'usage (ex. dispositif porté à la main ou placé sur une table) [11, 15].

Concernant le confort d'utilisation, Shin et Zhu (2011) ont montré que l'utilisation de dispositifs équipés d'écran tactile en position verticale demande une activité musculaire plus importante des membres supérieurs comparée à l'utilisation de périphériques d'entrée traditionnels comme un clavier ou une souris [14]. Utiliser une tablette tactile en position verticale ou inclinée requiert de l'utilisateur une plus grande extension du poignet afin d'éviter les touches accidentelles sur l'écran [19]. En conséquence, il y a un plus grand risque d'inconfort ou de trouble musculo-squelettiques à la suite d'un temps prolongé d'utilisation de l'interaction tactile dans cette configuration.

## 2.3 Bilan

L'état de l'art nous incite à affirmer que l'analyse du mouvement de l'interaction tactile restait à faire pour expliquer les différences de performances entre les utilisateurs âgés et les plus jeunes, en fonction des configurations d'utilisation des dispositifs tactiles.

Le poignet est une articulation très impliquée dans la réalisation de tâches d'interaction sur écran tactile [6, 19]. Dans notre étude, l'articulation du poignet est définie comme un indicateur des postures et positions des membres supérieurs des utilisateurs. Un défi est d'enregistrer les postures et les mouvements du poignet sans gêner pour la réalisation des gestes d'interaction ; pour cette raison, nous

avons choisi d'utiliser un système de suivi de mouvement car il permet d'estimer les angles articulaires à partir des repères anatomiques et de la position du dispositif afin d'identifier des postures contraignantes ou un risque d'inconfort.

Dans notre étude, afin d'éviter l'inconfort pour l'utilisateur, nous avons choisi de positionner le dispositif avec l'écran tactile horizontalement sur la table. Cela permet, dans un premier temps, de comparer les mouvements du poignet entre les utilisateurs âgés et les adultes plus jeunes. Ensuite, d'autres situations d'utilisation d'écrans tactiles devront être considérées et les résultats de leurs évaluations pourront alors être comparés à l'utilisation d'écrans tactiles en position horizontale.

### 3 MÉTHODES

Suite à l'analyse de l'état de l'art, nous avons conduit une expérience où les mouvements de l'utilisateur étaient enregistrés en même temps que leurs performances d'interaction. L'objectif de cette étude est de comparer et de comprendre les différences entre un groupe de participants âgés et un groupe de participants adultes plus jeunes.

#### 3.1 L'expérience

Trente personnes ont été recrutées pour cette étude : quinze adultes âgés entre 65 et 84 ans – groupe des aînés (âge moyen 73 ans), et quinze adultes plus jeunes, âgés entre 18 et 45 ans – groupe des adultes (âge moyen 30).

Suite à l'observation de l'interaction durant les essais, nous avons constaté que les participants ne présentaient aucune déficience ou difficulté particulière qui pourrait perturber l'accomplissement de la tâche durant l'expérience. Les habiletés sensorielles, cognitives et motrices ont été évaluées à l'aide de questionnaires et auto-déclarations, ce qui a confirmé notre observation. Tous les participants avaient une expérience d'utilisation d'ordinateurs et familiarité avec des dispositifs équipés d'écrans tactiles. Tous étaient droitiers et ont tous utilisé l'index de la main droite pour exécuter les gestes d'interaction.

Durant l'expérience, les participants étaient assis et avaient une tablette tactile (écran 10 pouces de diagonale) en face d'eux, posée horizontalement sur la table. Le haut du dispositif était à 30 cm du bord de la table.

#### 3.2 L'équipement

Le dispositif tactile choisi était une tablette Samsung Galaxy Note 10.1 (dimensions 180x262mm, résolution 1280x800).

Le système de suivi de mouvement (Qualisys AB, Gothenburg, Sweden) était composé de six caméras infrarouges. Ce système optoélectronique permet d'enregistrer la position des billes réfléchissantes (marqueurs), placées à l'aide de bande adhésive double-face sur le corps des participants et sur le dispositif.

Les six caméras infrarouges étaient disposées à une hauteur d'environ 3 mètres, sur des trépieds, autour de la table et orientées vers le sujet. Les caméras enregistrent la position des marqueurs en trois dimensions (X, Y, Z) à une fréquence de 200 Hz. La Fig. 1 présente un aperçu de l'équipement de suivi de mouvement utilisé pour cette étude.

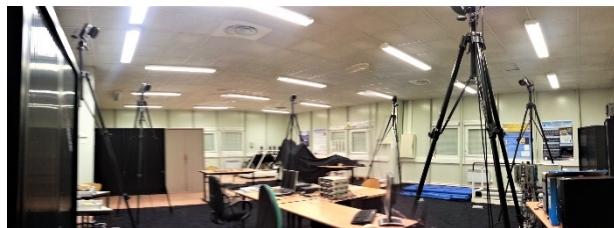


Figure 1 : Vue du laboratoire avec les six caméras infrarouges sur des trépieds, placées autour de la table où les participants exécutent la tâche d'interaction.

Sur le corps, les marqueurs ont été placés sur des repères anatomiques pour permettre de capturer les postures du tronc, tête et membre supérieurs, selon les recommandations de la International Society of Biomechanics [17]. Des marqueurs supplémentaires ont été ajoutés sur le corps pour que les positions des marqueurs anatomiques puissent être recalculées dans le cas de manque de suivi à cause d'obstruction de la vue ou de défaut de signal (trois dans le bras et trois dans l'avant-bras). La Fig. 2 présente une illustration de la reconstruction en 3D de la posture de l'utilisateur à partir de la position des marqueurs. Pour l'analyse des mouvements du poignet, nous avons utilisé les positions de quatre marqueurs placés sur les repères anatomiques *metacarpi 2* (MCP2), *metacarpi 5* (MCP5), *radial styloid process* (RSP) et *ulnar styloid process* (RSP), comme mis en évidence dans la Fig. 3.

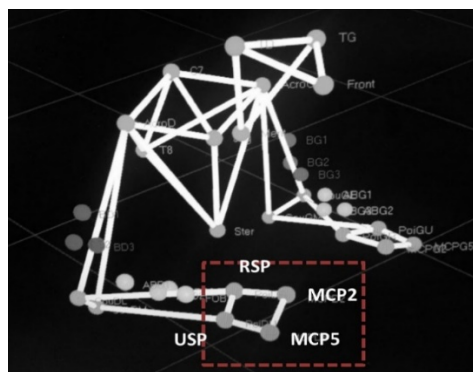


Figure 2 : Illustration de la reconstruction de la posture de l'utilisateur en 3D.

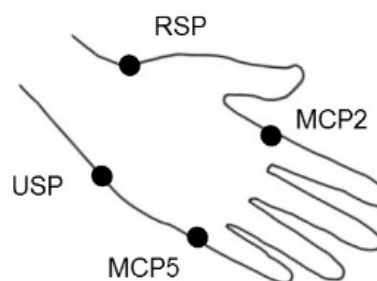


Figure 3 : Illustration de la position des marqueurs utilisés pour le suivi des mouvements du poignet.

### 3.3 La tâche

Afin de faciliter le recrutement des participants âgés dans notre étude, nous avons développé un système interactif qui présente des jeux de type puzzle tactiles numériques. Cette approche a déjà été utilisée dans notre étude préalable qui a permis de vérifier la facilité de l'exécution du geste glisser – déposer (*drag-and-drop*) pour des personnes âgées avec de différents profils utilisateurs [10]. Quand l'utilisateur touche une pièce du jeu avec le doigt sur l'écran, celle-ci apparaît au premier plan et suit le mouvement du doigt en contact avec l'écran. Quand l'utilisateur relâche l'écran, le déplacement s'arrête et la position de la pièce est vérifiée. Si la pièce a atteint sa cible, en recouvrant au moins 95% de son emplacement correspondant, il y a un feedback visuel (la pièce clignote) et la pièce ne peut plus être déplacée. Si l'utilisateur atteint chaque cible avec un seul déplacement par pièce du jeu, aucune erreur n'est comptabilisée.

Par contre, si la contrainte de recouvrement n'a pas été atteinte, une erreur est comptabilisée. La pièce reste dans la position où elle a été relâchée en attente d'un nouvel essai de déplacement de la part de l'utilisateur. Ainsi, dans cette étude, le nombre d'erreurs correspond aux mouvements supplémentaires de l'utilisateur pour positionner les pièces du jeu. La tâche est finie quand toutes les pièces ont atteint correctement leurs cibles, en recomposant l'image.

La Fig. 4 présente des captures d'écran du système interactif. Les pièces du jeu apparaissent dans la moitié inférieure de l'écran, dans des positions aléatoires, et doivent être déplacées jusqu'à leur emplacement correspondant (cible). Les cibles sont présentes dans la grille qui s'affiche sur la partie supérieure de l'écran. La grille de cibles affiche l'image à recomposer en filigrane (20% de transparence).



Figure 4 : Captures d'écran du système interactif. À gauche, un jeu avec neuf cibles. À droite, un jeu avec seize cibles.

Les paramètres du système ont été configurés afin d'afficher neuf cibles de grande taille (46x35 mm) et seize cibles de taille plus petite (35x27mm). La distance moyenne à parcourir est de 110 mm par cible dans les deux cas.

La consigne est de réaliser les gestes avec précision. A la fin de chaque jeu, l'expérimentateur met en place le système avec une nouvelle tâche. L'ordre de passage des tâches a été

contrebalancé. Trois itérations de la tâche ont été réalisées. Une pause a été proposée aux participants entre chaque itération.

### 3.4 L'analyse des données

Au total, 2250 gestes d'interaction ont été analysés (30 participants x 3 itérations x 25 cibles). Les traces de l'interaction enregistrées par le système interactif (coordonnées des touches et données temporelles) ont été synchronisées aux données de mouvement.

Pour l'analyse des mouvements du poignet, les angles articulaires ont été estimés à partir des coordonnées des marqueurs MCP2, MCP5, RSP et USP par rapport à la position de la tablette. Les angles articulaires varient de la position considéré neutre ( $a=0$  degrés) à des déviations positives ou négatives. La déviation radiale est positive et la déviation ulnaire est négative. Les angles d'extension sont positifs et les angles de flexion sont négatifs.

Pour chaque sujet, et à chacune des tâches, nous avons calculé les angles médians minimal, moyen et maximal et l'amplitude des mouvements. Puis, pour estimer l'effort moteur et l'inconfort d'une position, nous avons calculé le temps passé dans des postures considérées comme neutres (-5 à 5 degrés) ou non-neutres. Nous avons ensuite calculé le pourcentage du temps de la tâche pour chaque position du poignet.

Pour l'analyse des performances, nous avons calculé le temps médian de positionnement d'une cible et le nombre médian d'erreurs par cible pour chaque série de données enregistrées par le système interactif.

Pour l'investigation des relations entre les caractéristiques du mouvement et les performances de l'utilisateur nous avons appliqué le test de corrélation de Spearman et nous reportons le coefficient de corrélation comme résultat.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Posture globale du poignet

Nous avons observé une prédominance de déviation radiale et extension du poignet des utilisateurs avec une grande amplitude de mouvements des angles de déviation radial-ulnaire et flexion-extension. La posture du poignet était en déviation radiale 93% du temps et étendue 68% du temps durant la tâche d'interaction. L'aperçu des angles enregistrés pour les deux groupes de participants est décrit dans le Tableau 3 pour la déviation radiale-ulnaire et dans le Tableau 4 pour les angles de flexion-extension.

Tableau 3 : Angle de déviation radiale minimal, moyen, maximal et amplitudes (valeurs médianes)

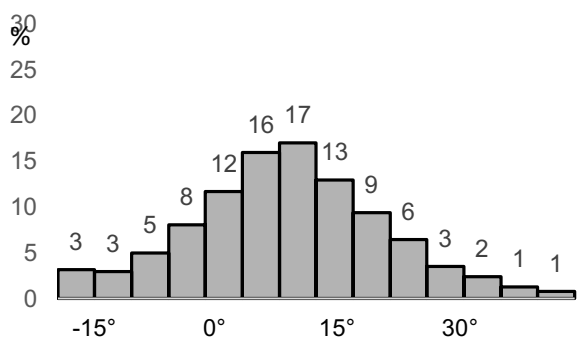
Groupe	Minimal	Moyen	Maximal	Amplitude
Adultes	0,4	16,8	35,5	33,2
Aînés	-7,5	28,6	49,2	55,8

**Tableau 4 : Angle d'extension minimal, moyen, maximal et amplitudes (valeurs médianes)**

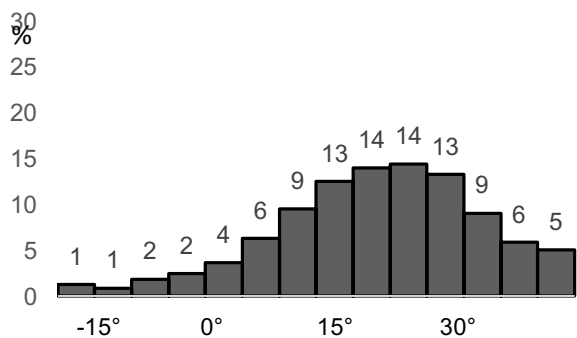
Groupe	Minima l	Moyen	Maximal	Amplitude
Adultes	-4,7	3,9	18,6	22,9
Ainés	-6,0	7,5	32,5	37,2

### 4.2 Caractéristiques du mouvement du poignet durant l'interaction

Afin de permettre une analyse plus fine des différences de mouvement entre les deux groupes de participants nous avons calculé le pourcentage du temps de la tâche où le poignet est resté dans chaque posture, en suivant des intervalles angulaires de 5 degrés, allant de 45 degrés négatifs jusqu'à 45 degrés positifs. Les déviations proches de 0° sont considérées neutres (entre -5 et 5 degrés) et les déviations supérieures à 30 degrés peuvent être considérées extrêmes ou à risque d'inconfort [19]. Les Figs. 5 et 6 décrivent le pourcentage de temps pendant lequel le poignet était en déviation radiale ou ulnaire, et les angles articulaires enregistrés, pour les groupes des adultes et des aînés, respectivement.



**Figure 5 : Pourcentage du temps en déviation radiale (positive) ou ulnaire (négative) du poignet durant l'interaction avec le doigt sur tablette tactile – groupe des Adultes**



**Figure 6 : Pourcentage du temps en déviation radiale (positive) ou ulnaire (négative) du poignet durant l'interaction avec le doigt sur tablette tactile – groupe des Aînés**

Pour les adultes, pendant 55% du temps la déviation radiale était entre 5 et 25 degrés. Les mouvements proches d'une

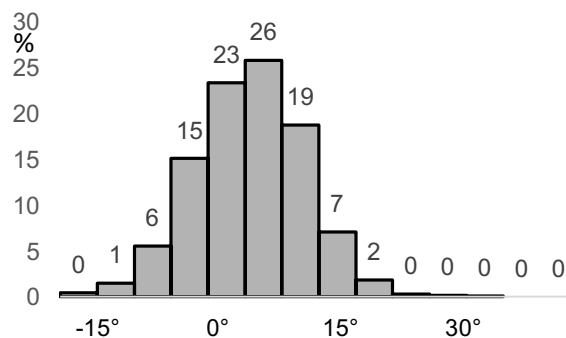
déviations neutres représentent 30% du temps d'interaction pour ce groupe de participants. Le temps passé en déviation ulnaire correspond à 12%. La déviation radiale a dépassé les 30 degrés durant 11% du temps.

Pour les personnes âgées, pendant 52% du temps la déviation radiale était entre 20 et 35 degrés. Les mouvements proches d'une déviation neutre représentent 13% du temps d'interaction pour ce groupe de participants. Le temps passé en déviation ulnaire correspond à 7%. La déviation radiale a dépassé les 30 degrés durant 37% du temps.

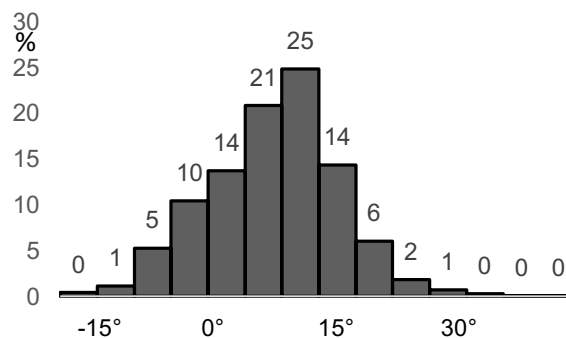
Par rapport aux angles de flexion-extension, le poignet des adultes est 68% du temps avec un angle d'extension inférieur à 15 degrés. Les mouvements proches d'une déviation neutre représentent 38% du temps d'interaction pour ce groupe de participants. Le temps passé en flexion correspond à 22%. L'angle d'extension a dépassé les 15 degrés durant 9% du temps.

Pour les personnes âgées, le poignet avait un angle d'extension inférieur à 15 degrés durant 60%. Les mouvements proches d'une déviation neutre représentent 24% du temps d'interaction pour ce groupe de participants. Le temps passé en flexion correspond à 22%. L'angle d'extension a dépassé les 15 degrés durant 20% du temps.

Les Fig. 7 et 8 donnent le pourcentage de temps durant lequel les poignets des participants comportaient un angle d'extension ou de flexion pour les adultes et pour les aînés, respectivement, et les angles articulaires enregistrés.



**Figure 7 : Pourcentage du temps en extension (positive) ou flexion (négative) du poignet durant l'interaction avec le doigt sur tablette tactile - groupe des Adultes**



**Figure 8 : Pourcentage du temps en extension (positive) ou flexion (négative) du poignet durant l'interaction avec le doigt sur tablette tactile – groupe des Aînés**

### 4.3 Performances

Pour les participants âgés, le temps moyen pour positionner une cible était 1,7 secondes plus long que pour les adultes. Les participants âgés ont fait deux fois plus d'erreurs par cible que les adultes. Le Tableau 5 décrit les performances des deux groupes.

**Tableau 5 : Performances des deux groupes (valeurs médianes et un interquartile)**

Groupe	Temps (s)	Nombre d'erreurs
Adultes	2,7 (1,3)	0,2 (0,3)
Ainés	4,42 (1,5)	0,44 (0,9)

Pour essayer de mieux comprendre la différence de performances entre les participants adultes et les adultes plus âgés nous avons cherché la possibilité d'une relation entre les résultats de l'interaction et les caractéristiques des mouvements de leurs poignets.

Pour le groupe des adultes, nous avons trouvé une corrélation positive entre le temps et l'amplitude des mouvements de déviation radial-ulnaire (0,4) et flexion-extension (0,6). La relation entre le nombre d'erreurs et l'amplitude des mouvements de déviation radial-ulnaire (-0,2) et flexion-extension (-0,1) n'est cependant pas significative.

Pour le groupe des adultes plus âgés, nous avons trouvé une corrélation positive modérée entre le temps et l'amplitude des mouvements de déviation radial-ulnaire (0,3) et flexion-extension (0,4). La relation entre le nombre d'erreurs et l'amplitude des mouvements de déviation radial-ulnaire (0,4) et flexion-extension (0,3) est positive et plus significative que pour les adultes plus jeunes.

## 5 DISCUSSION

Notre étude avait pour objectif d'analyser les performances des utilisateurs âgés par une analyse biomécanique des mouvements du poignet. Dans cette partie, nous discutons la contribution de l'analyse du mouvement pour la compréhension des difficultés que les personnes âgées peuvent rencontrer pour accomplir l'interaction tactile. Ensuite, nous discutons l'utilisabilité de l'interaction tactile à partir d'une perspective ergonomique. Finalement, nous présentons les questions que nous avons soulevées pendant la mise en place de cette expérience multidisciplinaire.

### 5.1 La relation entre les mouvements des utilisateurs et leurs performances lors de l'interaction tactile

Dans notre étude, l'analyse des postures du poignet a démontré une plus grande amplitude angulaire chez les participants âgés, avec une prédominance de déviation radiale et extension plus accentuée dans ce groupe par rapport à des d'utilisateurs adultes plus jeunes. Cela représente une situation à risque d'inconfort qui peut expliquer le temps plus long et le plus grand nombre d'erreurs pour les utilisateurs âgés. L'analyse de la relation entre le temps de l'interaction et

l'amplitude de mouvements radial-ulnaire et flexion-extension du poignet est en accord avec ce résultat.

Pour les personnes âgées, la déviation radiale était plus accentuée que pour les adultes. Cela indique que les utilisateurs âgés doivent adapter leurs gestes et adopter différentes stratégies pour accomplir l'interaction. Ce résultat est en accord avec des analyses présentées dans la littérature qui décrivent des stratégies de mouvements des personnes âgées avec une priorité pour la mobilisation des articulations distales [3, 16]. De plus, les plus grandes amplitudes peuvent aussi être en rapport avec les changements dans les systèmes physiologiques et neurologiques liés au vieillissement naturel, affectant la stabilité posturale des poignets des adultes plus âgés [16].

### 5.2 L'ergonomie de l'utilisation de dispositifs tactiles

Les caractéristiques de mouvements du poignet des participants adultes plus jeunes démontrent une amplitude de mouvements plus petite en rapport au groupe plus âgé. Les adultes plus jeunes ont également passé plus de temps dans des postures plus proches d'une déviation radiale neutre. Ce résultat représente un meilleur confort d'utilisation d'écrans tactiles qui pourrait expliquer les meilleures performances de ce groupe d'utilisateurs.

Ce résultat peut également être en rapport avec une meilleure habileté motrice et dextérité manuelle des participants plus jeunes. Par contre, l'évaluation du confort de l'interaction tactile doit être approfondie, car la stabilisation du poignet pourrait être compensée par un mouvement plus important d'autres articulations, comme le coude, épaule ou même des mouvements du tronc [7]. Une analyse supplémentaire est nécessaire afin d'évaluer l'ergonomie de l'utilisation des écrans tactiles en position horizontale pour les deux groupes d'utilisateurs.

Dans une perspective ergonomique, nous devons considérer le fait que l'amélioration de l'utilisabilité des dispositifs équipés avec des écrans tactiles peut affecter non seulement les performances des utilisateurs mais également leur confort d'utilisation. Réduire le temps et le nombre d'erreurs pour l'accomplissement d'une tâche d'interaction devrait aider les utilisateurs à interagir avec des technologies de façon plus efficace, en optimisant l'exécution des gestes d'interaction et en réduisant les risques de développement de troubles musculo-squelettiques après un temps d'utilisation prolongé.

### 5.3 L'analyse des mouvements pour comprendre les performances des utilisateurs

Dans la présente étude, l'analyse biomécanique des mouvements de l'utilisateur permet de collecter des données supplémentaires à celles enregistrées par le système interactif. Les résultats obtenus dans cette étude présentent néanmoins quelques limitations.

Par rapport aux caractéristiques des participants, il est difficile de réunir un groupe homogène de participants âgés, spécialement en ce qui concerne leur évaluation de l'interaction avec des technologies. L'hétérogénéité des



participants dans notre étude pourrait en partie expliquer la plus grande variabilité de postures du poignet et performances reportées pour le groupe des adultes plus âgés. Par contre, les différences entre les deux groupes restent statistiquement significatives. Notre argument est que l'analyse de mouvements d'utilisateurs avec différentes habiletés motrices ou déficiences pourrait fournir des informations importantes pour le design de technologies interactives mieux adaptées aux besoins des différents groupes d'utilisateurs.

L'équipement utilisé pour enregistrer les données de mouvement dans la présente étude est non-invasif et ne perturbe pas l'exécution des mouvements. Par contre, ce système est encombrant, il est installé dans le laboratoire de l'université et exige que les participants se déplacent. Cette restriction rend plus contraignante le recrutement et la participation de personnes âgées. Une autre contrainte est la fixation des marqueurs anatomiques sur la peau ou sur des vêtements près du corps. Cela a parfois représenté un problème pour l'acceptabilité de la procédure expérimentale. La configuration de l'expérience dans notre étude a été choisie afin de proportionner une situation confortable pour les participants durant l'enregistrement des mouvements de leurs poignets et également pour permettre la participation de personnes âgées. Dans notre étude, l'analyse des postures du poignet nous a permis de comparer les mouvements entre les deux groupes de participants. Par contre, la perception du confort est une mesure individuelle et dépend des habiletés motrices de chaque individu. Afin de mieux estimer le confort ou l'inconfort de l'utilisateur il est important de prendre en compte leurs caractéristiques individuelles, par exemple à partir des angles maximaux et de l'amplitude de mouvements de l'articulation de chaque participant. En plus, des mesures physiologiques et auto-rapportées peuvent être considérées pour des expériences plus longues dans le temps ainsi que pour un usage prolongé de l'interaction tactile.

#### 5.4 Travaux futurs

Dans des travaux futurs, les mouvements de l'épaule et du coude devront être analysés afin d'identifier des mouvements compensatoires de ces articulations en rapport aux mouvements du poignet. Des mouvements compensatoires peuvent être le résultat de différentes stratégies des utilisateurs pour l'exécution des gestes d'interaction ainsi que le résultat d'une difficulté de mobilisation des articulations proximales des membres supérieurs.

Une évaluation approfondie des mouvements des utilisateurs pourrait aider à identifier les postures qui augmentent le risque d'inconfort ou de troubles musculo-squelettiques. Il serait également important d'évaluer l'utilisation d'écrans tactiles avec des différentes techniques d'interaction (ex. un stylet), dispositifs (ex. smartphone, plateau) ou encore autres configurations d'utilisation (ex. dispositif porté à la main ou placé verticalement) afin de fournir des recommandations ergonomiques pour des designers et pour les utilisateurs.

## 6 CONCLUSION

Nous avons réalisé une étude sur les différences de performance entre utilisateurs âgés et plus jeunes par une analyse biomécanique du mouvement. L'analyse des postures du poignet a démontré une plus grande amplitude angulaire chez les participants âgés, avec une prédominance de la déviation radiale et extension plus accentuée que chez les adultes plus jeunes. Cette caractéristique est en rapport avec les différences de performances entre les deux groupes de participants, à savoir un temps plus long et un plus grand nombre d'erreurs pour les utilisateurs âgés.

Dans notre étude, l'articulation du poignet est un indicateur de l'agencement des postures et positions des membres supérieurs. Des analyses complémentaires pourront élucider les différentes stratégies mises en œuvre par les utilisateurs âgés afin d'accomplir l'interaction tactile en fonction des situations d'usage des dispositifs tactiles. Cela permettra l'identification de situations présentant un risque de développement de troubles musculo-squelettiques ainsi qu'à l'élaboration de recommandations pour un meilleur confort d'utilisation des écrans tactiles.

L'association d'une méthode d'analyse du mouvement avec une étude de l'utilisabilité de technologies interactives permet de collecter des informations supplémentaires sur l'interaction pour pouvoir interpréter les résultats. Notre principale contribution est d'avoir identifié des différentes caractéristiques de mouvement entre les utilisateurs âgés et les plus jeunes, lors de l'interaction tactile, telles que les amplitudes des angles articulaires du poignet. Cette analyse permet aux designers de comprendre l'interaction d'un point de vue ergonomique et offre la voie à la conception de solutions mieux adaptées aux besoins des utilisateurs.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Julien Jacquier-Bret pour sa contribution dans l'enregistrement et traitement initial des données de mouvement.

Les auteurs souhaitent remercier les relecteurs anonymes pour leurs commentaires très constructifs.

Bourse d'études en doctorat de Lilian Genaro Motti Ader, CNPQ, Brésil (#237079/2012-7).

## RÉFÉRENCES

- [1] Bachynskyi, M. et al. 2015. Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study Using Biomechanical Simulation. *Proceedings of ACM CHI'15* (Seoul, Korea, 2015), 1817–1826.
- [2] Fisk, A.D. et al. 2009. *Designing for Older Adults: Principles and Creative Human Factors Approaches*. CRC Press.
- [3] Hsiao, L.-P. and Cho, C.-Y. 2012. The effect of aging on muscle activation and postural control pattern for young and older computer users. *Applied Ergonomics*. 43, 5 (2012), 926–932.
- [4] Irwin, C.B. et al. 2011. Use of force plate instrumentation to assess kinetic variables during touch screen use. *Universal Access in the Information Society*. 10, 4 (Jan. 2011), 453–460.
- [5] Irwin, C.B. and Sesto, M.E. 2012. Performance and touch characteristics of disabled and non-disabled participants during a reciprocal tapping task using touch screen technology. *Applied ergonomics*. 43, 6 (Nov. 2012), 1038–43.
- [6] Jacquier-bret, J. et al. 2017. Biomechanical analysis of upper limb during the use of touch screen: motion strategies identification. *Ergonomics*. 139, April (2017), 1–8.
- [7] Jacquier-Bret, J. et al. 2014. Biomechanical analysis of interaction strategies using touchscreen: preliminary study. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* (2014), 86–87.
- [8] Kim, J.H. et al. 2014. Differences in typing forces, muscle activity, comfort,

- and typing performance among virtual, notebook, and desktop keyboards. *Applied Ergonomics*. 45, 6 (2014), 1406–1413.
- [9] Kim, J.H. et al. 2013. The effects of touch screen virtual keyboard key sizes on typing performance, typing biomechanics and muscle activity. *Digital Human Modeling/HCI 2013* (2013), 239–244.
- [10] Motti, L.G. et al. 2015. Improving accessibility of tactile interaction for older users: lowering accuracy requirements to support drag-and-drop interaction. *Procedia Computer Science - Proceedings of the 6th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion DSAI 2015* (Sankt-Augustin, Germany, 2015), 366–375.
- [11] Pereira, A. et al. 2013. Holding A Tablet Computer With One Hand. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting*. 57, Straker 2008 (2013), 1634–1638.
- [12] Sakai, N. et al. 2006. Hand Span and Digital Motion on the Keyboard: Concerns of Overuse Syndrome in Musicians. *Journal of Hand Surgery*. 31, (2006), 830–835.
- [13] Sesto, M.E. et al. 2012. Effect of touch screen button size and spacing on touch characteristics of users with and without disabilities. *Human Factors*. 54, 3 (2012), 425–436.
- [14] Shin, G. and Zhu, X. 2011. User discomfort , work posture and muscle activity while using a touchscreen in a desktop PC setting. *Ergonomics*. 54, 8 (2011), 733–744.
- [15] Werth, A. and Babski-Reeves, K. 2014. Effects of portable computing devices on posture, muscle activation levels and efficiency. *Applied Ergonomics*. 45, 6 (2014), 1603–1609.
- [16] Wright, M.L. et al. 2011. Age-related declines in the detection of passive wrist movement. *Neuroscience Letters*. 500, 2 (2011), 108–112.
- [17] Wu, G. et al. 2005. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion – Part II: shoulder , elbow , wrist and hand. 38, (2005), 981–992.
- [18] Young, J.G. et al. 2012. Touch-screen tablet user configurations and case-supported tilt affect head and neck flexion angles. *Work*. 41, 1 (2012), 81–91.
- [19] Young, J.G. et al. 2013. Wrist and shoulder posture and muscle activity during touch-screen tablet use: Effects of usage configuration, tablet type, and interacting hand. *Work*. 45, 1 (2013), 59–71.

