



## **Utilisation du corps comme support à l'interaction à distance avec un dispositif à multiple degrés de libertés**

Houssem Eddine Saïdi, Marcos Serrano, Pourang Irani, Christophe Hurter,  
Emmanuel Dubois

### **► To cite this version:**

Houssem Eddine Saïdi, Marcos Serrano, Pourang Irani, Christophe Hurter, Emmanuel Dubois. Utilisation du corps comme support à l'interaction à distance avec un dispositif à multiple degrés de libertés. 30eme conférence francophone sur l'interaction homme-machine, Oct 2018, Brest, France. 11p. <hal-01898853>

**HAL Id: hal-01898853**

**<https://hal.science/hal-01898853v1>**

Submitted on 18 Oct 2018

**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.



HAL Authorization

# Utilisation du corps comme support à l'interaction à distance avec un dispositif à multiple degrés de libertés

*On-Body Tangible Interaction: Using the Body to Support Tangible Manipulations for Immersive Visualization*

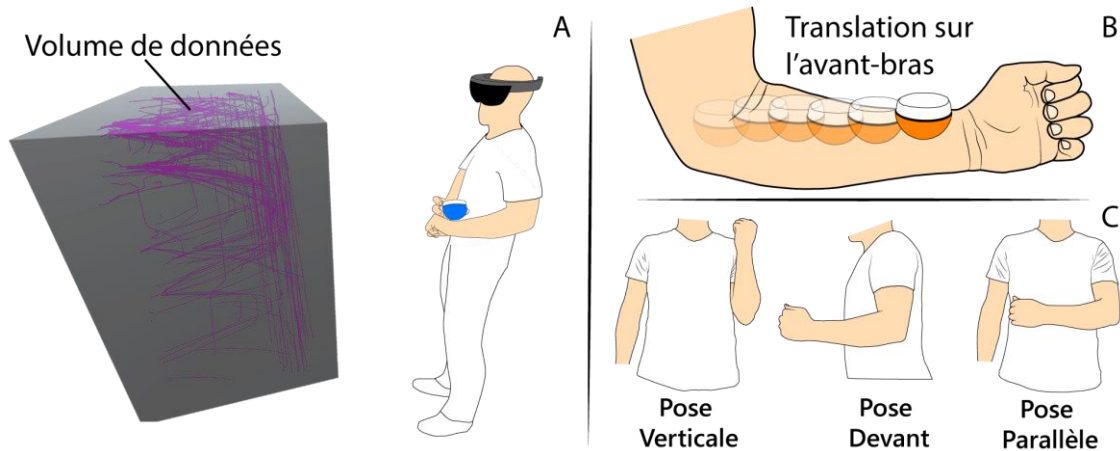
Houssem Saidi  
IRIT – Université de Toulouse  
31260, Toulouse, France  
[Houssem.Saidi@irit.fr](mailto:Houssem.Saidi@irit.fr)

Marcos Serrano  
IRIT – Université de Toulouse  
31260, Toulouse, France  
[Marcos.Serrano@irit.fr](mailto:Marcos.Serrano@irit.fr)

Pourang Irani  
University of Manitoba  
Winnipeg, MB, Canada  
[Irani@cs.umanitoba.ca](mailto:Irani@cs.umanitoba.ca)

Christophe Hurter  
ENAC  
31055, Toulouse, France  
[Christophe.Hurter@enac.fr](mailto:Christophe.Hurter@enac.fr)

Emmanuel Dubois  
IRIT – Université de Toulouse  
31260, Toulouse, France  
[Emmanuel.Dubois@irit.fr](mailto:Emmanuel.Dubois@irit.fr)



**Figure 1:** A) Utilisation d'une souris à plusieurs degrés de liberté sur le corps (support) pour l'interaction avec une visualisation immersive, B) Translation de la souris augmentée sur l'avant-bras, C) Poses possibles pour le support à l'interaction.

## ABSTRACT

Recent technological advancements in augmented and mixed reality devices opened up many opportunities to users to interact in their environments. However, there are many unanswered questions about the definition of these interaction paradigms. In this article, we present a new approach to interact in these environments: using the body as a physical support to constrain the movement of a multiple degrees of freedom device (3D Mouse). This mouse offers enough degrees of freedom as well as a necessary accuracy to support the interaction. The use of the body as a support for the interaction allows the user to move in his environment and avoids the inherent fatigue of mid-air interactions. Thus, we propose a new design space for tangible interactions on the body, and specifically on the

forearm. To validate the feasibility of such an approach, we present an experiment aimed at establishing the range, stability and comfort of gestures performed with a multiple degrees of freedom mouse on the forearm.

## KEYWORDS

Tangible interaction; mixed reality environment; on-body interaction.

## CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → Interaction techniques

## RÉSUMÉ

Les récents avènements technologiques au travers des périphériques de réalité augmenté ou mixte ouvrent de nombreuses opportunités aux utilisateurs pour interagir dans leurs environnements. Cependant, il reste de nombreuses questions sur la définition de ces paradigmes d'interaction. Dans cet article, nous présentons une nouvelle approche avec l'utilisation du corps comme support physique pour contraindre les déplacements d'un périphérique de type souris 3D. Cette souris offre suffisamment de degrés de liberté et une précision satisfaisante pour supporter l'interaction. L'utilisation du corps comme support à l'interaction permet à l'utilisateur de se déplacer dans son environnement et réduit la fatigue inhérente

à l'interaction en l'air. Ainsi, nous proposons un nouvel espace de conception pour les interactions tangibles sur le corps, et en particulier sur l'avant-bras. Pour valider la faisabilité d'une telle approche, nous présentons une expérience visant à établir la portée, stabilité et confort des gestes effectués avec une souris 3D sur l'avant-bras.

## MOTS-CLEFS

Interaction tangible; environnement mixte; interaction sur le corps.

## 1 INTRODUCTION

Les périphériques utilisés pour le rendu des environnements mixtes comme l'Hololens<sup>1</sup>, MetaVision<sup>2</sup> ou Moverio<sup>3</sup> permettent à l'utilisateur de faire cohabiter des informations numériques ancrées géographiquement dans les environnements physiques (ce qu'on appellera dans cet article Visualisation Immersive pour simplifier). Ces nouvelles technologies offrent ainsi des opportunités d'interaction qui sont à ce jour insuffisamment explorées. A ce titre, nous n'avons pas de règle implicite de design pour permettre les interactions des utilisateurs dans ces environnements et il en résulte une multitude de solutions partiellement satisfaisantes. Aujourd'hui les solutions proposées n'ont pas suffisamment de degrés de liberté [10,22,26] et sont souvent ambiguës et fatigantes (en particulier les gestes en l'air [3,22,24]). De plus elles sont parfois contraignantes pour l'utilisateur dont le mouvement ne peut être produit qu'en un lieu clairement défini où le dispositif (souris 3D ou autre) est utilisable [18].

Dans cet article, nous proposons d'étudier des techniques d'interactions utilisant l'utilisateur comme un support physique à l'interaction afin de laisser à l'utilisateur sa liberté de mouvement face à des informations numériques ancrées géographiquement dans le monde physique. Nous présentons ainsi une nouvelle approche qui combine 1) l'usage d'un dispositif sans-fils de type souris multi-DOF, alliant la précision inhérente à une souris, la souplesse d'utilisation du tangible et les larges capacités de contrôle propres aux dispositifs à multiples degrés de liberté et 2) l'utilisation du corps de l'utilisateur pour guider les déplacements du dispositif et exploiter ainsi la proprioception de l'utilisateur, tout en minimisant la fatigue musculaire propres aux interactions en l'air.

Cette nouvelle modalité d'interaction nous permet de définir un nouvel espace de conception prenant en compte les propriétés physiques du corps et les interactions qu'elles peuvent supporter. Pour valider notre structuration des interactions, nous avons conduit une expérimentation validant les surfaces corporelles exploitables mais aussi justifiant leurs utilisations. Dans ce papier nous présentons les contributions suivantes. Tout d'abord, nous détaillons notre espace de conception pour les interactions tangibles sur le corps. Ensuite, nous les évaluons à travers une expérimentation visant à définir les meilleures conditions d'utilisation du corps pour supporter l'interaction. Enfin nous discutons les avantages et les inconvénients de ces interactions tangibles avant de les illustrer sur des scénarios concrets.

## 2 ETAT DE L'ART

Dans cette section nous présentons les approches existantes pour l'interaction en environnement mixte, i.e. combinant l'affichage de données numériques avec le monde physique, et immersif, c.-à-d. utilisant casque ou lunettes semi-transparentes.

### 2.1 Interaction tactile

Qu'elles soient incluses directement sur le dispositif de visualisation (casque, lunettes) [26] ou déportées vers un dispositif externe (smartphone, tablette) [20], plusieurs travaux ont exploré l'utilisation de surfaces tactiles pour l'interaction avec des visualisations Immersives. Néanmoins, ces dispositifs ne sont pas les plus adaptés pour l'interaction avec des données 3D [5]. En effet, elles nécessitent une surface dédiée pour supporter l'interaction [3], ce qui peut détourner l'attention de l'utilisateur de la tâche à réaliser dans le cas d'une tablette/smartphone ou encore contraindre la mobilité de l'utilisateur dans le cas d'un écran tactile/table interactive [18].

### 2.2 Gestes en l'air

Les avantages qu'offrent les interactions en l'air [8,29] en font l'une des approches les plus utilisées dans les systèmes immersifs: elles sont souples, non contraignantes et faciles à réaliser. Mais elles sont aussi fatigantes [6] et ne fournissent pas la précision nécessaire pour des tâches d'exploration de données [22]. Elles ne sont pas non plus observables et nécessitent donc d'être préalablement apprises et mémorisées par l'utilisateur. Les interactions en l'air ont également été jugées ambiguës [14,22].

### 2.3 Interfaces tangibles

Plusieurs travaux ont étudié l'apport du tangible dans la visualisation de données multidimensionnelles. Ce type d'interaction fournit suffisamment de degrés de liberté pour couvrir les tâches les plus fréquentes d'interaction 3D [1,4,35]. Besançon et al. ont comparé la souris, le tactile et les interactions tangibles pour la manipulation de données 3D [5]. Les résultats suggèrent que le tangible est l'approche la plus performante pour l'interaction 3D et que l'affordance des objets tangibles élimine le besoin d'une phase d'apprentissage. Néanmoins les résultats montrent que les interactions tangibles étaient moins précises que la souris, probablement car ces objets étaient utilisés en l'air.

### 2.4 Interaction sur le corps

L'utilisation de gestes sur le corps permet d'étendre l'interaction avec des environnements immersifs. Serrano et al. [28] ont proposé d'utiliser des gestes sur le visage pour interagir avec des lunettes semi-transparentes. Dobbelsstein et al. [10] ont proposé d'utiliser la ceinture comme surface tactile pour interagir avec des systèmes augmentés. Ces interactions sont intéressantes car elles ne contraignent pas le mouvement de l'utilisateur. Elles exploitent la proprioception de l'être humain pour permettre des interactions rapides, qui ne détournent pas l'attention de l'utilisateur de la tâche à réaliser. Cependant, les tâches réalisables avec ce type d'interaction deviennent rapidement limitées en raison du petit nombre de gestes

<sup>1</sup> <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

<sup>2</sup> <http://www.metavision.com/>

<sup>3</sup> <https://epson.com/moverio-augmented-reality>

possibles. De plus, cette approche n'offre pas une très grande précision.

## 2.5 Augmentation des degrés de liberté de la souris

Les interactions basées sur la souris, bien que très précises, n'offrent que 2 degrés de liberté, ce qui n'est pas adapté à ce type d'environnements. Plusieurs travaux se sont focalisés sur l'augmentation des degrés de liberté de la souris à travers l'intégration de l'inclinaison et de la rotation [11,19,25]. La Lexip 3D [19] en est un exemple, celle-ci est basée sur la combinaison d'une souris et d'un joystick. La Roly-Poly Mouse (RPM) [25] permet cela grâce à sa forme semi-sphérique. Perelman et al. ont démontré que ce dispositif est adapté à l'interaction avec des données 3D.

Notre approche consiste donc à conserver la liberté de mouvement de l'interaction en l'air, les degrés de liberté du tangible ainsi que la précision de la souris pour apporter une solution souple et non fatigante pour l'interaction avec des visualisations Immersives. Nous proposons donc d'utiliser le corps comme support à l'interaction tangible.

## 3 INTERACTION TANGIBLE SUR LE CORPS

Nous présentons un nouveau paradigme d'interaction pour visualisations Immersives consistant à utiliser le corps comme support physique à l'interaction tangible. Dans cette section nous détaillons le choix de l'objet, des parties du corps utilisées et de l'espace de conception résultant.

### 3.1 Besoins en interaction pour visualisations Immersives

La visualisation interactive de données en environnement mixte peut concerner de simples objets 3D mais aussi des données à structures complexes. Nous identifions les besoins qui en découlent en termes d'interaction :

- Capacité de se déplacer autour des données sans contraintes (B1) : L'un des avantages des environnements immersifs est la possibilité d'explorer les données physiquement. Ceci permet à l'utilisateur notamment d'avoir une vue globale des données en s'éloignant de celles-ci, une vue détaillée en se rapprochant et aussi d'explorer les données depuis plusieurs angles [16]. Il est donc important que la technique d'interaction ne contraigne pas le mouvement de l'utilisateur.
- Multiples degrés de liberté (B2) : La nature multidimensionnelle des données visualisées dans ce type d'environnement nécessite un nombre de degrés de liberté suffisant pour couvrir les tâches liées à leur manipulation [2].
- Limiter l'occultation visuelle (B3) : La technique d'interaction doit limiter l'occultation visuelle des données. Celle-ci doit permettre à l'utilisateur d'interagir avec les données sans qu'il n'ait à détourner son attention des données vers l'outil d'interaction [16].
- Précision (B4) : L'approche utilisée doit permettre une précision suffisante pour l'interaction dans ce type d'environnement.

L'utilisation du corps comme support à l'interaction avec un objet tangible est une approche pouvant répondre aux besoins cités ci-dessus. En effet, le corps est un support physique

disponible en tout temps, il ne contraint pas la mobilité de l'utilisateur autour des données à manipuler (B1). Grâce à la capacité qu'a l'être humain à percevoir les localisations et mouvements des différentes parties de son corps (proprioception), l'utilisateur peut réaliser des interactions tangibles sur le corps, sans avoir à détourner son regard des données manipulées vers la zone d'interaction (B3).

### 3.2 Choix de l'objet tangible

Nous avons cherché un objet qui soit un bon candidat à l'interaction tangible sur le corps et réponde aux besoins précédents. Notre choix s'oriente vers la Roly-Poly Mouse (RPM) [25], un dispositif en entrée de forme semi-sphérique à six degrés de liberté. Ce dispositif est particulièrement adapté à la manipulation de données multidimensionnelles (B2, B4) [25,27]. De plus le dispositif peut être manipulé en l'air et ne contraint donc pas le mouvement de l'utilisateur (B1) [27].

RPM permet 3 types de manipulations physiques (Fig. 2) : Translations, Rotations, Inclinaisons. Ces manipulations peuvent être réalisées dans plusieurs directions [25] : 2 directions pour les rotations (Gauche, Droite), les inclinaisons et translations se font de manière continue.

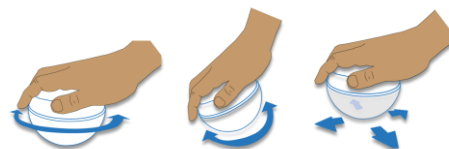


Figure 2: Degrés de liberté de RPM

### 3.3 Choix des parties du corps à utiliser

Plusieurs travaux se sont concentrés sur l'interaction sur ou avec le corps [13,17,29,33]. L'accent a été majoritairement mis sur l'utilisation des bras. Ceux-ci sont facilement accessibles pour l'interaction, sont dans le champ de vision de l'utilisateur et génèrent moins de gêne sociale que les autres parties du corps [17,32]. Dans leurs travaux sur l'interaction avec des vêtements interactifs [17], Karrer et al. ont fait une expérimentation sur les parties du corps les plus adéquates pour réaliser des interactions avec des vêtements. Parmi les observations qu'ils ont faites, le bras non-dominant ainsi que la hanche sont les parties préférées des utilisateurs. Les autres parties du corps, comme le ventre et les jambes ont été les plus rejetées pour des raisons sociales ou personnelles (Fig. 3).

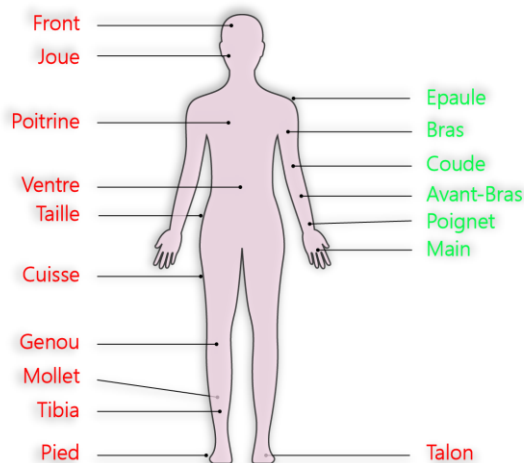


Figure 3: Parties du corps identifiées

Notre choix s'est donc porté sur l'avant-bras du bras non dominant comme support d'interaction, car il offre une grande surface pour déplacer un objet tangible, et il est accessible sans efforts avec la main dominante (toucher l'épaule requiert un mouvement d'avantage fatigant par exemple). De plus, on peut facilement adopter plusieurs poses avec l'avant-bras (Fig. 4), ce qui permet d'augmenter encore le vocabulaire d'interaction.

### 3.4 Référentiel

L'interaction avec les données se faisant dans un contexte spatial, deux référentiels d'interaction coexistent. 1) Aligné avec les données (*world reference*) : l'interaction avec les données se fait de manière absolue. 2) Relatif au corps : l'interaction avec les données se fait de manière égocentrée. Ainsi, un geste donné aurait le même résultat sur les données indépendamment de l'orientation du corps dans le monde. Dans notre approche, nous adoptons un référentiel égocentré pour permettre à l'utilisateur d'interagir de n'importe quel endroit avec les données ancrées géographiquement dans le monde physique [21].

### 3.5 Espace de conception de l'interaction tangible sur l'avant-bras

Nous avons établi un espace de conception composé de 3 dimensions pour caractériser le support physique: *La Pose*, la *Zone d'interaction* et la *Portée de l'interaction*.

#### 3.5.1 Pose

Nous avons retenu 3 poses principales pour l'avant-bras : *Verticale*, *Devant* (au visage) et *Parallèle* (Fig. 4). Les 3 poses matérialisent les axes du repère égocentré. Dans la pose *Verticale*, l'avant-bras est vertical, la main pointe vers le haut. Dans la pose *Devant*, l'avant-bras est perpendiculaire aux épaules. Dans la pose *Parallèle*, l'avant-bras est parallèle aux épaules.

Ces positions, clairement distinctes, ont été choisies pour offrir davantage de mode d'interaction tout en évitant de multiplier les zones du corps à utiliser.

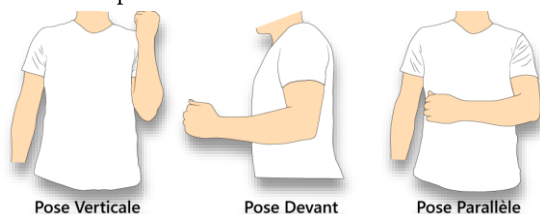


Figure 4: Poses

#### 3.5.2 Zone d'interaction

La *Zone d'interaction* est la sous-partie de l'avant-bras sur laquelle l'interaction peut être réalisée. Elle peut s'étendre sur la longueur de l'avant-bras ou sur sa largeur. Les zones en largeur sont possibles sur trois sous parties de l'avant-bras, largeur côté coude, largeur au milieu et largeur côté poignet. Il en résulte alors 12 supports différents d'interaction (Fig. 5). La multiplication des supports d'interaction augmente les possibilités d'interaction exploitant la proprioception de l'utilisateur et réduit la fatigue inhérente à une utilisation en l'air.

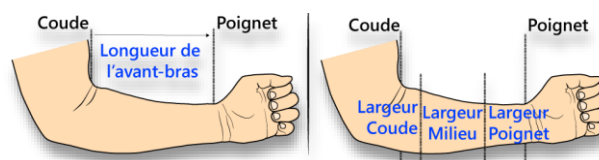


Figure 5: Zone d'interaction

#### 3.5.3 Portée de l'interaction

La *Portée de l'interaction* est le champ exploitable de chaque (*Zone d'interaction x Pose*) de l'avant-bras pour l'interaction (Fig. 6). Elle vise à décrire la portée maximale des translations de RPM sur l'avant-bras dans chacune des poses décrites précédemment. Plus la portée de l'interaction est grande, plus le domaine de valeurs pouvant être représentées par cette surface est grand.



Figure 6: Portée de l'interaction

Nous explorons ces trois dimensions dans une expérience contrôlée, détaillée dans la section suivante.

## 4 EXPERIMENTATION : INTERACTION TANGIBLE SUR L'AVANT-BRAS

Le but de cette expérimentation est d'étudier les caractéristiques de la mise en œuvre du dispositif RPM en utilisant l'avant-bras comme support au mouvement de translation du dispositif. Cette étude se focalisera sur les translations de la RPM sur l'avant-bras. En effet, nous avons émis l'hypothèse que les translations sur l'avant-bras pourraient conduire à des inclinaisons involontaires de RPM. Nous avons décidé de n'étudier que les translations dans cette première expérimentation.

### 4.1 Objectifs

Le principal objectif de notre expérimentation est d'étudier le mouvement du dispositif sur l'avant-bras. Cela inclut la mesure de la portée du mouvement, mais également l'identification des zones de l'avant-bras (en largeur) sur lesquelles le mouvement peut se faire distinctement. Le second objectif est d'étudier la stabilité de l'avant-bras comme support à l'interaction ainsi que celle du dispositif RPM durant son utilisation. En effet, les inclinaisons involontaires du dispositif existent déjà lorsqu'il est utilisé sur un support plat (jusqu'à 12° en moyenne [25]) et peuvent potentiellement avoir un impact sur son utilisabilité.

### 4.2 Tâche

Il a été demandé aux participants de l'expérimentation de réaliser des translations dans différentes directions : en longueur et en largeur avec le dispositif sur l'avant-bras. Un essai est défini comme une translation aller-retour sur l'avant-bras (Fig. 7). Les points de départ des translations étaient choisis par les participants au début de chaque groupe de 10 essais : les points de départ possibles sont le coude et poignet pour les gestes en longueur, et l'intérieur ou l'extérieur de l'avant-bras



pour les gestes en largeur. Le dispositif devait être manipulé avec la main dominante tandis que l'avant-bras de la main non-dominante faisait office de support physique. Les participants devaient faire ces manipulations sur chaque *Zone d'interaction* en largeur, et sur la *Zone d'interaction* de leur choix en longueur (cf. table *Zone d'interaction*), et pour chaque *Pose*. Les différentes poses possibles ainsi que les zones d'interaction ont été expliqués aux participants avant le début de l'expérimentation. Les participants étaient libres de prendre le dispositif en main comme ils le voulaient. Il a été demandé aux participants de se mettre dans la pose demandée le plus confortablement possible. Afin d'étudier la stabilité de l'avant-bras durant l'interaction, il n'a pas été demandé aux participants de garder le bras statique durant l'expérimentation. Le but de l'expérimentation étant d'étudier l'utilisation du dispositif sur l'avant-bras, aucun feedback n'était fourni aux participants.

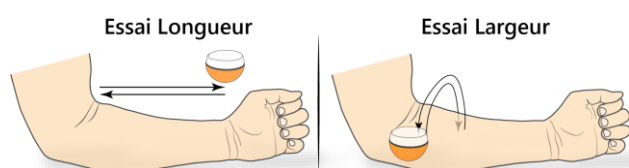


Figure 7: Essai en longueur et largeur

### 4.3 Matériel

Le diamètre de la version de RPM utilisée pour l'expérimentation était de 8cm. Afin de détecter les rotations et inclinaisons involontaires du dispositif, une centrale inertielle (IMU) de la marque x-io Technologies a été utilisée (x-IMU). L'IMU est composé d'un gyroscope à trois axes, d'un accéléromètre et d'un magnétomètre et offre une précision de 1°. Pour localiser la position du dispositif, un système de vision OptiTrack avec 12 caméras a été utilisé. Le système se base sur la détection de billes infrarouges réfléchissantes pour détecter les objets. Il offre une précision de 0.01° en rotation et 1mm en position. Les billes réfléchissantes étaient placées sur le dispositif de sorte à ne pas gêner la prise en main de ce dernier (Fig. 7).

Afin de détecter la position de l'avant-bras ainsi que les différentes poses décrites précédemment, des billes réfléchissantes ont été placées sur les principales articulations du bras/avant-bras (Fig. 8). Le poignet et le coude du bras non-dominant sont localisés ainsi que les deux épaules de l'utilisateur.

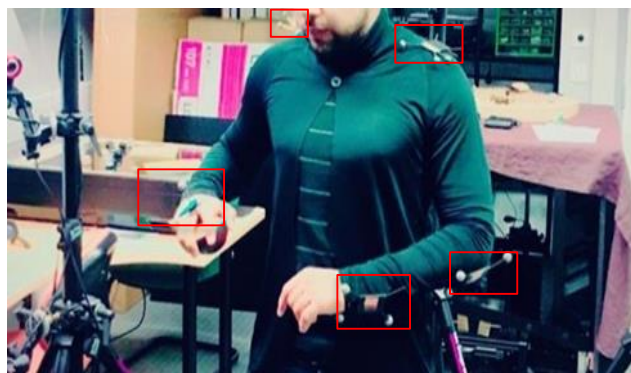


Figure 8: Placement des billes infrarouges

### 4.4 Procédure

L'expérimentation suit un plan inter-sujet 3x4. Les facteurs sont la *Pose* de l'avant-bras (*Devant, Parallèle, Verticale*) et la *Zone d'interaction* (*Longueur de l'avant-bras, Largeur Coude, Largeur Milieu, Largeur Poignet*). Le contrebalancement est fait sur le facteur *Pose* en utilisant un carré latin 3x3. L'étude est donc divisée en 3 blocs et chaque bloc se compose de 4 *Zones d'interaction* dans un ordre aléatoire. Pour chaque combinaison de *Pose* et *Zone d'interaction*, les participants devaient faire 3x10 essais. Les participants pouvaient prendre une pause entre chaque groupe de 10 essais. L'étude durait approximativement 40 minutes. Nous avons collecté 360 essais par participant, 4320 essais au total.

### 4.5 Participants

Nous avons recruté 12 participants (5 femmes) au sein de l'université locale, âgés en moyenne de 26 ans (SD=5,4). Le groupe de participants était composé de 1 ingénieur de recherche, 4 doctorants, 5 étudiants en master et de 2 personnes externes au laboratoire.

### 4.6 Données collectées

Pour chaque participant, nous avons mesuré le tour de l'avant-bras au niveau du coude et du poignet, ainsi que la longueur de l'avant-bras côté intérieur et extérieur (Fig. 9). Pour chaque essai nous avons enregistré la position du dispositif et des marqueurs placés sur le poignet, le coude et les épaules en utilisant le système OptiTrack. Nous avons aussi enregistré les rotations et inclinaisons du dispositif RPM en utilisant l'IMU. Afin d'évaluer la fatigue physique associée à l'utilisation d'un dispositif tangible sur l'avant-bras, nous avons demandé aux participants de remplir un formulaire de Borg [6] pour chacun des couples (*Pose, Zone d'interaction*).

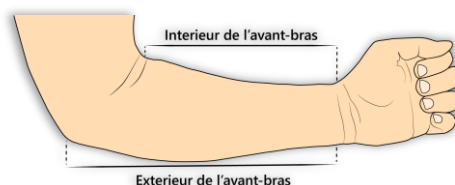


Figure 9: Mesures avant-bras

## 5 RÉSULTATS

Dans cette section, nous présentons en premier lieu les résultats relatifs aux déplacements en l'air de l'avant-bras durant les essais afin d'étudier la stabilité de l'avant-bras, et donc son adéquation en tant que support à l'interaction tangible. Nous présentons ensuite des résultats plus détaillés sur l'utilisation du dispositif sur l'avant-bras.

### 5.1 Déplacements en l'air de l'avant-bras

Pour étudier les déplacements de l'avant-bras pendant les essais, nous mesurons le déplacement des deux articulations de l'avant-bras localisés par le système de vision (coude et poignet). Les déplacements de chacune des deux articulations ont été calculés par rapport à leurs positions de départ (c.-à-d. au début de chaque groupe de 10 essais). Nous représentons les résultats selon les mouvements décrits dans la Fig. 10.

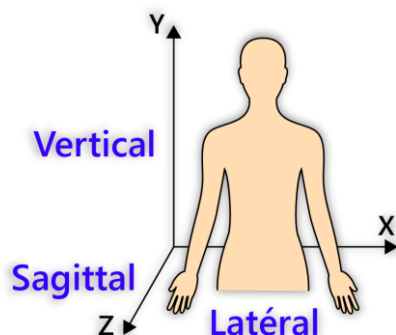


Figure 10: Mouvement -- Axes

Les déplacements du coude (Fig. 11) durant les interactions étaient relativement stables. L'amplitude maximale des déplacements du coude (toutes directions confondues) ne dépassait pas en moyenne les 1.7 cm. Pour ce qui est du poignet (Fig. 11), les valeurs sont proches de celles observées pour le coude. L'amplitude maximale des déplacements du poignet ne dépassait pas en moyenne les 1,57 cm.

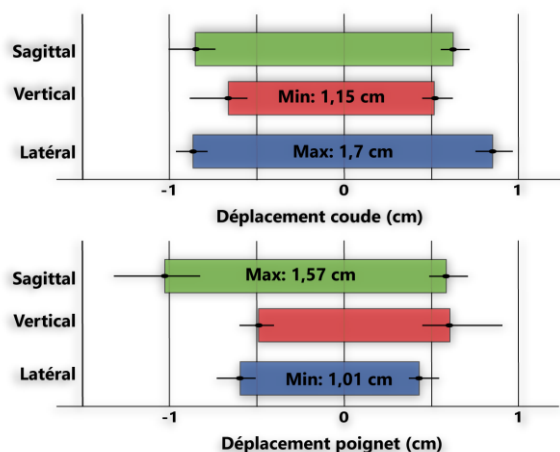


Figure 11 : Déplacement du coude et du poignet

Pour le coude comme pour le poignet, ces résultats restent valables si l'on considère chaque *Pose* indépendamment. Ces résultats permettent donc d'établir que l'avant-bras est un support suffisamment stable pour pouvoir y ancrer une interaction.

## 5.2 Surface exploitée de l'avant-bras

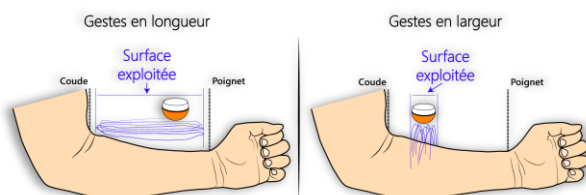


Figure 12: Exemple de surface exploitée pour un groupe de gestes en longueur et largeur

La surface exploitée de l'avant-bras représente la surface couverte par le dispositif au cours des 10 essais consécutifs (Fig. 12). Nous l'avons calculée pour chaque type de geste, i.e. chaque combinaison de *Pose* du bras et *Zone d'interaction*. Étant donné

que la taille de l'avant-bras diffère d'un participant à un autre, nous avons normalisé les données collectées.

### 5.2.1 Surface exploitée en longueur

Lors des translations du dispositif sur la longueur de l'avant-bras, les participants ont exploité une surface allant de 93.6% à 100% de celui-ci (en vert sur la Fig. 13). Pour la pose *Parallèle*, les utilisateurs ont fait des gestes en longueur dépassant le poignet et allant jusqu'au-dessus de la main (d'où les valeurs dépassant le 100% sur la Fig. 13).

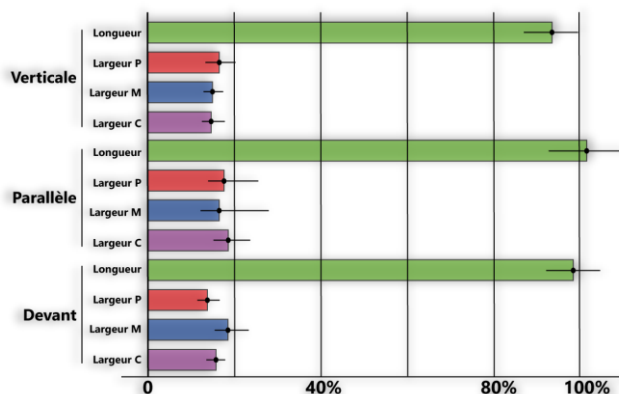


Figure 13 : Surface exploitée de l'avant-Bras

### 5.2.2 Surface exploitée en largeur

Lors des translations du dispositif réalisées autour du bras, donc dans la largeur du bras, la surface de l'avant-bras exploitée pour les gestes en largeur était en moyenne de 15,6% de la longueur totale du bras. Celle-ci allait de 13,8% pour le poignet dans la position *Devant* à 21% pour le coude dans la même position. La plus grande surface exploitée pour un geste en largeur est largement inférieure au 1/3 de l'avant-bras, il est donc possible de considérer l'utilisation de trois sous-parties de l'avant-bras pour des gestes en largeur. Cependant, il faudrait que ces trois sous-parties soient distinctes. Il est donc nécessaire d'étudier la dispersion des surfaces exploitées sur l'avant-bras.

## 5.3 Dispersion des positions du dispositif sur l'avant-bras

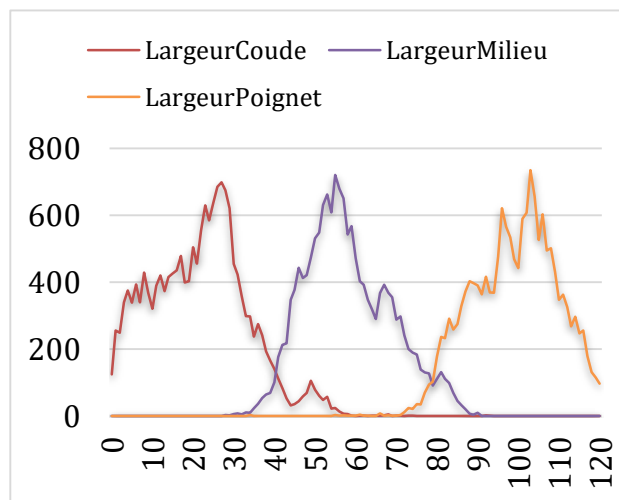


Figure 14: Dispersion des positions du dispositif sur l'avant-bras (0 : Position du coude, 100 : Position du poignet)

Cette mesure représente la répartition des points de contact du dispositif entre le coude et le poignet, durant l'exécution complète de l'expérimentation, soit un ensemble de 360 essais. Les résultats montrent qu'il y a une dispersion assez grande des surfaces exploitées (SE) (Figure 14). Les SE correspondant aux gestes LargeurCoude et LargeurMilieu se chevauchent sur la partie 30 à 60% de l'avant-bras (Figure 14); de même les SE correspondant au geste LargeurMilieu et LargeurPoignet se chevauchent sur la partie 70 à 90% de l'avant-bras. Toutefois il apparaît clairement que les gestes LargeurCoude et LargeurPoignet ont toujours été réalisés sur des zones bien distinctes de l'avant-bras tout au long de l'expérimentation. Enfin, malgré l'instruction qui demandait au participant de réaliser des gestes au niveau du poignet, nous pouvons observer qu'une grande partie de ces gestes ont été faits sur la main i.e. au-delà de la position du poignet (100%).

#### 5.4 Amplitudes de translations du dispositif

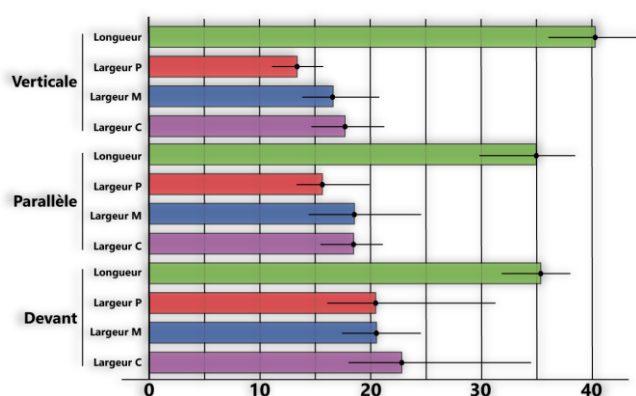


Figure 15 : Amplitudes de translations par type de gestes (cm)

Cette mesure représente la distance parcourue par le dispositif tangible sur la longueur du bras pour les mouvements de types Longueurs, et la longueur de l'arc réalisé avec le dispositif autour du bras pour les gestes de types LargeurCoude / LargeurMilieu ou LargeurPoignet. Nous avons calculé cette mesure afin de connaître la longueur/portée possible avec chaque type de geste.

Il n'y a pas de surprise concernant les gestes en longueur (Fig. 15), ceux-ci sont jusqu'à 2 fois plus longs que les gestes en largeur. Les gestes en longueur dans la pose *Verticale* était 25% plus long que les gestes en longueur dans les autres poses (*Devant* : 35,4 cm, *Parallèle* : 35 cm, *Verticale* : 40,3 cm). Cela est dû au fait que la pose *Verticale* a un accès à l'extérieur de l'avant-bras et donc, à une surface plus grande de celui-ci. Pour ce qui est des gestes en largeur, nous pouvons remarquer que la pose *Devant* est celle qui a permis les gestes les plus longs, même si cette différence n'est pas fortement marquée :

- Le geste LargeurCoude était au minimum 17% plus long dans la pose *Devant* par rapport aux poses *Parallèle* et *Verticale* (*Devant*: 22,8 cm, *Parallèle*: 18,5 cm, *Verticale*: 17,67 cm).
- Le geste LargeurMilieu était au minimum 15% plus long dans la pose *Devant* par rapport aux poses *Parallèle* et *Verticale* (*Devant*: 20,5 cm, *Parallèle*: 18,5 cm, *Verticale*: 16,6 cm).
- Le geste LargeurPoignet était au minimum 25% plus long dans la pose *Devant* par rapport aux poses

*Parallèle* et *Verticale* (*Devant*: 20,4 cm, *Parallèle*: 15,6 cm, *Verticale*: 13,4 cm).

Nous pensons que ces résultats sont dus au confort et à l'accessibilité de la pose *Devant* par rapport aux deux autres poses.

#### 5.5 Inclinaison du dispositif pendant les gestes en largeur

Le dispositif RPM permet de faire des inclinaisons en plus des translations. Afin d'étudier la séparabilité des gestes, nous avons collectés les inclinaisons involontaires du dispositif pour chaque essai et pour chacun des types de gestes considérés. Ces inclinaisons sont calculées relativement à la normale de l'axe de l'avant-bras.

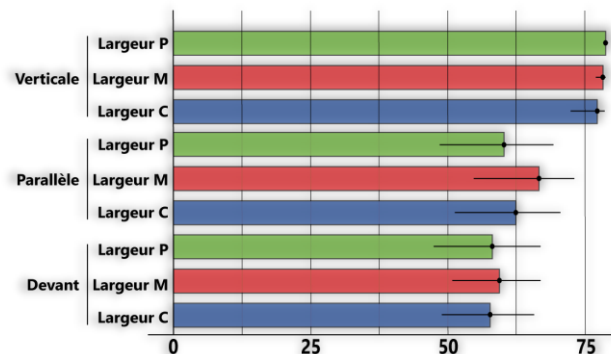


Figure 16 : Inclinaison du dispositif en largeur (degré)

On peut observer sur la Fig. 16 que des inclinaisons du dispositif accompagnent visiblement les translations de celui-ci opérées autour du bras par les participants : RPM n'est donc pas maintenu horizontalement lors de translation autour du bras. Le détail des résultats montre que les participants ont incliné le dispositif de manière plus prononcée dans la pose *Verticale*. L'inclinaison moyenne pour cette pose était de  $\sim 78^\circ$  contre  $\sim 62^\circ$  pour la pose *Parallèle* et  $\sim 58^\circ$  pour la pose *Devant*. Les inclinaisons restaient stables pour tous les types de gestes en largeur (Coude, Milieu, Poignet) pour chacune des poses.

#### 5.6 Inclinaison du dispositif pendant les gestes en longueur

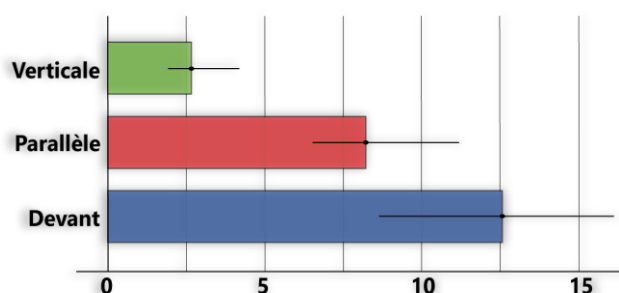


Figure 17: Inclinaison du dispositif en longueur (degré)

Similairement, cette mesure permet d'apprécier l'amplitude des inclinaisons non désirées produite au cours de l'utilisation du dispositif sur l'avant-bras pour les gestes en longueur. Cette mesure est basée sur le calcul de l'inclinaison maximum et de l'inclinaison moyenne pour chaque essai. L'inclinaison moyenne de l'essai a été soustraite à l'inclinaison maximale nous donnant les inclinaisons involontaires pour l'essai en question.

Les résultats montrent qu'en moyenne les inclinaisons involontaires ne dépassaient pas les  $13^\circ$  pour la pose *Devant*,



8,21° pour la pose *Parallèle* et 2,68° pour la pose *Verticale* (Fig. 17). Ces résultats sont en ligne avec l'étude conduite initialement sur RPM et visant à mesurer la stabilité du dispositif : les inclinaisons involontaires de RPM durant une translation avaient été mesurées à 12° en moyenne [25]

## 5.7 Fatigue

L'évaluation des participants va de 'extremely light - 7/8' pour les poses *Devant* et *Parallèle* à 'very light - 9/11' pour la pose *Verticale* (Fig. 18). Les résultats suggèrent que les participants n'ont donc pas jugé les interactions faites avec le dispositif sur l'avant-bras fatigantes et ce, malgré l'utilisation du dispositif durant 25 à 30 minutes. L'évaluation de la pose *Devant*, jugée l'une des moins fatigantes par les participants, est probablement due au confort et à l'accessibilité du coude, du milieu de l'avant-bras et du poignet dans cette pose. Notons également que les participants avaient la possibilité de prendre des pauses durant l'expérimentation entre chaque groupe de 10 essais (36 groupes), mais un seul participant y a eu recours.

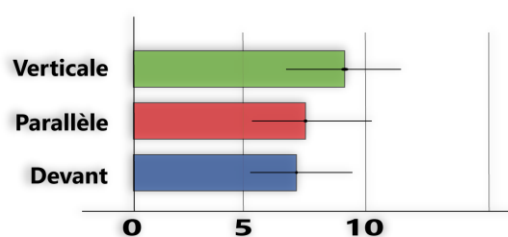


Figure 18: Fatigue

## 6 DISCUSSION

Les résultats présentés dans la section précédente montrent que l'interaction avec le dispositif RPM sur l'avant-bras est prometteuse.

### 6.1 Stabilité de l'avant-bras

Les oscillations du coude et du poignet sont minimales, faisant de l'avant-bras un support suffisamment stable pour appuyer l'interaction.

### 6.2 Zones d'interaction sur l'avant-bras

Malgré les petites surfaces exploitées sur l'avant-bras pour chaque geste en largeur (env. 20%), la dispersion de ces surfaces d'un geste à l'autre ne permettrait a priori pas de considérer plus de deux sous-parties distinctes sur l'avant-bras. Nous pensons toutefois qu'avec un feedback visuel montrant la position de chaque sous-partie sur l'avant-bras dans l'environnement immersif, les trois sous-parties seraient facilement distinguables. Cette hypothèse devra faire l'objet d'une étude complémentaire.

### 6.3 Correspondance entre gestes et tâches

Les résultats ont montré que les gestes en longueur étaient les plus stables (inclinaisons et rotations involontaires conformes à Perelman 2015 [25]) des gestes étudiés et ceux qui offraient la plus grande surface exploitable: potentiellement donc ces gestes permettront de contrôler une gamme de valeur plus large, pour une grande précision ou une couverture plus grande de données. Ceux-ci pourraient par exemple être utilisés pour manipuler des

contrôleurs de type slider qui nécessitent un certain degré de précision selon la donnée manipulée. Par ailleurs, les gestes de type largeur semblent être mieux adaptés aux contrôleurs qui ne nécessitent pas une grande amplitude étant donné la surface d'exploitation limitée de ces gestes. Nous pensons que ceux-ci pourraient alors être associés à des contrôleurs dont le mode de fonctionnement serait de type « Rate Control ». Ils pourraient aussi être utilisés pour le contrôle d'un menu offrant un nombre limité de sous-items, ou encore, pour l'activation d'un mode ou d'un autre (tâches discrètes à deux états). Nous proposons dans la section suivante deux exemples de scénarios d'interaction illustrant un usage concret des interactions tangibles sur le corps.

## 6.4 Usage des autres manipulations physiques de RPM

Bien que les inclinaisons produites de manière involontaires lors d'une translation du dispositif sur la longueur du bras soient conformes aux résultats produits dans Perelman et al. dans [25], il en va différemment pour les inclinaisons observées durant des gestes de translations du dispositif réalisés en largeur, i.e. autour du bras. En effet ces inclinaisons vont jusqu'à 78° quelle que soit la *Pose* du bras et le lieu de cette interaction en largeur. Par conséquent il apparaît impossible de faire une distinction entre une translation du dispositif autour du bras (en largeur) et une inclinaison du dispositif en largeur. Ces deux manipulations applicables au dispositif ne peuvent donc pas être utilisées à des fins distinctes dans le contexte d'interaction exploré dans cette expérimentation.

## 6.5 Version autonome de la solution d'interaction

Pour exploiter pleinement les avantages offerts par l'approche proposée dans ce travail pour l'interaction dans des environnements immersifs, et notamment la possibilité d'interagir partout dans son environnement sans contrainte, le dispositif tangible utilisé doit être complètement autonome. Dans sa version actuelle (version expérimentale du dispositif), les inclinaisons et rotations de RPM proviennent de sa centrale inertielle, tandis que les translations sont fournies par le système de capture de mouvement. L'objectif de ce travail étant d'étudier les différents aspects de mise en œuvre d'une telle approche, nous avons souhaité utiliser le système de capture externe pour ne pas contraindre nos résultats aux limitations d'une technologie donnée pour détecter les translations. Plusieurs solutions intéressantes existent dans la littérature permettant de réaliser une version autonome du dispositif : l'utilisation de caméra RGB [10,11] ; l'utilisation de caméras de profondeur et notamment la kinect [10] ; ou encore, l'utilisation de capteurs tactile [11]. L'approche qui nous semble la plus intéressante est l'utilisation de capteurs tactiles sur le corps, ces capteurs sont légers et ne sont pas envahissants, ils fournissent une grande précision et sont très discrets. Parmi les prototypes existant dans la littérature, nous nous intéressons particulièrement à iSkin [11], un capteur tactile que l'on peut mettre directement sur la peau (Figure 19), il est fin, flexible et extensible. De plus, il peut être produit sous différentes formes et tailles pour convenir à plusieurs parties du corps. Celui-ci a été démontré très précis. Ce capteur détecte le toucher tactile comme un capteur capacitif standard. Afin d'implémenter la solution, il conviendrait de recouvrir le bas de la RPM avec une

peinture conductrice. Il serait intéressant d'implémenter une telle solution et de l'évaluer plus en profondeur.



Figure 19: iSkin, capteur tactile pour le corps

## 7 SCENARIOS D'UTILISATION

Sur la base des conclusions établies à l'issue de notre expérimentation, nous illustrons maintenant l'utilisation de l'approche présentée dans cet article à travers deux scénarios d'utilisation concrets : le premier est un scénario simple de manipulation d'objet 3D, le second scénario est un exemple plus complexe et concerne l'interaction avec des données multidimensionnelles.

### 7.1 Design d'intérieur

Jeremy est un décorateur d'intérieur. Il repense l'intérieur des maisons de ses clients de sorte à les rendre plus plaisantes et fonctionnelles. L'une des prestations que Jeremy fournit est le choix et la combinaison de mobilier pour créer des espaces uniques pour ses clients. Jeremy utilise un casque à réalité mixte (Hololens) pour voir le rendu du mobilier choisi dans l'espace à décorer. Il utilise RPM sur le corps pour déplacer, faire pivoter et changer l'échelle des versions virtuelles du mobilier.

Pour déplacer les meubles dans l'espace à décorer, Jeremy utilise RPM en longueur sur l'avant-bras. Il met son avant-bras dans la pose représentant le déplacement à faire et ajuste la position du meuble en réalisant des translations de RPM en longueur sur son avant-bras. Par exemple, s'il veut rapprocher le meuble vers lui, il place son avant-bras dans la pose *Devant* et réalise des translations de RPM en longueur du poignet vers son coude, alors que la pose *Parallèle* lui permet de déplacer le meuble à droite/gauche. La pose *Verticale* lui permet d'ajuster la hauteur d'un cadre photo ou d'un miroir par exemple.

Jeremy peut aussi faire pivoter les meubles en utilisant le même principe que pour les translations. Il met son avant-bras dans la pose représentant l'axe selon lequel faire les rotations et réalise des translations en largeur sur l'avant-bras, selon la direction de la rotation à faire.

### 7.2 Exploration de données

Emily travaille dans le domaine du contrôle aérien. Une partie de son travail consiste en l'amélioration de la gestion du trafic dans la tour de contrôle [15] (analyse de conflits antérieurs, amélioration de l'empreinte écologique, augmentation du profit en améliorant les trajectoires ...). Pour cela, elle doit analyser a posteriori les données aériennes des avions (position, altitude, vitesse ...) de manière régulière [15]. Les données qu'Emily manipule sont multidimensionnelles : la combinaison de position, temps, altitude et vitesse permet de décrire des parcours d'avions complets, de leurs décollages à leurs atterrissages. Ces données peuvent tirer profit d'un ancrage spatial des données pour une compréhension optimale. En effet, en ancrant le volume de données aériennes sur un mur par exemple, elle peut se déplacer autour afin d'avoir des points de

vue différents : en regardant en direction du mur, les points à forte concentration ce sont vraisemblablement les aéroports ; en regardant de côté, elle peut percevoir les altitudes les plus utilisées par les avions ; enfin en tournant le dos au mur, elle peut observer les principaux couloirs aériens.

Emily utilise donc un casque semi-transparent (Hololens) pour visualiser les données et notre dispositif (RPM) pour les manipuler. Les tâches qu'Emily réalise sur les données sont les suivantes [9, 15] : sélection de données en utilisant des range-sliders, application d'une commande sur les données sélectionnées (par exemple sous-échantillonnage de données), changement de couleur, changement d'échelle, etc ...

Emily a configuré son système de telle façon que chaque pose de l'avant-bras représente une coordonnée dans l'espace de visualisation : l'altitude est représentée par la pose *Devant*, la longitude par la pose *Parallèle* et la latitude par la pose *Verticale*. L'utilisation des range-sliders consiste à positionner deux curseurs sur un même slider : l'un, définit la valeur minimale et l'autre la valeur maximale. Pour le contrôler, Emily utilise les translations en longueur de RPM sur l'avant-bras. Le choix du curseur à déplacer se fait automatiquement selon la position de départ de RPM sur l'avant-bras : si RPM est posé sur l'avant-bras côté poignet, le curseur définissant la valeur maximale est manipulé ; si RPM est mis sur l'avant-bras côté coude, le curseur définissant la valeur minimale est manipulé ; et enfin si RPM est posé au milieu de l'avant-bras, les deux curseurs sont déplacés simultanément en conservant la longueur de plage initialement définie.

Emily peut aussi déplacer les curseurs de manière plus fine pour faire des sélections avec plus de précision, Emily réalise cela en faisant des translations en largeur sur l'avant-bras. Des translations en largeur côté poignet translate le curseur max, côté coude le curseur min et au milieu les deux curseurs en simultané.

## 8 PERSPECTIVES

La prochaine étape de ce travail concernera l'implémentation et évaluation des scénarios précédents. Nous allons préalablement mener des études expérimentales pour valider la précision et utilisabilité des gestes pour des tâches élémentaires (par exemple déplacement d'un slider).

En raison de la complexité de l'étude réalisée ainsi que le potentiel effet que peut avoir une manipulation physique sur une autre, nous avons décidé d'étudier les manipulations physiques séparément et donc de limiter l'étude, dans un premier lieu, aux translations avec le dispositif. Nous souhaiterions étudier dans la suite de ce travail les inclinaisons avec le dispositif et par conséquent les gestes combinés. L'étude décrite dans cet article met en lumière l'impossibilité de distinguer les translations des inclinaisons pour les gestes en largeur. Ce résultat ferme aussi la porte à l'exploitation de gestes combinés (translation et rotation en simultané) pour les gestes en largeur. Les gestes en longueur permettent cela de par leur stabilité. On peut donc réfléchir à des utilisations du dispositif qui exploiteraient des manipulations combinées du dispositif.

Concernant l'implémentation d'une telle solution, nous pensons qu'une interaction tangible sur le corps, exploitant les trois poses de l'avant-bras considérées dans cette expérimentation, peut s'abstenir de localiser la position des bras en temps réel : de par leur stabilité respective, il apparaît en effet suffisant de localiser la position du dispositif tangible par rapport au

participant pour pouvoir en déduire la *Pose* de l'avant-bras et donc déclencher le comportement adéquat du système (commande, menu, etc.). Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'implémentation d'une telle approche.

## 9 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle approche d'interaction avec des visualisations Immersives. Cette approche se base sur l'utilisation de l'avant-bras comme support physique à l'interaction avec un dispositif à plusieurs degrés de liberté et ce, en exploitant la proprioception de l'utilisateur. Cette combinaison offre les degrés de liberté nécessaires tout en minimisant la fatigue. Nous avons proposé un espace de conception pour cette approche décrivant la *Pose* dans laquelle se fait l'interaction, la *Zone d'interaction* sur l'avant-bras, la portée de l'interaction ainsi que les types de manipulations réalisées sur l'avant-bras. Pour valider la faisabilité d'une telle approche, nous avons réalisé une expérience visant à établir la stabilité de l'avant-bras, la portée des manipulations du dispositif (RPM) ainsi que le confort de ce type d'interactions. Les résultats montrent que l'interaction avec ce dispositif est stable, permet des gestes amples sur l'avant-bras et que l'utilisation d'un feedback visuel adapté permettrait de considérer trois sous-parties de l'avant-bras pour l'interaction de manière confortable et peu fatigante. Nous avons finalement illustré l'usage concret d'une telle interaction via deux scénarios d'usage.

## REFERENCES

- Bach, B., Sicat, R., Beyer, J., Cordeil, M., Pfister, H. The Hologram in My Hand: How Effective is Interactive Exploration of 3D Visualizations in Immersive Tangible Augmented Reality? IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), 2018, IEEE VIS (InfoVis)
- Michel Beaudouin-Lafon. 2000. Instrumental interaction: an interaction model for designing post-WIMP user interfaces. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00). ACM, New York, NY, USA, 446-453. DOI=http://dx.doi.org/10.1145/332040.332473
- Louis-Pierre Bergé, Marcos Serrano, Gary Perelman, and Emmanuel Dubois. 2014. Exploring smartphone-based interaction with overview+detail interfaces on 3D public displays. In Proceedings of the 16th international conference on Human-computer interaction with mobile devices & services (MobileHCI '14). ACM, New York, NY, USA, 125-134. DOI: https://doi.org/10.1145/2628363.2628374
- Louis-Pierre Bergé, Emmanuel Dubois, and Mathieu Raynal. 2015. Design and Evaluation of an "Around the SmartPhone" Technique for 3D Manipulations on Distant Display. In Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '15). ACM, New York, NY, USA, 69-78. DOI: https://doi.org/10.1145/2788940.2788941
- Lonni Besançon, Paul Issartel, Mehdi Ammi, and Tobias Isenberg. 2017. Mouse, Tactile, and Tangible Input for 3D Manipulation. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17). ACM, New York, NY, USA, 4727-4740. DOI: https://doi.org/10.1145/3025453.3025863
- Borg, G. Borg's Perceived Exertion and Pain Scales. Human Kinetics (1998), viii 104pp
- R. Burgess, A. J. Falcão, T. Fernandes, R. A. Ribeiro, M. Gomes, A. Krone-Martins, and A. M. de Almeida. Selection of large-scale 3d point cloud data using gesture recognition. In Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, pages 188-195. Springer, 2015
- S. Clarke, N. Dass, and D. H. P. Chau. Naturalmotion: Exploring gesture controls for visualizing time-evolving graphs. Proceedings of IEEE VIS (poster session), 2016.
- Maxime Cordeil, Tim Dwyer, and Christophe Hurter. 2016. Immersive solutions for future Air Traffic Control and Management. In Proceedings of the 2016 ACM Companion on Interactive Surfaces and Spaces (ISS Companion '16). ACM, New York, NY, USA, 25-31. DOI: https://doi.org/10.1145/3009939.3009944
- David Dobbstein, Philipp Hock, and Enrico Rukzio. 2015. Belt: An Unobtrusive Touch Input Device for Head-worn Displays. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15). ACM, New York, NY, USA, 2135-2138. DOI: https://doi.org/10.1145/2702123.2702450
- Bernd Fröhlich and John Plate. 2000. The cubic mouse: a new device for three-dimensional input. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00). ACM, New York, NY, USA, 526-531. DOI=http://dx.doi.org/10.1145/332040.332491
- Harrison, C., Benko, H., and Wilson, A. D. OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In ACMUIST '11(2011), 441
- Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. 2010. Skinput: appropriating the body as an input surface. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10). ACM, New York, NY, USA, 453-462. DOI: https://doi.org/10.1145/1753326.1753394
- Hinckley, K., Wigdor, D., Input Technologies and Techniques. Chap. 9 in The HCI Handbook, 3rd Edition, Taylor & Francis
- Christophe Hurter, Benjamin Tissoires, and Stéphane Conversy. 2009. FromDaDy: Spreading Aircraft Trajectories Across Views to Support Iterative Queries. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 15, 6 (November 2009), 1017-1024. DOI=http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2009.145
- 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
- Thorsten Karrer, Moritz Wittenhagen, Leonhard Lichtschlag, Florian Heller, and Jan Borchers. 2011. PinStripe: eyes-free continuous input on interactive clothing. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11). ACM, New York, NY, USA, 1313-1322. DOI: https://doi.org/10.1145/1978942.1979137
- T. Klein, F. Guénat, L. Pastur, F. Vernier, and T. Isenberg. A design study of direct-touch interaction for exploratory 3d scientific visualization. In Computer Graphics Forum, volume 31, pages 1225-1234. Wiley Online Library, 2012.
- Lexip 3D <http://www.amazon.fr/Lexip-3DM-PRO-Souris-Filaire-Noir/dp/B00IZU1NE4>
- D. Lopez, L. Oehlberg, C. Doger, and T. Isenberg. Towards An Understanding of Mobile Touch Navigation in a Stereoscopic Viewing Environment for 3d Data Exploration. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 22(5):1616-1629, May 2016
- P. Milgram and H. Colquhoun. A taxonomy of real and virtual world display integration. Mixed reality: Merging real and virtual worlds, 1:1-26, 1999
- B. P. Miranda, N. J. S. Carneiro, C. G. R. dos Santos, A. A. de Freitas, J. Magalhães, B. S. Meiguins, et al. Categorizing issues in mid-airinfovis interaction. In Information Visualisation (IV), 2016 20th International Conference, pages 242-246. IEEE, 2016
- Mistry, P., Maes, P., and Chang, L. WUW - wear Urworld. In ACM CHI EA '09(2009), 4111
- Michael Ortega and Laurence Nigay. 2009. AirMouse: Finger Gesture for 2D and 3D Interaction. In Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction: Part II (INTERACT '09), Tom Gross, Jan Gulliksen, Paula Kotzé, Lars Oestreicher, Philippe Palanque, Raquel Oliveira Prates, and Marco Winckler (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 214-227. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03658-3\_28
- Gary Perelman, Marcos Serrano, Mathieu Raynal, Celia Picard, Mustapha Derras, and Emmanuel Dubois. 2015. The Roly-Poly Mouse: Designing a Rolling Input Device Unifying 2D and 3D Interaction. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15). ACM, New York, NY, USA, 327-336. DOI: https://doi.org/10.1145/2702123.2702244
- David Rudi, Ioannis Giannopoulos, Peter Kiefer, Christian Peier, and Martin Raubal. 2016. Interacting with Maps on Optical Head-Mounted Displays. In Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction (SUI '16). ACM, New York, NY, USA, 3-12. DOI: https://doi.org/10.1145/2983310.2985747

27. Houssein Saidi, Marcos Serrano, Pourang Irani, and Emmanuel Dubois. 2017. TDome: A Touch-Enabled 6DOF Interactive Device for Multi-Display Environments. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. ACM, New York, NY, USA, 5892-5904. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025661>
28. Marcos Serrano, Barrett M. Ens, and Pourang P. Irani. 2014. Exploring the use of hand-to-face input for interacting with head-worn displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 3181-3190. DOI: <https://doi.org/10.1145/2556288.2556984>
29. Shu-Yang Lin, Chao-Huai Su, Kai-Yin Cheng, Rong-Hao Liang, Tzu-Hao Kuo, and Bing-Yu Chen. 2011. Pub - point upon body: exploring eyes-free interaction and methods on an arm. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '11)*. ACM, New York, NY, USA, 481-488. DOI: <https://doi.org/10.1145/2047196.2047259>
30. Tamaki, E., Miyak, T., and Rekimoto, J. BrainyHand: AWearable Computing Device Without HMD and It's Interaction Techniques. In *AVI '10(2010)*, 387-388.
31. Peng Song, Woon Boon Goh, Chi-Wing Fu, Qiang Meng, and Pheng-Ann Heng. 2011. WYSIWYF: exploring and annotating volume data with a tangible handheld device. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)*. ACM, New York, NY, USA, 1333-1342. DOI: <https://doi.org/10.1145/1978942.1979140>
32. Dong-Bach Vo, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. 2014. Belly gestures: body centric gestures on the abdomen. In *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational (NordiCHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 687-696. DOI: <https://doi.org/10.1145/2639189.2639210>
33. Julie Wagner, Mathieu Nancel, Sean G. Gustafson, Stephane Huot, and Wendy E. Mackay. 2013. Body-centric design space for multi-surface interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. ACM, New York, NY, USA, 1299-1308. DOI: <https://doi.org/10.1145/2470654.2466170>
34. Martin Weigel, Tong Lu, Gilles Bailly, Antti Oulasvirta, Carmel Majidi, and Jürgen Steimle. 2015. iSkin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 2991-3000. DOI: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702391>
35. Shumin Zhai and Paul Milgram. 1998. Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '98)*, Clare-Marie Karat, Arnold Lund, Joëlle Coutaz, and John Karat (Eds.). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 320-327. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/274644.274689>