

Evaluation d'une Interface Tactile pour le Pilotage de Fauteuils Roulants Electriques pour des Personnes Atteintes de Maladies Neuromusculaires

Youssef Guedira, Delphine Dervin, Pierre-Eric Brohm, René Farcy, Yacine Bellik

► **To cite this version:**

Youssef Guedira, Delphine Dervin, Pierre-Eric Brohm, René Farcy, Yacine Bellik. Evaluation d'une Interface Tactile pour le Pilotage de Fauteuils Roulants Electriques pour des Personnes Atteintes de Maladies Neuromusculaires. Journal d'Interaction Personne-Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM), 2019, Volume 8, Issue 1, Special issue : the best of IHM'2018. hal-02393416

HAL Id: hal-02393416

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02393416>

Submitted on 4 Dec 2019

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.

Evaluation d'une Interface Tactile pour le Pilotage de Fauteuils Roulants Electriques pour des Personnes Atteintes de Maladies Neuromusculaires

Youssef GUEDIRA

Campus Universitaire d'Orsay,
bâtiment 507, Rue John Von
Neumann, 91400 Orsay, France

Delphine DERVIN

Centre de Rééducation
Fonctionnelle Le Brassat, 14 Rue
Louis Braille, 77100 Meaux,
France

Pierre-Eric BROHM

Centre de Rééducation
Fonctionnelle Le Brassat, 14 Rue
Louis Braille, 77100 Meaux,
France

René FARCY

Campus Universitaire d'Orsay,
bâtiment 505, Rue du Belvédère,
91400 Orsay

Yacine BELLIK

Campus Universitaire d'Orsay,
bâtiment 507, Rue John Von
Neumann, 91400 Orsay, France

Yacine.bellik@limsi.fr

Evaluation of a touch interface for the control of electric wheelchairs for people suffering from neuromuscular diseases.

Abstract. Power wheelchairs remain an efficient means of regaining mobility for many people around the world. Unfortunately, some are not able to use power wheelchairs because of difficulties using a standard joystick. People with neuromuscular diseases who experience a loss in muscular strength find it difficult to use of a joystick. In this paper, we explore steering power wheelchairs using a tactile interface on a smartphone. Eleven users with neuromuscular diseases tried this type of steering in free learning sessions. Four among them were able to take part in an experiment where we evaluated their kinematic performance between the use of the tactile steering interface and the joystick. The paper presents data and observations from both sessions and tries to detect tendencies and draw hypotheses that can guide further and in-depth clinical testing of the tactile steering for wheelchair users suffering from neuromuscular diseases. Overall, the user performance with the tablet was close or the same as their performance with the joystick. In addition, the users reported a lesser level of physical demand of the tactile steering over the joystick

Key words: Power wheelchair, tactile interface, joystick, kinematic evaluation, neuromuscular diseases.

Résumé. Les fauteuils roulants électriques constituent un moyen efficace de retrouver une certaine mobilité pour de nombreuses personnes dans le monde. Malheureusement, certaines ne sont pas en mesure d'utiliser un fauteuil roulant électrique en raison de difficultés éprouvées lors de l'utilisation d'un joystick standard. Les personnes atteintes de maladies neuromusculaires souffrant d'une perte de force musculaire ont du mal à utiliser un joystick. Dans cet article, nous explorons l'utilisation d'une interface tactile sur un smartphone pour le pilotage de fauteuils roulants électriques. Onze utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires ont testé notre prototype lors de séances d'initiation. Parmi eux, quatre ont pu participer à une expérience dans laquelle nous avons évalué leur performance cinématique lors de l'utilisation de l'interface de pilotage tactile et du joystick. Cet article présente des données et des observations issues de ces deux campagnes (initiation et évaluation), met en évidence des tendances et dégage des hypothèses qui peuvent guider vers des essais cliniques plus approfondis concernant le pilotage tactile pour des utilisateurs de fauteuils roulants souffrant de maladies neuromusculaires. Dans l'ensemble, les performances des utilisateurs avec la tablette étaient proches de celles du joystick. En outre, les utilisateurs ont signalé un sentiment de moindre fatigue physique avec l'interface tactile par rapport au joystick.

Mots-clés : Fauteuil roulant électrique, interface tactile, joystick, maladies neuromusculaires, évaluation cinématique.

Édité par Joëlle Coutaz, Université de Grenoble et Patrick Girard, Université de Poitiers

Soumis le 15 juin 2019 – Accepté le 30 septembre 2019

1 INTRODUCTION

La mobilité constitue un bienfait majeur pour les êtres humains. Malheureusement, de nombreuses personnes atteintes d'un handicap moteur ne sont pas en mesure d'en profiter. De nombreux dispositifs ont été utilisés pour pallier à ce problème et aider les personnes à mobilité réduite à retrouver une certaine mobilité autonome. Les fauteuils roulants électriques en sont un exemple. Ils peuvent s'adapter à des situations exigeant une vitesse faible (en intérieur) ou élevée (en extérieur). Le dispositif usuel de pilotage fourni par les constructeurs de fauteuils roulants est le joystick (Kirkby 2016). Ce dispositif est un transducteur de force et de déplacement qui requiert un certain niveau de force musculaire pour arriver à bien le manier. Cela peut poser des problèmes à certaines personnes atteintes de maladies neuromusculaires qui peuvent trouver ce dispositif difficile à utiliser. Cette population souffre en effet, à des degrés divers, d'une perte de force musculaire, qui peut rendre le joystick difficile, voire impossible à utiliser.

Divers dispositifs ont été utilisés pour remédier à la non-compatibilité d'un joystick avec le handicap de l'utilisateur. Cependant, beaucoup de ces solutions ne répondent pas aux besoins des personnes atteintes de maladies neuromusculaires. Dans des publications antérieures (Guedira et al. 2016), nous avons introduit une nouvelle interface tactile de pilotage sur smartphone ou tablette pouvant potentiellement remplacer le joystick pour les personnes ayant des difficultés à l'utiliser. Notre hypothèse est que l'interface tactile est moins exigeante qu'un joystick standard en termes de force physique nécessaire pour piloter le fauteuil. En outre, le smartphone peut servir de plateforme "universelle" pour diverses applications afin de permettre à l'utilisateur non seulement de piloter son fauteuil, mais également d'interagir avec les objets connectés et les technologies domotiques. Le smartphone peut également permettre à l'utilisateur du fauteuil de communiquer avec son entourage en cas de problème d'élocution. Guerrier et al. (2018) ont ainsi étudié l'utilisation d'une plateforme de pictogrammes et de bouts de textes grâce auxquels l'utilisateur peut former des phrases synthétisées vocalement pour l'aide à la communication. Bien que cet outil soit principalement destiné à des personnes qui souffrent de paralysie cérébrale¹, il peut potentiellement servir à d'autres populations comme certains cas de maladies neuromusculaires. De plus, l'outil intègre une fonctionnalité d'alerte qui peut servir à appeler de l'aide en cas de besoin.

Une campagne de tests avec des personnes atteintes de maladies neuromusculaires peut s'avérer complexe à mettre en place en raison de la situation des personnes concernées. Afin de bien préparer notre étude et minimiser au maximum les efforts qui seront demandés aux participants, nous avons commencé par évaluer notre interface tactile avec deux types d'utilisateurs différents. Nous avons d'abord effectué une évaluation préliminaire avec des utilisateurs non handicapés (Guedira et al. 2017) afin de détecter ce qui devait être amélioré dans le protocole d'expérimentation. Puis nous avons procédé à une évaluation similaire, mais avec des utilisateurs de fauteuils roulants (Guedira et al. 2018). Ces derniers souffraient d'un handicap moteur mais n'étaient pas atteints de maladies neuromusculaires. Bien que la taille de la population avec laquelle nous avons évalué l'interface tactile dans ces deux études n'était pas assez grande pour permettre des généralisations, nous avons pu constater que l'interface tactile peut parfois avoir des performances similaires, voire meilleures, que le joystick. Cela dépend fortement des caractéristiques de la personne et de son expérience antérieure dans l'utilisation d'une interface tactile. Nous avons également pu remarquer que la personne qui a obtenu les meilleurs résultats avec la tablette préférerait l'utiliser en lieu et place du joystick.

¹ La paralysie cérébrale est une maladie, engendrée dans plusieurs cas par un accident cérébral périnatal, qui impacte la fonction motrice et cognitive de la personne. (Kriger 2006)

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une d'évaluation de l'interface tactile de pilotage, mais avec des utilisateurs souffrant de maladies neuromusculaires. Pour chaque participant à l'étude, nous avons d'abord conduit une session d'initiation. Ensuite, au cours de deux sessions distinctes, le participant doit effectuer diverses tâches courantes de la vie quotidienne, avec tantôt le joystick, tantôt l'interface tactile, afin de comparer les performances respectives de ces deux dispositifs, le but étant de détecter d'éventuelles tendances susceptibles d'orienter les futurs essais cliniques.

Le reste de l'article est organisé comme suit : Nous décrivons d'abord quelques problèmes majeurs auxquels font face les personnes souffrant de maladies neuromusculaires et comment les manifestations de ces problèmes peuvent influencer sur la conception d'un système interactif. Ensuite, nous décrivons certaines technologies utilisées dans le passé afin de fournir aux utilisateurs de fauteuils roulants électriques des moyens de conduite plus faciles à manipuler qu'un joystick. Nous donnons ensuite une brève description de notre interface tactile permettant de piloter un fauteuil roulant électrique et en présentons les principales caractéristiques pertinentes pour l'étude. Nous décrivons alors l'évaluation de cette interface en deux étapes : La première concerne les sessions d'initiation. Nous décrivons des observations issues de ces séances et comment elles peuvent être utiles pour accompagner les utilisateurs dans leur première utilisation de l'interface tactile de pilotage. La deuxième étape porte sur une évaluation cinématique au cours de laquelle nous comparons les performances des utilisateurs, dans des tâches courantes de la vie quotidienne, tantôt en utilisant l'interface tactile, tantôt en utilisant leur propre joystick.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Des directives clefs dans la conception d'un système interactif pour des personnes atteintes de maladies neuromusculaires.
- ✓ Présentation d'une interface tactile pour le pilotage de fauteuils roulants électriques.
- ✓ Validation d'une méthode progressive qui facilite la prise en main de l'interface tactile.
- ✓ Comparaison cinématique de la performance entre l'utilisation de l'interface tactile et du joystick pour des personnes atteintes de maladies neuromusculaires.
- ✓ Etablissement de tendances visant à guider une future étude clinique concernant le pilotage à l'aide de l'interface tactile.

2 MALADIES NEUROMUSCULAIRES

Dans cette section, nous présentons brièvement certains des défis auxquels sont confrontés les personnes souffrant de maladies neuromusculaires. Nous présenterons ensuite comment ces défis peuvent affecter la conception d'un système interactif.

2.1 Définition

Les maladies neuromusculaires constituent un grand spectre de maladies dégénératives qui provoquent une anomalie de la fonction musculaire. Ces maladies peuvent résulter de mutations génétiques, comme dans le cas de la maladie de Duchenne (Ascadi 2019), et ont pour effet d'entraver par la suite la fonction motrice et parfois la fonction cognitive. Dans d'autres cas, la prise de certains médicaments comme les "agents hypolipémiants (abaissants de lipides)" peut avoir des effets secondaires négatifs sur la fonction motrice (Valiyil et al. 2010).

Selon la partie de la chaîne motrice touchée par la maladie, celles-ci peuvent être classées en :

- **Neuropathies** : maladies affectant les voies neuronales qui transmettent les instructions de mouvement aux muscles. Elles provoquent des interruptions affectant la circulation des informations électriques à travers les nerfs du système neural périphérique. La maladie de Charcot² en est un exemple.
- **Maladies de la jonction neuromusculaire** : maladies qui affectent la jonction chimique qui transmet des informations entre les nerfs et les muscles. Même si les informations transitent du cerveau par les nerfs, elles ne sont pas transmises correctement aux muscles. La myasthénie, une maladie auto-immune, en est un exemple (Juel et Massey 2007).
- **Myopathies** : maladies affectant le tissu musculaire, entraînant une déficience physique directement au niveau des muscles. De telles maladies peuvent provoquer des dépôts qui bloquent la fonction des muscles, des insuffisances en substances essentielles à la fonction musculaire ou une altération entraînant une fonte musculaire. L'une des maladies les plus connues dans ce domaine est la dystrophie musculaire de Duchenne (DMD), qui affecte environ 1 sur 3 500 naissances mâles dans le monde (Haslet et al. 2002).

Les maladies neuromusculaires peuvent affecter négativement les capacités motrices, perceptives, cognitives et sociales des patients. Il est à noter que les avancements techniques médicaux des dernières décennies ont permis de prolonger l'espérance de vie de ces patients. Ceci a permis aux chercheurs de pouvoir mieux évaluer les implications de telles maladies sur la vie quotidienne ainsi que leur progression dans le temps. Dans la sous-section qui suit, nous présentons quelques manifestations de telles maladies que nous illustrerons principalement à travers le syndrome de Duchenne

2.2 Manifestations majeures des maladies neuromusculaires

2.2.1 Faiblesse et fatigue musculaire

La faiblesse musculaire est la caractéristique dominante chez les personnes atteintes de maladies neuromusculaires. Elle peut être localisée ou généralisée selon la maladie et son avancement chez la personne (Jasvinder 2011).

En plus de la faiblesse musculaire, les maladies neuromusculaires peuvent aussi induire une fatigue musculaire. Nous distinguons les deux cas car dans le premier, la force pour exécuter un mouvement n'est pas présente. Dans le deuxième, la personne peut avoir la force d'exécuter le mouvement mais se fatigue d'une manière anormalement rapide. Dans les deux cas, la personne est anormalement incapable d'exécuter certains mouvements demandant l'intervention des muscles touchés.

Par exemple, les patients atteints de la maladie de Duchenne ont une faiblesse plus prononcée au niveau des membres inférieurs. Ceci entraîne une perte de mobilité à un très jeune âge. La faiblesse musculaire peut également être accompagnée de douleurs et/ou crampe musculaires (Valiyil et al. 2010).

La faiblesse musculaire peut également toucher des muscles responsables de fonctions essentielles comme l'avalement ou la respiration comme dans certains cas d'hyperthyroïdie (Jasvinder 2011). Ceci peut nécessiter l'utilisation d'aides techniques à la respiration. D'autres muscles faciaux peuvent aussi souffrir d'une faiblesse ce qui rend plus difficile le contrôle précis du regard, du mouvement des paupières (Harada et al. 1999) ou plus généralement de l'expression faciale (Rivner et al. 2018).

² "Maladie neurologique à évolution rapide presque toujours mortelle et qui attaque directement les cellules nerveuses (neurones) responsables du contrôle des muscles volontaires " <https://maladiedecharcot.org/>

En ce qui concerne la faiblesse des muscles moteurs, nous pouvons distinguer deux catégories de muscles : les muscles proximaux (plus proches du tronc comme au niveau de l'épaule) et les muscles distaux (plus loin du tronc comme les muscles de l'avant-bras). Lorsque ces derniers sont atteints, cela entraîne une faible motricité fine dans le sens où la main et/ou les doigts sont incapables de fournir la force nécessaire pour accomplir une certaine tâche. De même pour les muscles proximaux, la personne aura du mal à exécuter des mouvements amples. En plus de l'amplitude du mouvement, la vitesse d'exécution ainsi que la force générée afin de manipuler un objet d'intérêt peuvent être affectées (Jasvinder 2011). Les maladies neuromusculaires sont progressives dans la plupart des cas. Cette progression va généralement des muscles proximaux aux muscles distaux (Troise et al. 2014).

Le niveau de faiblesse musculaire peut varier dans le temps (Cyrulnik et Hinton 2008). La perte de force et/ou la fatigue peut même évoluer au cours d'une même journée. Le niveau de force musculaire peut fluctuer en terme de temps (plus la journée progresse plus la personne perd de force) ou bien en fonction de facteurs externes comme la température. En effet, la baisse de température peut affecter négativement le niveau de force musculaire.

Il est à noter que dans le cas de certaines maladies neuromusculaires comme celles causées par l'hypothyroïdie (Sowmini et al. 2013) ou certaines neuropathies (Rowland 1985), la personne peut souffrir de douleurs et/ou crampes musculaires. La personne peut également développer des contractures et des spasmes qui induisent des mouvements involontaires, ce qui nuit à la précision du mouvement de la personne, déjà affaiblie par le manque de force musculaire.

2.2.2 Déficit perceptif

Costa et al. (2007) ont rapporté un daltonisme (rouge-vert uniquement) chez des personnes atteintes du syndrome de Duchenne. Cette déficience n'a pas été progressive dans le temps selon l'étude. Ces personnes présentaient également un potentiel évoqué (signal cérébral en réponse à un stimulus) visuel plus réduit que la normale, contrairement au potentiel évoqué auditif qui ne semblait pas impacté. Le déficit visuel peut être causé par une faiblesse au niveau des muscles oculomoteurs ce qui engendre des difficultés à bien contrôler le regard et/ou l'ouverture et fermeture des paupières comme dans le cas de myasthénie (Harada et al. 1999 & Scherer et al. 2005).

En ce qui concerne la perception tactile, Troise et al. (2014) n'ont pas détecté de déficience chez les personnes atteintes du syndrome de Duchenne, de même pour la proprioception. Par contre, Vinik et al. (1995) ont rapporté que la sensation tactile peut être affectée chez les personnes souffrant de neuropathies comme dans le cas de diabète qui nuit aux extrémités nerveuses des doigts.

2.2.3 Déficit cognitif

Certaines maladies neuromusculaires peuvent engendrer des déficits cognitifs. Selon Nardes et al (2011), le déficit mental n'est pas corrélé à la sévérité du déficit moteur. Contrairement à ce dernier, le déficit ne semble pas être progressif. Il peut quand même y avoir un lien entre les causes du déficit moteur et cognitif. Par exemple, les dystrophies (comme la maladie de Duchenne ou la Myotonie dystrophique type 1 et 2) sont caractérisées par un manque de dystrophine, une matière chimique présente dans le cerveau et dans les muscles. Ceci entraîne un dysfonctionnement du muscle et/ou de la région cérébrale où elle est manquante (Wingeier et al. 2011). Plus spécifiquement, le manque de dystrophine dans le cerveau a été lié à un plus faible score au quotient intellectuel général par rapport à la normale (85 à la place de 100) (Cotton et al. 2005). En ce qui concerne le quotient d'intelligence verbal, Hinton et al. (2000) ont noté une capacité de rétention verbale limitée pour des patients atteints de la maladie de Duchenne. Nardes et al. (2011) ont rapporté que ce déficit n'était pas progressif dans le temps. Ils ont également rapporté une acquisition du langage plus retardée et une plus faible capacité à retenir les phrases. En général, les

patients atteints de la maladie de Duchenne peuvent avoir une capacité de stockage d'information à court terme plus faible que la normale selon Cyrulnic et al. (2008).

Le manque de dystrophine dans le cerveau peut également affecter le traitement de l'information chez le patient (Cyrulnic et al. 2008). Par exemple, Nardes et al. (2011) ont rapporté une faiblesse à traiter les informations séquentielles. Par conséquent, ces personnes peuvent trouver du mal à comprendre et à suivre une série d'instructions. La difficulté à traiter les informations devient plus nuisible lorsque la personne a du mal à détecter et à réagir à un danger imminent. Cette réaction peut être plus inefficace à cause d'une lente réactivité causée par la faiblesse musculaire. La dystrophie de Duchenne peut également causer des épilepsies (Ueda et al. 2017) et/ou des troubles d'attention chez les patients (Nardes et al. 2011).

2.2.4 Comportement social

Il est important de noter comment une maladie neuromusculaire peut affecter le comportement social d'un patient. Si la personne n'est pas bien accompagnée, la faiblesse musculaire peut faire en sorte que le patient soit exclu de certaines activités sociales comme le jeu. Ceci peut potentiellement induire une rétraction sociale du patient.

La pathologie de la personne peut également influencer intrinsèquement sur le comportement. Meola et al. (2003) rapportent que les patients atteints de dystrophie myotonique de type 1 et 2 manifestent un comportement évitant significatif sans atteindre un diagnostic complet du trouble de la personnalité évitante. En outre, beaucoup d'entre eux semblent réticents à se faire de nouveaux amis ou à prendre des risques personnels.

2.3 Répercussions de ces symptômes sur la conception des systèmes interactifs

2.3.1 Adaptation à la faiblesse/fatigue musculaire

En raison de la perte de force induite par les maladies neuromusculaires, un concepteur de systèmes interactifs doit penser à réduire la force nécessaire pour l'interaction. Ceci peut consister à utiliser des technologies plus sensibles qui ne nécessitent pas un gros effort de pression de la part de l'utilisateur. Dans le cas de l'interaction tactile par exemple, les écrans capacitifs conviennent mieux que les écrans résistifs. Cependant, un problème avec les écrans tactiles apparaît lorsque l'utilisateur subit des épisodes de fatigue et ressent le besoin de reposer une partie de sa main sur un support. Si cela n'est pas préconçu dans le système au moyen d'un repose-main dédié, l'utilisateur peut être amené à reposer sa main sur une partie de l'écran et déclencher une action involontaire. La gestion de ces occurrences peut être délicate et nécessite que le système détecte de manière fiable de tels événements et agisse en conséquence. Le concepteur du système peut même recourir à une reconnaissance du profil de la main et définir les parties de la main autorisées à interagir avec le système. Les techniques d'interaction doivent également minimiser l'effort physique de déplacement. L'utilisation des menus circulaire (Tapia et Kurtenbach, 1995) peut être mieux adaptée que l'utilisation des menus linéaires afin de réduire la distance de Fitts (Isokoski 2004), et minimiser l'effort de déplacement. Pour la même raison, si l'interaction gestuelle est requise, elle devrait se restreindre à des gestes simples et courts.

La faiblesse musculaire varie d'une personne à l'autre en termes d'intensité et de muscles touchés. Par conséquent, il est nécessaire que le système puisse être réglé en fonction des capacités motrices de chaque utilisateur.

En outre, le niveau de faiblesse musculaire peut varier dans le temps pour une même personne. Lorsque la situation s'aggrave ou s'améliore, il est possible que le système doive se réadapter pour accommoder le changement de l'espace moteur des mains. Dans le cas où l'état de l'utilisateur empirerait, les mouvements qui étaient possibles par le passé, peuvent devenir difficilement réalisables dans le présent. Ainsi, il serait préférable que le système puisse détecter un tel changement et s'adapter en conséquence. Il arrive même

fréquemment que le niveau de force musculaire puisse fluctuer dans la même journée. Par conséquent, cette adaptation du système devra être rapide et réactive.

2.3.2 Multimodalité

La différence qu'il peut y avoir dans les régions du corps touchés par la maladie entre une personne et une autre peut nécessiter une approche multimodale en entrée et en sortie. Toutefois, l'utilisation de certaines modalités peut être difficile pour certains patients. Par exemple, les patients qui ont peu de contrôle sur le mouvement de leurs paupières peuvent ne pas être en mesure d'utiliser un système d'interaction basé sur le suivi du regard (Wästlund et al. 2010). Le traitement de la parole doit également être évité pour les utilisateurs présentant un trouble de la parole (Pavlakis et al. 1984) ou une faiblesse des muscles faciaux. Ces technologies peuvent tout de même servir pour des personnes ayant perdu tout usage de leur membres supérieurs mais qui peuvent se servir de telles modalités.

La multimodalité peut également servir en sortie pour compenser certains déficits sensoriels. Si la personne souffre d'une neuropathie, il sera préférable d'éviter l'utilisation d'un retour tactile et le remplacer soit par un retour visuel ou un retour auditif.

2.3.3 Adaptation au déficit cognitif

Si le patient neuromusculaire souffre également d'un déficit cognitif, le système interactif devra s'adapter en conséquent. Par exemple, si le système a besoin de communiquer des instructions à l'utilisateur, elles doivent être courtes et simples à comprendre. Il faut également éviter les instructions séquentielles qui peuvent être difficiles à traiter pour certains patients neuromusculaires.

2.3.4 Ergonomie

L'ergonomie du système interactif, qu'il s'agisse d'une partie de l'interface utilisateur ou des artefacts environnants, doit être conçue de façon que l'effort nécessaire pour atteindre chaque élément soit minimal. En outre, il convient d'éviter les dispositions d'artefacts pouvant causer des blessures aux muscles et aux tendons, comme le syndrome du canal carpien (Silverstein et al. 1987) ; le besoin de mouvements répétitifs dans l'interaction doit également être minimisé. Sachant que les utilisateurs atteints de complications neuromusculaires ont une force limitée sur certains muscles squelettiques, qu'ils soient proximaux ou distaux (Jasvinder 2011), le concepteur du système interactif doit examiner avec soin les mouvements / gestes de la main nécessaires à l'interaction des muscles endommagés par la maladie. Par exemple, si la myopathie de l'utilisateur affecte ses muscles distaux, l'interaction devrait nécessiter moins de précision et disperser davantage les artefacts. Sinon, au cas où les muscles les plus proximaux seraient endommagés, l'interface devrait rétrécir l'espace entre les éléments, ce qui raccourcit le temps nécessaire pour se déplacer d'un élément à l'autre. Dans ce cas, si les muscles les plus distaux sont relativement sains, la nécessité de recourir à une plus grande précision ne serait pas très problématique.

2.3.5 Effet psychologique de la technologie

Enfin, il convient de prendre en compte l'effet psychologique que le système peut avoir sur l'utilisateur. Si la personne exhibe des traits de personnalité évitante, elle peut ne pas être très ouverte pour les nouvelles technologies. La réticence de certains patients neuromusculaires à prendre des risques personnels peut également affecter la manière dont ils accueillent (ou non) les changements en général, et les mises à jour / modifications du système, même si elles constituent des améliorations. Dans quelques cas, les patients peuvent refuser l'intervention d'un spécialiste qui a pour but d'améliorer leur système d'interaction s'ils sont trop attachés à ce qu'ils ont l'habitude d'utiliser. Ceci peut également être une réaction de la part du patient qui essaye de s'accrocher à ce qui lui reste comme

force et qui essaye de s'adapter lui-même à sa maladie plutôt que d'adapter la technologie qu'il a l'habitude d'utiliser.

Dans une sous-section précédente, nous avons évoqué l'importance de la personnalisation du système au besoin de chaque utilisateur. Cependant, la personnalisation peut également être importante pour l'engagement, les performances et la persistance (Oulasvirta et Blom, 2008) dans l'utilisation d'un système. Nous pouvons émettre l'hypothèse que cela pourrait réduire l'effet de réticence que la personne peut avoir à utiliser les nouvelles technologies, en particulier au début.

2.3.6 Conclusion

Nous pouvons voir que la conception d'un système interactif pour les utilisateurs souffrant de maladies neuromusculaires peut être très difficile. La raison principale est que le spectre des maladies est très large et leurs manifestations peuvent varier considérablement d'un individu à l'autre. Pour cette raison, nous recommandons une approche multimodale pour la conception de systèmes interactifs pour cette population d'utilisateurs, pouvant être adaptables (voire adaptatifs) aux spécificités du handicap de l'utilisateur. Une conception itérative centrée utilisateur et progressivement inclusive est essentielle. A chaque itération dans ce processus, les concepteurs peuvent aspirer à inclure de plus en plus de profils de patients appartenant à l'ensemble des utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires.

2.4 Dispositifs alternatifs de pilotage pour les personnes atteintes de maladies neuromusculaires

Le joystick est le dispositif le plus utilisé pour piloter un fauteuil roulant électrique. Malheureusement, de nombreux utilisateurs souffrant de maladies neuromusculaires ont beaucoup de difficulté à l'utiliser en raison de leur faiblesse musculaire. Si cette faiblesse entraîne une amplitude de mouvement limitée, un ajustement peut être apporté au logiciel accompagnant le joystick afin de réduire par exemple la distance de déplacement du levier requise pour atteindre la vitesse maximale. Toutefois, cela nécessite l'intervention d'un professionnel spécialisé. Lorsque cette modification est encore insuffisante, un type particulier de joystick peut être proposé à l'utilisateur, principalement un mini-joystick ou un mini-joystick isométrique (Switch-it 2018). Ces variantes sont beaucoup plus sensibles et nécessitent beaucoup moins de force à l'utilisation. Dans (Pellegrini et al. 2004) une étude concernant l'utilisation de tels dispositifs (Figure 1) pour piloter les fauteuils roulants électriques a montré qu'ils pouvaient aider les utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires à moins se fatiguer qu'avec un joystick normal. Le principal inconvénient de ces systèmes est toutefois leur prix, car ils peuvent coûter plus de 3 000 \$US pour un seul mini-joystick (Sunrise Medical 2019). Un autre inconvénient des transducteurs de force en général, est la nécessité de maintenir une certaine force, même si elle est faible, aussi longtemps que l'utilisateur a besoin de maintenir le mouvement. Lors d'une interview avec un groupe d'ergothérapeutes de l'Association Française contre les Myopathies (AFM), il a été porté à notre attention le besoin pour une personne présentant une faiblesse musculaire de pouvoir maintenir le déplacement de son fauteuil sans avoir à maintenir un effort musculaire.

Figure 1 Dispositifs de pilotage testés dans (Pellegrini et al. 2004)



Selon un autre ergothérapeute du même organisme (AFM), un inconvénient plus subtil mais non négligeable lié à l'utilisation d'un mini-joystick est son impact social. Le simple fait de son utilisation peut indiquer que la personne a atteint un niveau critique de force musculaire. Cela peut entraîner une stigmatisation négative qui peut mettre l'utilisateur mal à l'aise en société.

C'est pourquoi nous avons entrepris de concevoir une nouvelle interface de pilotage qui serait appropriée et adaptable aux besoins des utilisateurs souffrant de maladies neuromusculaires. L'interface de pilotage doit principalement tenir compte du manque de force physique. Elle doit également être suffisamment adaptable pour inclure un large spectre d'utilisateurs car les manifestations des maladies neuromusculaires peuvent varier en nature et en intensité. Cela signifie que l'interface doit être aussi configurable que possible. Après des discussions avec plusieurs ergothérapeutes, patients et accompagnateurs, nous avons commencé à travailler sur une interface tactile pour piloter les fauteuils roulants sous forme d'une application sur smartphone ou tablette. Nous émettons l'hypothèse que dans le cas de personnes atteintes de maladies neuromusculaires, une interface tactile basée sur des touches simples, peut permettre d'exécuter la tâche de pilotage à l'aide d'un effort musculaire tolérable.

De nos jours, ces dispositifs incluent plusieurs capteurs et bénéficient d'une puissance de calcul croissante ce qui en fait une plateforme qui réunit de multiples modalités d'interaction.

3 INTERFACE TACTILE POUR LE PILOTAGE DES FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES

L'interface tactile se présente sous la forme d'une application sur un smartphone ou une tablette qui se connecte au fauteuil roulant via USB ou Bluetooth. L'utilisation d'une interface tactile présente l'avantage de ne nécessiter que le toucher pour piloter le fauteuil roulant. Bien qu'un pad tactile existe déjà en tant que dispositif commercial de pilotage sous la forme d'un simple panneau tactile (Figure 2), il présente assez peu de possibilité de personnalisation et d'adaptation au profil d'une personne atteinte d'une maladie neuromusculaire. En comparaison, l'utilisation d'un smartphone ou d'une tablette peut présenter de nombreux avantages supplémentaires concernant aussi bien les possibilités de personnalisation que les possibilités d'utilisation multifonctionnelle permises par le smartphone ou la tablette.

Figure 2: Switch-it touch drive2 (switch it 2018)



En outre, les smartphones sont de plus en plus omniprésents dans nos sociétés (Statistica 2018) et leurs prix sont relativement moins chers par rapport à d'autres systèmes de pilotage alternatifs (plus de 3000 \$US pour un mini-joystick). Cela les rend plus accessibles à un plus grand nombre d'utilisateurs. Un autre avantage des smartphones, du fait qu'ils sont aujourd'hui très couramment utilisés, est qu'ils entraîneraient moins de stigmatisation sociale pour les personnes atteintes de maladies neuromusculaires qu'un mini-joystick. Aujourd'hui, les tablettes et les smartphones sont de plus en plus puissants en termes de capacités de traitement, ce qui peut offrir un terrain fertile pour la mise en place de mécanismes d'adaptation ainsi que pour de nouvelles possibilités d'interaction. Leurs puissances de traitement et leurs capacités de stockage peuvent leur permettre de stocker un grand nombre de profils d'utilisation. Un profil est une combinaison de réglages du fauteuil pouvant être enregistrés dans le module de commande du fauteuil roulant et accessibles en cas de besoin. Ceci est utile par exemple pour basculer d'un mode de conduite en intérieur à un mode extérieur. Il peut également y être enregistré un mode de conduite tierce lorsqu'un proche valide a besoin de déplacer le fauteuil ou de prendre la commande quand l'utilisateur en a besoin. Les fauteuils roulants actuels peuvent stocker entre 5 et 8 profils au maximum. Nous pouvons facilement imaginer que dans le cas d'une tablette, nous pouvons stocker un plus grand nombre de profil, ce qui permet une plus grande flexibilité dans l'utilisation quotidienne.

Enfin, il existe aujourd'hui sur le marché de plus en plus d'objets connectés pour des environnements domotiques pouvant être contrôlés via une application pour smartphone ou tablette. Par conséquent, le smartphone de l'utilisateur peut servir non seulement de hub pour les applications de contrôle d'environnement, mais également pour le pilotage du fauteuil. Cette fonctionnalité peut s'avérer très utile pour les utilisateurs car ils auront moins de dispositifs d'interaction à entretenir tout en mutualisant la définition des profils d'utilisation.

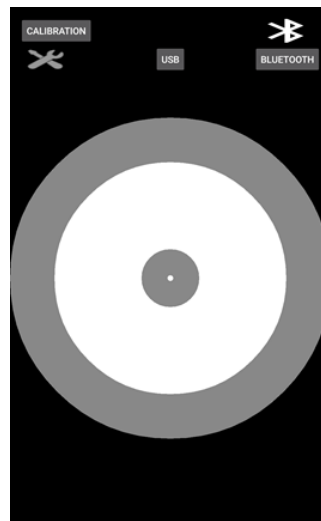
Dans (Guedira et al. 2018), nous avons présenté les fonctionnalités de notre interface et fourni les résultats d'une évaluation préliminaire avec des utilisateurs de fauteuils roulants, non atteints de maladies neuromusculaires. Dans les sections suivantes, nous rappelons les principales caractéristiques de cette interface pour une meilleure compréhension du reste de l'article.

3.1 Modalité de pilotage

L'interface (Figure 3) offre un panneau de pilotage circulaire. Afin de piloter le fauteuil roulant électrique, l'utilisateur doit simplement toucher l'écran et déplacer son doigt à l'intérieur du cercle de pilotage. Concernant la métaphore de pilotage, nous avons décidé de conserver la même logique que le joystick. Cela présente l'avantage de conserver un niveau de cohérence lorsqu'un utilisateur décide de passer du joystick à l'interface tactile et inversement. Le centre du cercle représente une zone neutre où l'utilisateur peut laisser reposer son doigt sans provoquer de mouvement du fauteuil. La taille de cette zone neutre peut être ajustée en fonction des préférences de l'utilisateur. À l'intérieur du cercle, l'utilisateur peut modifier de manière continue la direction du mouvement en déplaçant son doigt vers la direction voulue. L'utilisateur peut également contrôler la vitesse. Celle-ci augmente au fur et à mesure que le doigt s'éloigne du centre du cercle. L'utilisateur atteint la vitesse maximale à la bordure du cercle. Celle-ci est rendue plus épaisse afin de permettre même à des doigts relativement "épais" d'atteindre et de conserver une vitesse maximale

même si le toucher détecté n'est pas exactement sur le bord du cercle. Le fauteuil s'arrête lorsque le doigt de l'utilisateur quitte le cercle de pilotage (doigt levé ou posé à l'extérieur du cercle) ou bien posé sur la zone neutre (zone centrale).

Figure 3: Capture écran de l'interface tactile montrant le cercle de pilotage



Lors d'un précédent test informel avec un utilisateur de fauteuil roulant, nous avons constaté qu'il était très fatigant de toucher d'un doigt l'écran pendant que le reste de la main restait surélevé. En conséquence, l'utilisateur était amené souvent à poser sa main sur l'écran, ce qui perturbait la commande de pilotage. Pour cette raison, nous avons décidé de gérer le pilotage multitouch de différentes manières en fonction des préférences de l'utilisateur. Dans le menu de configuration de l'interface, l'utilisateur peut choisir de piloter le fauteuil en utilisant le premier ou le dernier doigt touchant l'écran. L'utilisateur peut également choisir de piloter son fauteuil en utilisant son doigt supérieur ou inférieur (position sur l'écran), ou même le plus à gauche ou le plus à droite. Avoir une telle possibilité peut permettre aux utilisateurs ayant différentes postures de la main (qui peuvent être déformées à cause de leur maladie) d'arriver quand même à piloter le fauteuil. Une autre option permise par l'interface de configuration, consiste à utiliser le barycentre de toutes les zones de contact détectées sur l'écran.

Une autre caractéristique importante de la personnalisation est la possibilité de segmenter le cercle de pilotage en différentes régions aussi bien pour la direction que la vitesse. La plage de contrôle de vitesse peut être segmentée pour avoir des paliers de vitesse discrets. Le nombre de niveaux peut aller d'un seul niveau (représentant une logique tout-ou-rien pour la vitesse) à 127 niveaux pratiquement continu compte tenu de la taille des smartphones/tablettes. La segmentation de direction peut, quant à elle, aller de 4 directions seulement (avant, arrière, gauche et droite) jusqu'à un maximum de 256 (Figure 4). D'une part, cela offre une opportunité aux utilisateurs ayant une dextérité réduite de piloter avec plus de stabilité : Moins il y a de divisions, plus ces dernières deviennent larges et la nécessité d'avoir une manipulation précise devient moins importante. D'autre part, cela peut présenter une opportunité d'apprentissage progressif pour l'utilisation de l'interface. Il est ainsi possible de commencer avec seulement 4 ou 8 directions et au fur et à mesure que l'utilisateur se familiarise avec l'utilisation de l'interface, d'augmenter progressivement le nombre de directions jusqu'à atteindre un niveau optimal pour lui.

Figure 4: Différentes captures écran de l'interface tactile montrant différents niveaux de segmentation du cercle de pilotage



Le cercle de pilotage peut être positionné de trois manières différentes : a) fixe au centre de la tablette, b) fixe dans une position définie en fonction des préférences de l'utilisateur, c) mobile de manière que son centre soit repositionné à l'endroit du premier toucher. Cette dernière option permet aux utilisateurs qui ont des difficultés à atteindre une cible donnée de pouvoir quand même piloter sans se soucier de l'endroit où leur premier toucher va se produire.

Les deux premières sont assez similaires bien que la seconde permette un peu plus de s'adapter aux contraintes de positionnement de l'utilisateur. Elles se ressemblent dans le sens où, pour initier le mouvement, l'utilisateur a simplement besoin de poser le doigt sur l'emplacement qui correspond à la direction/vitesse voulues³. La troisième manière est différente car à chaque premier toucher, le doigt indique la position initiale de la zone neutre du cercle. Pour atteindre la direction/vitesse voulue, l'utilisateur est alors contraint de glisser le doigt vers la direction et la vitesse désirée, ce qui augmente les déplacements du doigt sur la surface tactile. En considérant la friction entre le doigt et l'écran, cette solution paraît un peu plus fatigante que les deux premières si l'utilisateur souffre d'une grande faiblesse musculaire. En revanche, si l'utilisateur souffre plus d'imprécision pour atteindre une cible, la troisième solution peut être plus adaptée. Notons que la détermination de la solution optimale pour chaque utilisateur devra se faire au cas par cas en compagnie d'un ergothérapeute.

3.2 Modalités de retour

Lors du pilotage du fauteuil roulant, l'utilisateur doit être parfaitement conscient de son interaction avec le dispositif de pilotage sans avoir à garder les yeux fixés sur lui. Le feedback dans le cas d'un joystick provient principalement de la force de résistance opposée que le levier exerce sur la main de l'utilisateur : plus le levier est éloigné de sa position centrale plus la force est importante et plus la vitesse augmente. La direction de la force de résistance est opposée celle du mouvement. Dans le cas d'utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires, cette force opposée peut être pénible et fatigante. Même si la proprioception associée au mouvement du fauteuil fournit des informations sur cette interaction, les utilisateurs nous ont fait savoir qu'ils souhaitaient quand même un retour direct du dispositif de pilotage. Pour cette raison, l'interface tactile offre un certain nombre de mécanismes de rétroaction, configurables via un menu, afin d'aider l'utilisateur à utiliser l'interface de pilotage sans avoir à se focaliser visuellement sur l'écran de la tablette.

Le premier feedback, de nature haptique, se présente sous deux formes. Premièrement, la tablette peut émettre une petite vibration chaque fois que l'utilisateur touche l'écran et commence à piloter. Les vibrations peuvent également être configurées pour continuer aussi longtemps que l'utilisateur pilote. Deuxièmement, nous avons ajouté un retour haptique passif via un cache imprimé grâce à une imprimante 3D (Figure 5).

³ Dans le paramétrage du fauteuil, la courbe d'accélération peut être réglée pour qu'elle ne soit pas trop brusque. Une interpolation est faite entre la vitesse nulle et la vitesse indiquée par l'utilisateur.

Figure 5: L'interface tactile avec le cache pour retour haptique passif



Le cache présente deux ouvertures: une ouverture supérieure qui permet à l'utilisateur d'interagir avec différentes fonctionnalités de l'application (accès au menu de configuration, connexion de la tablette au fauteuil roulant...) et une ouverture centrale circulaire donnant accès au cercle de pilotage. Cette ouverture circulaire permet à l'utilisateur de toucher l'écran tandis que son bord donne une indication tactile sur la bordure du cercle de pilotage. Au centre de cette ouverture circulaire, un cercle surélevé recouvre la zone neutre afin de donner un référentiel physique à l'utilisateur sans avoir à regarder l'écran.

Lors de la conduite du fauteuil roulant, l'utilisateur est amené à constamment glisser son doigt sur le l'écran pendant une période prolongée. Selon (Adams 2013), le frottement prolongé entre le doigt et une surface lisse (l'écran tactile) peut induire de la sueur au niveau du doigt ce qui peut nuire à la fluidité du mouvement du doigt sur l'écran et augmenter la force nécessaire pour le faire glisser. Ceci est contraire au but initial qui est d'offrir un dispositif de pilotage pour réduire l'effort musculaire. Pour cette raison, nous avons recouvert la zone tactile d'un film semi-transparent mince avec une surface légèrement granulée afin de réduire les frottements causés par la sueur.

Enfin, nous avons ajouté la possibilité d'afficher la partie active du cercle (la division de direction active) avec des couleurs indiquant les différents niveaux de vitesse. Cela peut être particulièrement utile pour comprendre le pilotage dès les premières étapes d'apprentissage de l'utilisation de l'interface tactile.

4 TESTS DE L'INTERFACE TACTILE AVEC DES PERSONNES ATTEINTES DE MALADIES NEUROMUSCULAIRES

Après les tests préliminaires de (Guedira et al. 2017; 2018) et les résultats encourageants qui en sont ressortis, nous avons décidé de tester l'interface tactile de pilotage avec des utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires. Nous voulions voir si les résultats obtenus précédemment pouvaient être reproduits chez cette population d'utilisateurs. Nous voulions également observer leur niveau subjectif de fatigue en utilisant l'interface tactile par rapport à un joystick. Les tests ont été réalisés dans le centre de rééducation fonctionnelle Le Brasset à Meaux, France. L'une de nos priorités lors des tests était que les utilisateurs se sentent à l'aise pendant les sessions de test à fin d'éviter toute source de gêne extrinsèque aux tests. Cela impliquait que les joysticks qu'ils utiliseraient durant les tests de comparaison devaient être les leurs. De plus, même les fauteuils roulants devaient être ceux que les participants utilisent quotidiennement, car ils sont mieux adaptés à leur morphologie. Cela nous a permis d'éviter l'impact négatif que l'utilisation d'un fauteuil roulant mal ajusté pouvait avoir sur les performances des utilisateurs. Cependant, cela impliquait l'ajout d'un facteur externe aux tests à savoir un fauteuil roulant différent pour

chaque utilisateur, mais cela était compensé par une conception intra-sujet du joystick de comparaison par rapport à l'interface tactile.

La plupart des différentes sessions d'évaluation ont été supervisées par les responsables en ergothérapie du centre de rééducation. Sinon, ils étaient disponibles à tout moment pour intervenir en cas de besoin. En outre, le système de pilotage tactile a été sécurisé par l'ajout d'une commande d'arrêt d'urgence tenue par l'expérimentateur. Pendant toutes les séances où les participants ont utilisé l'interface tactile, un des expérimentateurs tenait un interrupteur d'activation sans fil qui permettait d'arrêter le fauteuil roulant en cas d'urgence. Tous les participants majeurs ainsi que les parents des enfants ont signé un consentement éclairé avant de participer aux tests. Le protocole d'expérimentation a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche de l'université Paris-Saclay.

4.1 Caractéristiques démographique des utilisateurs

Onze participants (P1 à P11, âge moyen = 16,64, écart type = 3,72), 10 garçons et une fille, ont participé à l'étude. Ils sont tous atteints d'une maladie neuromusculaire : P11 souffre d'une encéphalopathie⁴, P5 d'une amyotrophie spinale infantile⁵ et les autres participants sont tous atteints de dystrophie musculaire de Duchenne. À l'exception du participant P5, ils sont tous résidents au centre de soins. Leur niveau d'éducation varie de la CM1/CM2 au DUT. À l'exception de P11 qui n'a jamais appris à marcher, les 10 autres participants ont perdu leur capacité de marcher entre l'âge de 5 et 9 ans et utilisent actuellement un fauteuil roulant électrique, tous les jours, avec un joystick standard. Pour certains, comme P5, le joystick est habituellement réglé sur un réglage plus sensible afin de compenser la perte de force physique. Ainsi, la vitesse maximale peut être atteinte en déplaçant le joystick à la moitié de sa course.

Le niveau de capacité motrice fine et globale entre les participants varie de très faible pour P7 à presque normal pour P10. Pour des participants avec une motricité globale faible (cas de P5 par exemple), l'amplitude de mouvement au niveau de l'épaule est très réduite ce qui rend difficile le fait de repositionner le bras quand il le faut. Pour les participants avec un niveau faible de motricité fine, l'amplitude de manipulation avec la main et/ou les doigts est très réduite (cas de P7 par exemple). Tous ont une bonne vision, audition et sensation tactile. Ils ne souffrent pas non plus de dysfonctionnements cognitifs bien que P4 ait tendance à perdre rapidement son attention et à se laisser distraire assez facilement. En outre, P9 a des difficultés à rester concentré pendant une période prolongée.

4.2 Session d'initiation

Les tests préliminaires menés lors d'études précédentes ont montré l'importance d'avoir une ou plusieurs séances d'initiation pour permettre à l'utilisateur d'être plus à l'aise lors de l'utilisation de l'interface tactile (Guedira et al. 2018). Ils nous ont également montré à quel point la personnalisation de l'interface de pilotage était aussi importante pour une meilleure utilisation. Dans cette perspective, nous avons organisé pour chaque participant une première session d'initiation. Cette session s'est déroulée dans une vaste salle du centre de soins sous la supervision étroite de l'ergothérapeute en chef du centre. Cette session a également été l'occasion d'observer la première interaction des utilisateurs avec l'interface tactile et de déterminer les meilleurs réglages de l'interface pour chaque participant.

4.2.1 Apprentissage général de l'utilisation de l'interface

⁴ Une encéphalopathie est "un terme pour toute maladie diffuse du cerveau qui modifie le fonctionnement ou la structure du cerveau". Il peut aussi être accompagné d'une faiblesse musculaire et d'une atrophie. (<https://www.ninds.nih.gov/disorders/all-disorders/encephalopathy-information-page>)

⁵ L'amyotrophie spinale "désigne une catégorie de maladies musculaires génétiques [...] résultant essentiellement en une atrophie et une faiblesse des muscles corporels" (<https://www.amyotrophie-spinale.com/>)

Nous avons voulu tout d'abord familiariser les patients avec l'utilisation du toucher pour piloter le fauteuil roulant avant de commencer l'évaluation cinématique. Les 11 participants ont tous réussi à apprendre à utiliser l'interface tactile et à piloter le fauteuil roulant électrique dans la salle d'expérimentation. Nous avons ainsi demandé aux participants de rouler librement dans la salle d'expérimentation en évitant les collisions avec divers objets dans la salle (tables, chaises, etc.). La plupart des participants ont pu facilement apprendre à piloter dans les 5 à 10 premières minutes. Ils ont également signalé, au fur et à mesure de l'avancement de la session d'initiation, qu'ils se sont sentis de plus en plus confiants à utiliser l'interface tactile. Notons que, selon leur ergothérapeute, aucun participant ne souffre de troubles majeurs de l'apprentissage. En outre, il nous a été mentionné que lors de leur première utilisation d'un fauteuil roulant électrique, ils avaient rapidement été en mesure de le piloter, avec un joystick, de manière très naturelle. Enfin, la métaphore de pilotage (comment changer la vitesse et la direction) à l'aide de l'interface tactile ressemble à celle du joystick. À la lumière de ces informations, nous pouvons supposer que la cohérence de la logique de pilotage entre les deux dispositifs a aidé les participants à comprendre plus rapidement comment piloter avec l'interface tactile.

4.2.2 Procédure d'apprentissage progressif

L'utilisation d'un nouveau dispositif de pilotage avec un contrôle continu de la direction peut être difficile à gérer pour l'utilisateur au début, surtout si ce dernier souffre d'un handicap cognitif. Une technique d'apprentissage qui est communément utilisée par les ergothérapeutes est de réduire, dans un premier temps, les directions auxquelles la personne a accès avec le dispositif. Selon les cas, les directions autorisées initialement peuvent se limiter, par exemple, uniquement à 3 directions : marche avant, droite, gauche (la marche arrière pouvant être plus difficile à gérer). Lorsque l'ergothérapeute juge que la personne maîtrise mieux le pilotage, le nombre de direction permise est augmenté progressivement jusqu'à atteindre un pilotage avec un contrôle continu de direction et de vitesse.

Dans (Guedira et al. 2018), nous avons expliqué comment cette procédure d'apprentissage progressif a aidé deux utilisateurs atteints de paralysie cérébrale (Jan 2006) à atteindre un pilotage plus stable au cours d'une session de formation. Au début, la sensibilité de l'interface tactile avait été réglée sur des paramètres élevés (la division du cercle de pilotage en différentes régions de direction était très fine). En conséquence, leur pilotage était très instable. Nous avons alors abaissé au minimum le niveau de précision (en diminuant le nombre de directions), puis nous l'avons progressivement augmenté pour atteindre un pilotage avec un contrôle de direction plus fluide tout en étant assez stable.

Nous avons voulu, dans la présente étude avec des patients neuromusculaires, vérifier si une telle procédure d'apprentissage progressif pouvait être reproduite pour faciliter la prise en main de l'interface tactile. Pour tous les participants, nous avons commencé la session avec un niveau de précision relativement élevé (128 divisions en direction et 100 divisions en vitesse). Le pilotage initial était plus stable pour ces participants souffrant de maladies neuromusculaires par rapport à ceux atteints de paralysie cérébrale de la précédente étude. Il y avait cependant encore place à amélioration pour la plupart d'entre eux. C'est pourquoi, nous avons abaissé ensuite le niveau de précision pour le pilotage à 8 directions. Pour la plupart des participants, ce changement a facilité le pilotage et a été apprécié. Nous avons par la suite augmenté progressivement le nombre de divisions, le but étant d'atteindre le plus haut niveau apprécié par la personne. Cela a été différent d'un participant à l'autre et a varié en fonction des préférences personnelles, des compétences et des habitudes de conduite. Pour le nombre de paliers de vitesse, nous avons procédé de la même façon jusqu'à obtenir les réglages les plus appropriés pour chaque utilisateur (Voir le Tableau 1).

4.2.3 Modalités de retour

Les modalités de retour de l'interface ont aussi été modifiées d'un participant à l'autre pour répondre aux préférences de l'utilisateur. Tous les participants, à l'exception de P6, ont aimé disposer du cache haptique afin de pouvoir guider leur main sur le panneau de pilotage. Seul P6 a considéré cela comme une limitation du mouvement de la main. Tous les utilisateurs ont également apprécié la vibration de la tablette au premier toucher et ont déclaré que cela les avait aidés à utiliser l'interface sans avoir à la regarder. Seul P7 a préféré avoir des vibrations continues pendant toute la période de toucher plutôt qu'au premier toucher uniquement. Le tableau 1 montre les préférences finales de chaque participant.

Tableau 1: Préférences de réglage de l'interface tactile pour chaque participant

Participant	Divisions en direction	Paliers de vitesse	Diamètre du cercle de pilotage	Vibrations	Utilisation du cache	Surface de toucher
P1	10	16	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P2	50	128	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P3	5	256	d= 4.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P4	5	16	d= 3.5 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P5	100	16	d= 3 cm	Ponctuelles	Oui	Lisse
P6	100	128	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Non	Lisse
P7	100	16	d= 2 cm	Continues	Oui	Granulée
P8	100	128	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P9	100	64	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P10	100	128	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée
P11	100	128	d= 5.8 cm	Ponctuelles	Oui	Granulée

4.2.4 Adaptation de la position de l'interface

Comme l'ont suggéré des tests informels antérieurs, le positionnement de la tablette peut également avoir un impact crucial sur les performances d'utilisation. Cela peut être plus critique dans le cas des utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires, car ils souffrent déjà d'une faiblesse musculaire et/ou d'une amplitude de mouvement limitée. Pour chaque participant, nous devons trouver la position optimale de la tablette à l'aide de fixations articulées. La Figure 6 montre la disposition de la tablette pour différents utilisateurs.

Figure 6: Photos de la position de l'interface tactile durant l'essai avec différents participant



En règle générale, nous avons décidé de commencer par placer la tablette au même endroit que le joystick de l'utilisateur, puis de travailler à partir de là pour trouver la position optimale. En ce qui concerne l'inclinaison de la tablette, l'angle spécifique était moins important que la position relative du poignet. Tant pour le placement que pour l'inclinaison, nous avons procédé en peaufinant progressivement les deux jusqu'à ce que l'utilisateur se sente le plus à l'aise. Il y a cependant un point à prendre en compte. Selon le thérapeute fonctionnel, il est préférable d'avoir une combinaison de position/inclinaison qui place le poignet dans la position la plus neutre possible. Parfois, il se peut que cette position ne soit pas la plus confortable pour l'utilisateur à ce moment-là, mais il est important également de prendre en compte la configuration la plus saine du point de vue thérapeutique. C'est pourquoi nous recommandons de placer la tablette, la première fois, sous la supervision du thérapeute fonctionnel de l'utilisateur. Dans certains cas, comme pour P4, une meilleure posture du poignet a été obtenue en élevant simplement le poignet avec une mousse épaisse (Figure 7).

Figure 7: P4 utilisant un bloc de mousse pour surélever son poignet



Le cas de P9 nous a révélé une observation critique au niveau du positionnement de la tablette qui peut affecter non seulement le pilotage, mais également la posture générale de la personne. P9 souffre de dystrophie musculaire de Duchenne et présente une faiblesse musculaire grave et progressive. Tandis que sa force régressait, il avait besoin de se pencher sur le côté pour pouvoir pousser le joystick à fond. Avec le temps, cette inclinaison a aggravé les problèmes de posture dus à sa maladie. Lorsqu'il a essayé l'interface tactile, sa position a été fixée au plus près de manière à lui éviter de s'appuyer pour l'utiliser pleinement. Nous pouvons en déduire l'importance de disposer d'un système de positionnement facilement modifiable pour tenir compte des fluctuations de la condition de l'utilisateur. Dans la vie quotidienne d'une personne atteinte d'une maladie neuromusculaire, lorsque le tronc peut difficilement bouger, une intervention courante consiste à modifier l'assise de l'utilisateur afin de permettre une meilleure circulation sanguine et éviter ainsi d'autres problèmes. Un repositionnement du tronc, en particulier lorsque les muscles proximaux du bras sont faibles, signifie que la position relative de la main par rapport au dispositif d'interaction peut changer. Cela nécessite de repositionner l'appareil pour maintenir une interaction cohérente. Une interface facilement repositionnable est très utile dans ce genre de situation.

Enfin, au cours de la séance d'initiation, P5 nous a demandé fréquemment de repositionner sa main sur le joystick à chaque fois qu'elle glissait. Sa faiblesse musculaire proximale ne lui permet pas de repositionner facilement sa main sur le levier de commande et il a souvent besoin d'aide pour cela. Lorsqu'il a essayé l'interface tactile, il a eu besoin de beaucoup moins d'aide pour repositionner sa main, car il lui a fallu simplement la faire glisser plutôt que de la placer au-dessus du levier du joystick.

4.2.5 Adaptation et co-adaptation.

La configuration des paramètres ainsi que le positionnement de l'interface tactile se sont avérés plus difficiles avec le participant P7. L'état de sa maladie lui permet de bouger à peine quelques doigts et son amplitude de mouvement est très limitée (quelques centimètres). Au moment de l'évaluation, il a eu du mal à utiliser son joystick avec lequel il pouvait difficilement piloter en arrière ou tourner vers la gauche en raison de sa force et de son amplitude de mouvement limitées. Après plusieurs minutes d'essai, nous avons atteint une configuration qui lui permettait d'utiliser pleinement l'interface tactile de pilotage. Nous avons couvert davantage l'écran de la tablette et n'avons laissé qu'une petite zone pour que sa main puisse reposer entièrement sur le cache alors que son pouce était en contact avec l'écran. Nous avons calibré le cercle de pilotage aussi petit que possible pour lui permettre d'atteindre toute la surface. Ensuite, nous avons défini la position du cercle pour qu'il se déplace à chaque premier contact de son doigt de contrôle. Une des raisons principales est que si son doigt venait à bouger accidentellement, il pouvait tout de même atteindre tout le cercle de pilotage. En utilisant cette configuration, il a été capable de se déplacer librement dans la salle d'expérimentation. Il était également capable de piloter en marche arrière et de tourner à droite et à gauche. Après seulement quelques minutes de conduite, il a même commencé à élaborer sa propre stratégie de pilotage, ce qui nous a paru très intéressant : comme il disposait d'une amplitude de mouvement limitée et que le cercle de pilotage est repositionné au premier toucher, il a commencé à anticiper ses changements de direction afin d'utiliser tout l'espace moteur disponible. Par exemple, pour avancer, il commence d'abord par déplacer son pouce le plus en arrière possible, puis il établit un premier contact avec l'écran. Cela positionne le cercle de pilotage un peu plus bas mais lui donne plus d'amplitude dans la partie supérieure du cercle de pilotage pour avancer. Il fait la même chose pour les autres directions. Cette technique peut être considérée comme un exemple de co-adaptation (Mackay 2000) dans laquelle la configuration du système interactif est définie au plus près des besoins de l'utilisateur et que conjointement, l'utilisateur réadapte, jusqu'à un certain point, sa propre technique de pilotage afin d'utiliser plus efficacement les fonctionnalités du système.

En résumé, les 11 participants ont pu, à la fin de la session de formation, comprendre l'utilisation de l'interface tactile. Dans l'ensemble, nous avons également pu constater que leur pilotage s'est amélioré au fil de la session. La plupart d'entre eux ont souligné la facilité d'utilisation instantanée, mais se sont montrés sceptiques quant à l'utilisation sur une période prolongée (toute la journée) pour le moment. Ceci est en partie dû à la nouveauté de l'interface tactile : ils ont encore besoin de planifier leur mouvement avec la tablette ce qui les fatigue davantage. Du fait qu'ils sont habitués au joystick, on peut supposer qu'un changement de dispositif nécessitera plus de temps d'adaptation ou sera plus pertinent lorsque l'utilisation du joystick devient impossible.

4.3 Evaluation cinématique

Après avoir constaté que les participants étaient capables de piloter leur fauteuil roulant électrique à l'aide de l'interface tactile, nous avons procédé à une évaluation cinématique afin de quantifier le niveau de performance que l'interface tactile confère aux utilisateurs par rapport à leurs propres joysticks. Nous avons demandé aux participants d'effectuer 5 tâches différentes avec l'interface tactile et le joystick. Les trois premières tâches (ligne droite dans un couloir, virage à 90 ° et passage de porte) s'inspirent du test de compétences en fauteuil roulant (Wheelchair skill test) (Rushton et al. 2014) et sont conformes aux évaluations cinématiques précédentes de l'interface tactile. Dans la quatrième tâche, le virage à 90 ° est directement suivi d'un passage de porte. Enfin, la cinquième tâche consiste en un slalom alternant virage à gauche et virage à droite. Même si les participants sont déjà habitués au joystick, nous avons quand même alterné l'utilisation des appareils afin d'éviter l'effet d'apprentissage par la tâche. Pour chaque dispositif, chaque tâche a été effectuée une première fois en tant qu'entraînement, puis trois essais ont été enregistrés. De plus, nous

avons demandé aux participants de réaliser toute l'expérience à deux vitesses différentes. Premièrement, la vitesse du fauteuil roulant était limitée à 2,5 km/h. La limite de vitesse a ensuite été augmentée à 4km/h, ce qui exige un niveau de concentration plus élevé et une plus fine modulation du contrôle (vitesse/direction), en particulier lors des manœuvres serrées. Tout ce processus a rendu l'expérience assez longue et fatigante vers la fin, mais ce fut une occasion pour nous d'observer la réaction des utilisateurs, dans le cas de chaque appareil, à mesure qu'ils se fatiguaient davantage. Les utilisateurs ont toutefois été informés qu'ils pouvaient arrêter l'expérience à tout moment s'ils le souhaitaient, sans aucune conséquence. Nous avons également organisé des sessions de test distinctes pour chaque dispositif, car il était trop fatiguant de faire tous les tests le même jour. Le temps entre les deux sessions était de moins d'une semaine.

En ce qui concerne la fatigue des utilisateurs, nous nous sommes principalement appuyés sur leur commentaire et leur ressenti subjectif. Dans (Pellegrini et al. 2004), les expérimentateurs ont évalué le succès de l'utilisation d'un dispositif de pilotage pour fauteuil roulant électrique destiné aux utilisateurs atteints de maladies neuromusculaires, à partir de 30 minutes sans arrêt pour cause de fatigue musculaire. Pour nos tests, nous nous sommes basés sur une hypothèse similaire, sachant que les tests duraient entre 45 et 60 minutes en moyenne pour chaque session. Nous nous sommes également appuyés sur les réponses aux questionnaires post-test.

Malheureusement, en raison de divers problèmes personnels et logistiques (traités dans la sous-section 4.4.8), seuls 4 participants (P2, P4, P10 et P11) parmi les utilisateurs initiaux ont pu participer à l'évaluation cinématique complète.

4.3.1 Dispositifs utilisés

Les fauteuils roulants des utilisateurs sont adaptés à leur morphologie. C'est pourquoi, pendant les tests, nous avons préféré que les participants utilisent leur propre fauteuil roulant pour éviter un biais d'inconfort. P2 et P10 utilisaient un Q6-Ultra à 6 roues tandis que P4 utilisait un You-Q à 6 roues et P11 un You-Q à 4 roues. Lors de l'utilisation avec l'interface tactile, nous avons veillé à ce que tous les fauteuils soient reprogrammés, à l'aide du logiciel de programmation constructeur, afin de disposer des mêmes profils de vitesse de rotation et d'accélération que pour le joystick. Les joysticks utilisés par les participants étaient les leurs et étaient tous des joysticks standard. P11 utilise un joystick en forme de U qui est plus adapté à la posture de sa main, tandis que les autres ont une poignée standard (Figure 8).

Figure 8 Gauche : un des joysticks utilisés par les participants du test⁶, Droite : levier de joystick en forme de U ⁷utilisé par P11



⁶ Photo prise de: <https://www.quantumrehab.com/quantum-electronics/q-logic-3-advanced-drive-control-system.asp>

⁷ Photo prise de: <https://www.bodypoint.com/ECommerce/product/pcpt04/u-shaped-joystick-handles>

La tablette utilisée dans l'étude était la même que celle utilisée lors de la session d'initiation : Sony Xperia Z Ultra. En ce qui concerne la configuration de l'interface de pilotage, chaque participant a utilisé la configuration optimale déterminée lors de la session d'initiation (Tableau 1).

Les tests ont été filmés par 4 caméras différentes. La première (une caméra Sony HD) a capturé la scène globale. La seconde, une caméra GoPro, filmant à une cadence de 60 images par seconde, a été attachée en dessous du fauteuil roulant pour capturer le sol et nous aider à repérer le passage du fauteuil par les marquages posés au sol pour chaque tâche. À l'aide de ces marquages, nous avons pu calculer, au moyen d'une analyse visuelle image par image, le temps mis pour accomplir chaque partie de la tâche. Deux autres caméras GoPro, enregistrant chacune à 120 images par seconde, ont été positionnées sur les poignées du fauteuil roulant et pointées vers les roues motrices de celui-ci. Chaque roue a été parsemée de 11 marqueurs colorés équidistants. Cela nous a permis ultérieurement de calculer la vitesse instantanée de chaque roue grâce à une analyse visuelle image par image et d'en déduire la vitesse instantanée.

Les données ainsi recueillies ont ensuite été analysées via un logiciel de statistiques dans RStudio. L'analyse de normalité des données a donné une distribution non normale. À cause de cela et en raison de la petite taille de l'échantillon, nous avons choisi d'effectuer une analyse statistique non paramétrique à l'aide du test de rang de Wilcoxon avec une valeur de signification de $\alpha = 0,05$. Dans les sections suivantes, nous détaillons les résultats de chaque tâche séparément. Nous examinons d'abord les différences de performance entre le joystick et l'interface tactile pour l'ensemble de l'échantillon, puis nous rapportons les résultats à partir du retour subjectif. Ensuite, nous discutons de la performance de chaque participant. Bien que la taille de l'échantillon ne permette pas une généralisation des résultats, ces derniers aident à détecter des tendances susceptibles d'orienter les futurs essais cliniques.

4.3.2 Tâche 1: Ligne droite dans un couloir

Dans cette tâche, un couloir de 5 mètres a été simulé par de petits cônes de signalisation. Les cônes ont été placés à un mètre les uns des autres et visuellement reliés au sol par un ruban adhésif blanc pour souligner les limites du couloir. La largeur du couloir a été fixée à 90 cm, ce qui est le minimum autorisé pour les couloirs conformément à la réglementation de la construction accessible (MTES 2017). La figure 9 montre le participant 11 effectuant cette tâche à l'aide d'un joystick.

Figure 9: P11 en train d'effectuer une traversée de ligne droite



Nous avons enregistré la traversée sur toute la distance de 5 mètres, mais nous n'avons pris en compte que les données relatives à la distance de 3 mètres au milieu. Dans cette tâche, nous avons voulu voir si les participants pouvaient garder une ligne droite en utilisant le dispositif de pilotage et s'ils pouvaient atteindre le potentiel de vitesse maximale tout en restant sur cette ligne droite. Les données recueillies sont les suivantes : la vitesse moyenne, le nombre de collisions et le temps total nécessaire pour parcourir 3 mètres.

Pour le niveau de vitesse 1, le temps total nécessaire pour parcourir 3 mètres est similaire entre la tablette et le joystick (joystick médian = 4,478 s, tablette médiane = 4,503 s, valeur P-value > 0,05). La vitesse moyenne est également similaire (médiane joystick = 0,681 m/s, médiane tablette = 0,687 m/s, P-value > 0,05). En ce qui concerne les collisions, aucune collision n'a été enregistrée en niveau de vitesse 1 pour l'un ou l'autre dispositif.

En niveau de vitesse 2, les performances restent également similaires entre la tablette et le joystick. Le temps total pour parcourir 3 mètres est similaire (médiane joystick = 2,768 s, tablette médiane = 2,8 s, P-value > 0,05) et la vitesse moyenne également (médiane joystick = 1,115 m/s, tablette médiane = 1,067 m/s, P-value > 0,05). Cela a également potentiellement pénalisé la vitesse moyenne enregistrée de la tablette, les participants ayant besoin de plus de corrections de trajectoire. Toutefois, au niveau des collisions, 3 collisions ont été enregistrées sur tous les essais (12 essais au total) pour la tablette et aucune pour le joystick. Le nombre de collisions indique qu'à des vitesses plus élevées, les participants ne sont pas encore habitués à garder une trajectoire stable avec la tablette autant qu'ils le font avec leur joystick. Les deux graphiques suivants donnent les valeurs médianes pour chaque participant.

Figure 10 Graphique donnant les valeurs médianes du temps passé durant la traversée pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale

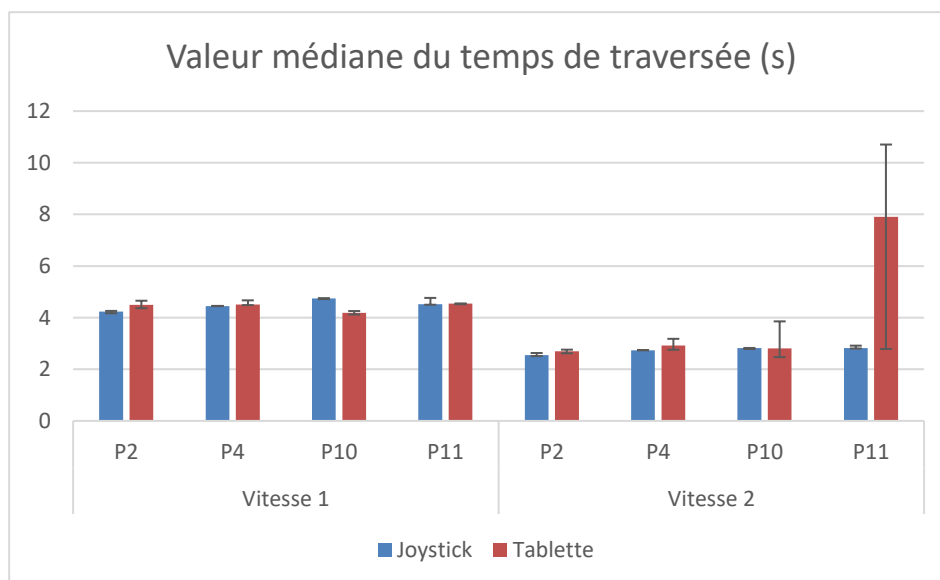
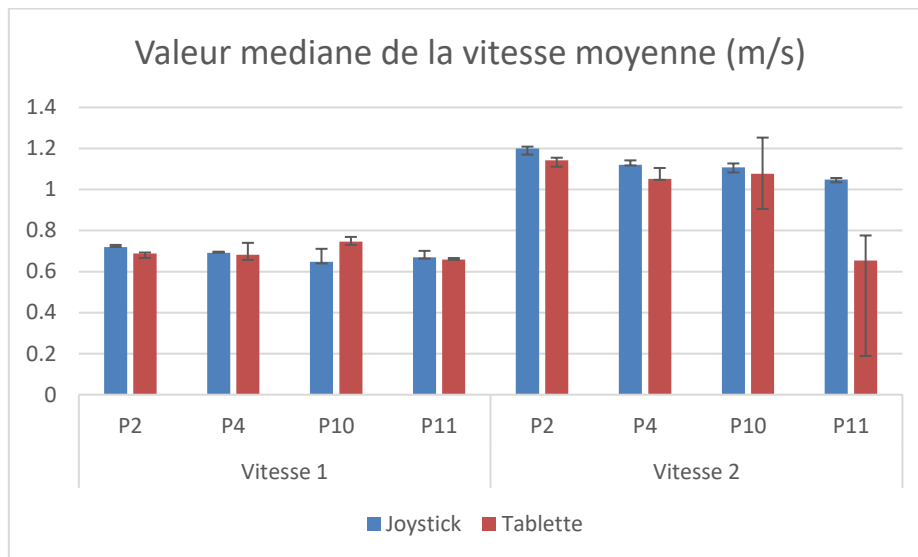


Figure 11 Graphique donnant les valeurs médianes de la vitesse moyenne durant la traversée pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale



Nous pouvons constater que les résultats sont cohérents pour P2 et P4, la tablette étant légèrement plus lente que le joystick pour les deux niveaux de vitesse. Pour P10, la tablette est légèrement plus rapide en niveau de vitesse 1, mais ce résultat est contrebalancé par le manque relatif de stabilité en niveau de vitesse 2, ce qui explique également une collision pour P10. La disparité entre la médiane et le maximum montre que l'utilisateur peut atteindre une plus grande vitesse avec la tablette. En ce qui concerne P11, les résultats au niveau de vitesse 1 sont cohérents avec P2 et P4. Cependant, au niveau de vitesse 2, la disparité entre la tablette et le joystick est très perceptible. Un facteur qui peut expliquer cela est que généralement, les ergothérapeutes n'autorisent pas P11 à accéder à une vitesse de fauteuil roulant supérieure à celle définie au niveau de vitesse 1. La raison en est le manque de sécurité lorsque P11 se trouve dans des espaces encombrés. Combiné à la nouveauté de l'interface tactile, le pilotage de P11 avec la tablette devient moins stable, ce qui se répercute sur les collisions puisque P11 enregistre 2 sur les 3 collisions détectées.

4.3.3 Tâche 2 : Virage à 90°

Dans cette tâche, un couloir avec un angle de 90 ° a été simulé à l'aide de cônes de signalisation. La partie d'entrée du couloir était la même que celle utilisée dans la première tâche (avec une largeur de 90 cm). La partie perpendiculaire a été conçue de la même manière mais avec une largeur de 110 cm afin de se conformer à la réglementation en matière de construction accessible aux fauteuils roulants, prise du site du (MTES) Ministère Français de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES 2017). Le début et la fin du virage ont été comptés à un mètre de l'apex. La figure 12 montre le participant 4 effectuant la tâche.

Figure 12 : P4 en train d'effectuer un virage



Les données recueillies sont : la vitesse d'entrée qui donne une idée du niveau de confiance du participant avant de prendre le virage, le temps de traversée du virage, le nombre de collisions ainsi que la vitesse de sortie du virage. Cette dernière donne une idée de la rapidité avec laquelle le participant peut prendre de la vitesse après le virage.

Dans cette tâche, les résultats entre les niveaux de vitesse 1 et 2 sont cohérents. En ce qui concerne la vitesse à l'entrée du virage, les performances sont similaires entre le joystick et la tablette. En vitesse 1, la tablette médiane = 0,68 m/s, médiane joystick = 0,6655 m/s et P-value > 0,05. À la vitesse 2, la médiane tablette = 1,1259 m/s, médiane joystick = 1,121 m/s et P-value > 0,05. Cela suggère un niveau de confiance similaire en approchant du virage pour les deux dispositifs. La vitesse à la sortie est également similaire : médiane tablette = 0,6415 m/s, médiane joystick = 0,675 m/s, P-value > 0,05 en niveau de vitesse 1, et en vitesse 2, médiane tablette = 0,879 m/s, médiane joystick = 1,029 m/s P-value > 0,05. Cela indique que les participants peuvent également prendre de la vitesse après une manœuvre serrée. La différence apparaît toutefois lorsque l'on regarde le temps total passé dans les virages. Pour les niveaux de vitesse 1 et 2, le joystick est plus rapide. Au niveau de vitesse 1, médiane tablette = 6,008 s, médiane joystick = 5,247s et P-value = 0,02258. Au niveau de vitesse 2, médiane tablette = 3,962 s, médiane joystick = 3,225 s, P-value = 0,006099. Cette différence peut s'expliquer par les efforts de planification que les participants font lorsqu'ils utilisent la tablette. Ils ont d'ailleurs explicitement déclaré qu'ils ont eu besoin de plus de planification avec la tablette, ce qui semble logique, car leur expérience avec celle-ci est moindre qu'avec le joystick. La charge de planification combinée à la difficulté de la manœuvre s'est également reflétée sur le nombre de collisions puisque les deux dispositifs ont enregistré 1 collision pour la tablette au niveau de vitesse 1 et 2 collisions en vitesse 2 contre 1 seule collision pour le joystick pendant tous les essais (en vitesse 2). Les graphiques suivants donnent les performances médianes de chaque participant.

Figure 12 Graphique donnant les valeurs médianes du temps passé durant le virage pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale

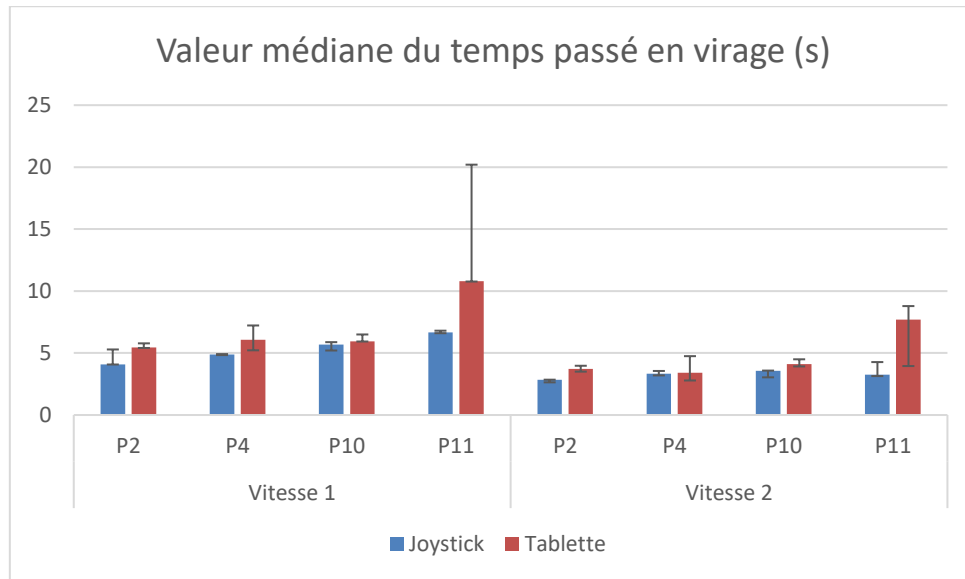


Figure 13 Graphique donnant les valeurs médianes de vitesse à l'entrée du virage pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale

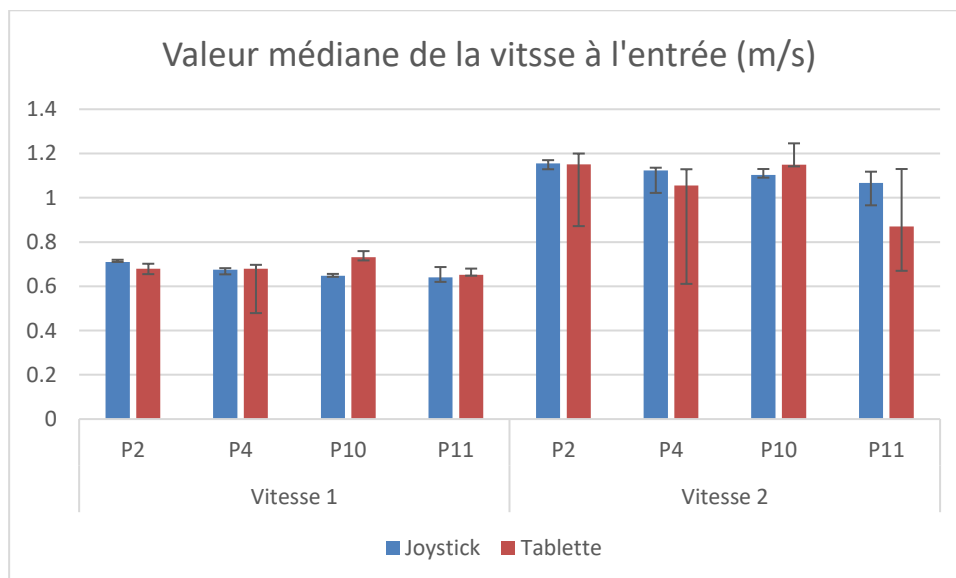
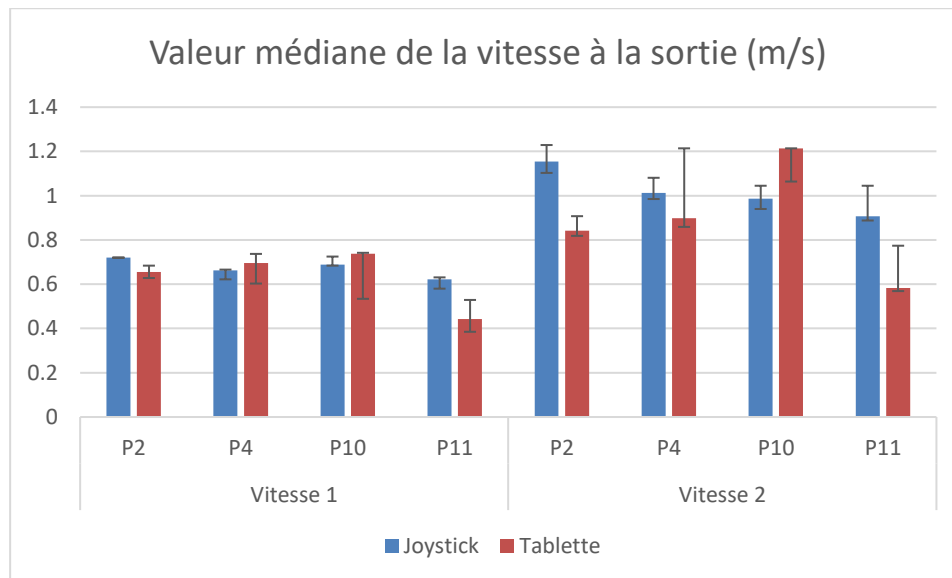


Figure 14 Graphique donnant les valeurs médianes de vitesse à la sortie du virage pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale



En regardant les performances individuelles, nous pouvons voir que les performances pour le temps passé en virage sont tout à fait cohérentes, P11 consacrant plus de temps à la manœuvre que les autres participants, en particulier au niveau de vitesse 2. Cela se reflète au niveau des collisions enregistrées par P11 où il y a eu 1 collision lors des tests avec chaque dispositif pour la vitesse 1 alors qu'en vitesse 2, 1 collision avec le joystick et 2 collisions avec la tablette ont été enregistrées. P10 atteint des vitesses légèrement supérieures à l'entrée du virage et à la sortie, conformément aux observations de la tâche 1, mais est néanmoins plus rapide dans le virage avec le joystick, ce qui confirme que la tablette nécessite davantage de planification.

4.3.4 Tâche 3: Passage de porte

Dans cette tâche, deux tubes cylindriques épais ont été utilisés pour simuler une porte. La largeur de cette dernière est de 80 cm, qui est la largeur minimale selon la réglementation de constructions accessibles aux fauteuils roulants (MTES 2017). La Figure 16 montre un participant en train d'effectuer le passage de porte.

Figure 16: P4 en train de traverser la porte



Les données enregistrées sont la vitesse instantanée avant d'entrer dans la porte (indique le niveau de confiance de l'utilisateur en s'approchant de la porte), la vitesse moyenne lors du franchissement de la porte, la vitesse à la sortie de la porte, le nombre de

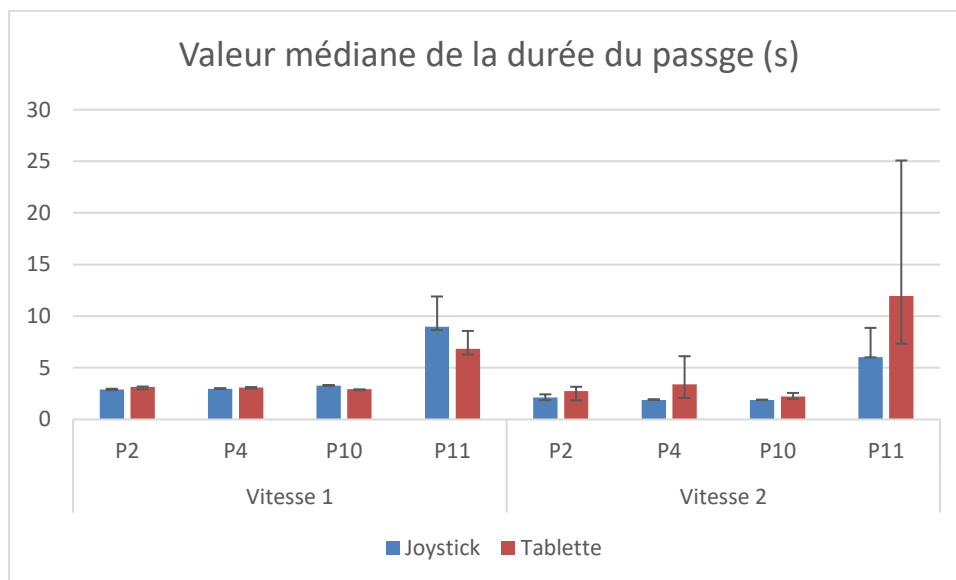
collisions ainsi que le temps total passé pour effectuer la tâche. Le début et la fin de la tâche ont été pris à 1 mètre avant et après la porte. Le tableau 2 résume les résultats de la comparaison entre la tablette et le joystick.

Tableau 2: Récapitulatif des résultats de comparaison tablette vs. joystick en tâche 3

Valeur médiane de	Vitesse 1			Vitesse 2		
	Joystick	Tablette	Wilcoxon P-value	Joystick	Tablette	Wilcoxon P-value
Temps total de traversée (s)	3.138	3.118	>0.05	1.945	2.96	>0.05
Vitesse moyenne de traversée (m/s)	0.6485	0.688	>0.05	1.02	0.4205	0.01414
Vitesse d'entrée (m/s)	0.6565	0.6895	>0.05	0.9505	0.697	>0.05
Vitesse de sortie	0.6585	0.6805	>0.05	1.1004	0.9125	>0.05
Nombre de collisions	0	0	-----	0	3	-----

Comme on peut le voir dans le tableau ci-dessus, les performances sont en général similaires entre les deux dispositifs. La vitesse à l'entrée est similaire, ce qui suggère un niveau de confiance similaire à l'approche de la porte. La similarité des vitesses en sortie suggère que les deux appareils permettent aux participants de prendre de la vitesse après une manœuvre serrée. La différence apparaît dans la vitesse moyenne au niveau de vitesse 2 où le joystick est nettement plus rapide. Cela peut s'expliquer par la nécessité de ralentir pour mieux planifier la traversée avec la tablette. Le graphique suivant donne le temps de parcours médian de chaque participant.

Figure 15: Graphique donnant les valeurs médianes du temps de passage de porte pour chaque participant. Les barres d'erreur représentent la valeur minimale et la valeur maximale



En regardant les performances individuelles, nous voyons une cohérence dans le temps de parcours en niveau de vitesse 1 où les performances des deux appareils sont proches et aucune collision n'a été enregistrée. Toutefois, P11 a été un peu plus rapide avec la tablette. Lorsque le niveau de vitesse a augmenté, les performances de P2 et P10 ont conservé une tendance similaire, tandis que P4 et P11 a été plus lents avec la tablette. Cela confirme l'observation de la tâche 2, où la complexité de la tâche, combinée au réglage de la vitesse élevée et au manque d'expérience avec le dispositif, peut diminuer la performance du participant à l'avantage du joystick. Cela explique pourquoi toutes les collisions (au nombre de 3) ont été enregistrées avec la tablette en vitesse 2 : P4 a eu une collision tandis que P10

en a enregistré 2. Aucune collision n'a été enregistrée pour P2 et P11. Notons que P11 a utilisé une technique différente de celle des autres participants. Plutôt que de simplement ralentir au bord de la porte, elle s'arrête carrément afin de planifier sa traversée, puis reprend progressivement de la vitesse. Les graphiques suivants donnent une idée des vitesses enregistrées lors du parcours médian (en termes de temps de traversée) pour chaque participant.

Figure 16 Graphiques donnant la progression en vitesse durant le passage de porte pour participant P2

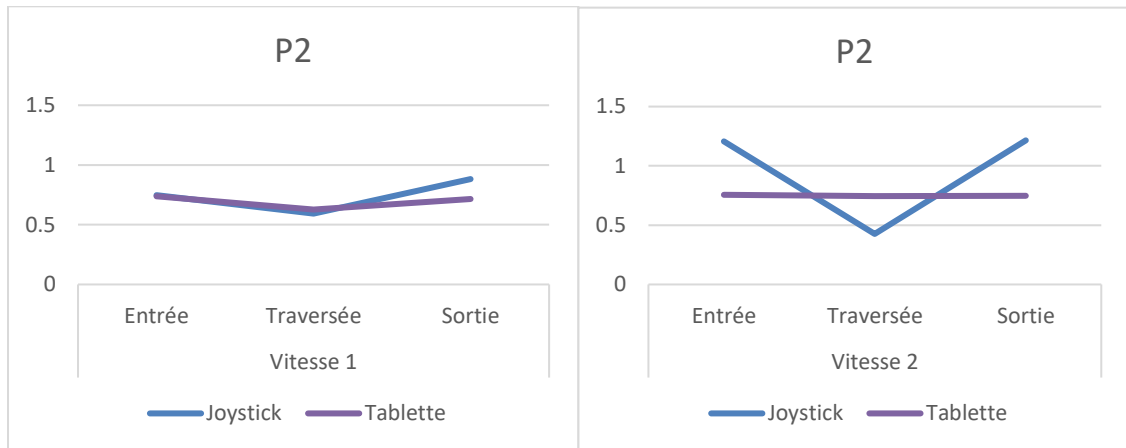


Figure 17 Graphiques donnant la progression en vitesse durant le passage de porte pour participant P4

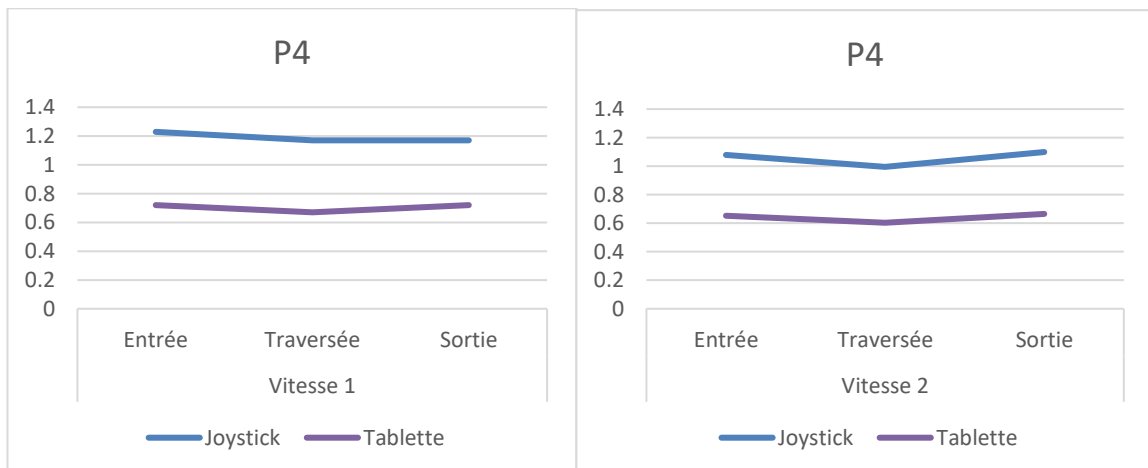


Figure 18 Graphiques donnant la progression en vitesse durant le passage de porte pour participant P10

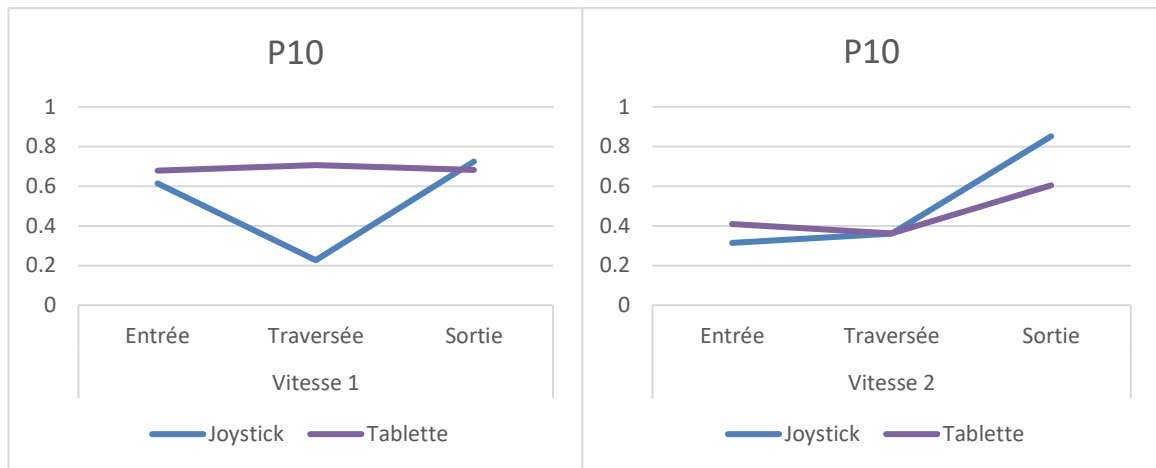
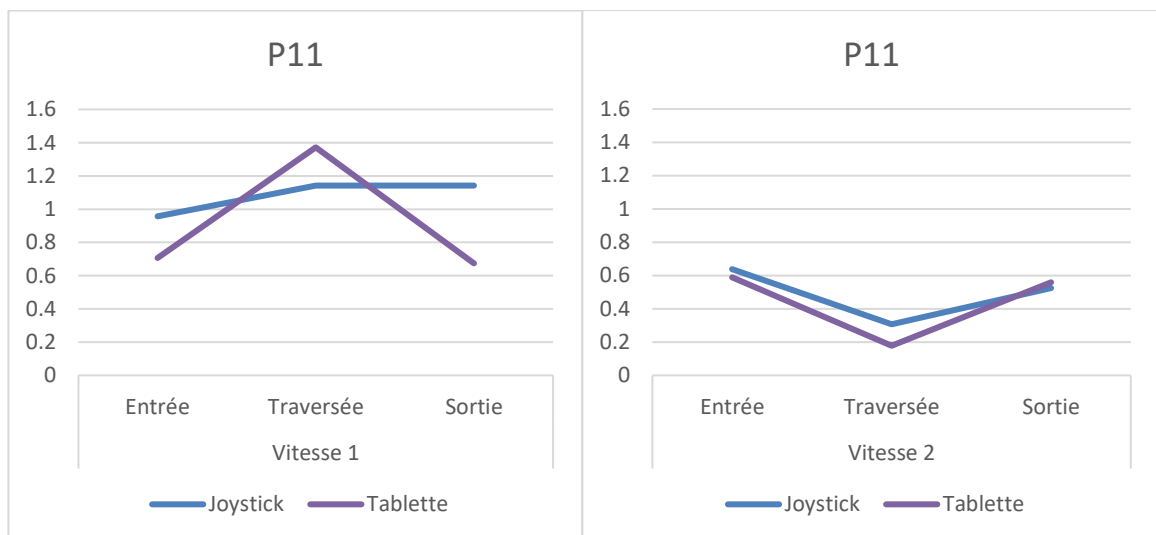


Figure 19 Graphiques donnant la progression en vitesse durant le passage de porte pour participant P11



Les graphiques montrent comment différents participants adoptent différentes stratégies de traversée avec l'un ou l'autre dispositif. Tout en s'approchant toujours de la porte à des vitesses à peu près similaires, les participants soit accélèrent pendant la traversée, soit décélèrent avant de prendre de la vitesse pour sortir.

4.3.5 Tâche 4 : Virage suivi d'un passage de porte

Dans cette tâche, nous avons pris le même virage que la tâche 2 et ajouté un passage de porte juste derrière comme dans la tâche 3. Le début de ce dernier (1 mètre avant la porte) était à la fin du virage (1 mètre après l'apex). L'objectif de cette tâche combinée était de déterminer si la combinaison de deux tâches consécutives nécessitant toutes les deux une planification considérable pouvait avoir une incidence sur les performances de l'utilisateur. La figure 22 montre le participant 2 effectuant cette tâche.

Figure 20: P2 en train d'effectuer la tâche 4



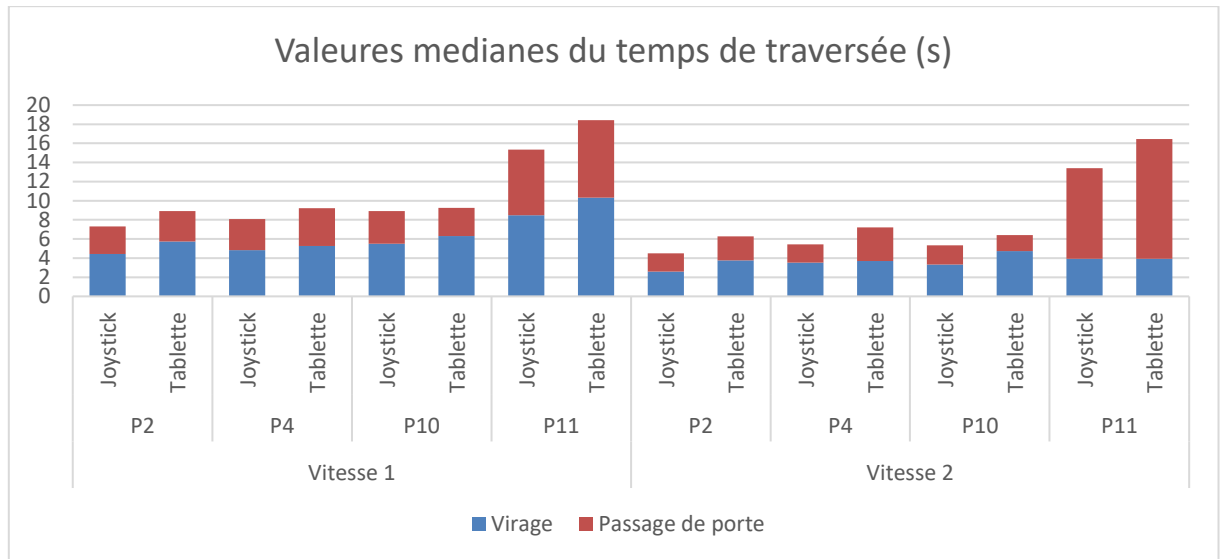
Les données recueillies concernent le temps passé séparément dans le virage et le passage de porte ainsi que le nombre total de collisions dans l'ensemble de la tâche. Le tableau ci-dessous présente les performances de cette tâche, ainsi qu'une comparaison entre les performances de la tâche de virage seule et la même tâche lorsque celle-ci est associée au passage de porte. Nous faisons la même chose pour le passage de porte. Le tableau 3 résume les résultats de la comparaison entre la tablette et le joystick.

Tableau 3: Récapitulatif des résultats de comparaison tablette vs. joystick en tâche 4

Valeur médiane de	Vitesse 1			Vitesse 2		
	Joystick	Tablette	Wilcoxon P-value	Joystick	Tablette	Wilcoxon P-value
Temps du virage (s)	5.26	6.133	>0.05	3.308	3.853	0.012
Temps de passage de porte (s)	3.345	3.535	>0.05	1.988	3.185	>0.05
Nombre de collisions	0	0	-----	0	4	-----
p-value par rapport au temps du virage de la tâche 2	>0.05	>0.05	-----	>0.05	>0.05	-----
p-value par rapport au temps de passage de porte de la tâche 3	>0.05	>0.05	-----	>0.05	>0.05	-----

Dans le tableau ci-dessus, nous pouvons voir qu'au niveau de vitesse 1, les performances sont similaires entre la tablette et le joystick, sans collision enregistrée. Au niveau de vitesse 2, cependant, alors que la médiane du temps de passage de porte est nettement plus élevée pour la tablette, l'analyse globale ne montre pas de différence significative par rapport aux 4 participants. L'influence du niveau de vitesse plus élevé s'est également répercutée sur les collisions où 4 collisions ont été enregistrées pour la tablette contre aucune pour le joystick. Pour les deux niveaux de vitesse, le fait de combiner deux tâches dos à dos n'a pas eu d'incidence sur le temps de parcours de la tâche, que ce soit en virage ou en passage de porte. Le graphique suivant présente les performances détaillées de chaque participant.

Figure 23: Graphique donnant la valeur médiane du temps de traversée pour la tâche combinée pour chaque participant. Les parties en bleu et en rouge désignent les portions du temps passées durant le virage et le passage de porte respectivement



Nous pouvons constater que le temps médian de traversée est cohérent pour tous les participants, à l'exception de P11 qui est plus lent surtout en traversée de porte. La cohérence peut également être remarquée pour la partie du temps passé dans le virage et le passage de porte, respectivement.

4.3.6 Tâche 5 : Slalom

Dans cette tâche, nous avons demandé aux participants de traverser un slalom (Figure 24). Cette tâche nécessite un haut niveau de coordination pour éviter les collisions avec les cônes. Le slalom est composé de 3 cônes alignés à 2 mètres les uns des autres. Entre le premier cône et l'entrée se trouvent une distance de 2 mètres, de même qu'entre le dernier cône et la sortie. L'entrée et la sortie ont toutes deux une largeur de 90 cm.

Figure 24: P11 en train d'effectuer un slalom



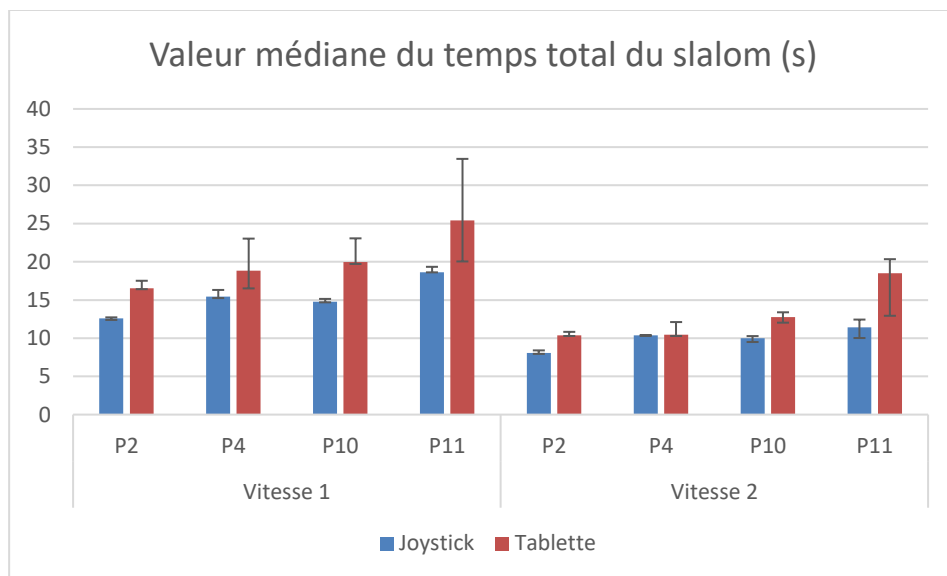
Nous avons voulu tester, si après toutes les précédentes tâches qui peuvent générer un certain niveau de fatigue, l'utilisateur peut toujours effectuer une tâche aussi complexe. Les données recueillies sont le temps nécessaire pour parcourir le slalom ainsi que le nombre de collisions. Le tableau 4 récapitule les performances pour la tablette et le joystick.

Tableau 4 Récapitulatif des résultats de comparaison tablette vs. joystick en tâche de slalome

	Vitesse 1			Vitesse 2		
Valeur médiane de	Joystick	Tablette	Wilcoxon test P value	Joystick	Tablette	Wilcoxon test P value
Temps total (s)	15.2	19.83	0.0007315	10.148	12.07	0.002939
Nombre de collisions	1	4	-----	0	4	-----

Le tableau ci-dessus montre que le joystick est nettement plus rapide que la tablette pour les vitesses 1 et 2. Le graphique ci-dessous détaille les performances médianes de chaque participant.

Figure 25 Récapitulatif des valeurs médianes du temps de traversée du slalom. Les barres d'erreur représentent le minimum et le maximum



Tous les participants ont une performance constante et sont plus rapides avec le joystick. Le nombre de collisions est également plus important dans le cas de la tablette. Ceci pourrait s'expliquer par le facteur "fatigue" associé au facteur "habitude" au joystick notamment dans le cas d'une tâche aussi complexe.

4.3.7 Evaluation subjective

Après chaque session de test, nous avons demandé aux participants de remplir un formulaire relatif à l'échelle d'utilisabilité du système (SUS) (Brooke 1996) (résumé dans le tableau 5) et avons demandé un retour d'information plus ouvert sur le système, en particulier dans le cas de l'interface tactile.

Tableau 5 : Score SUS pour la tablette et le joystick

Participant	Score SUS pour la tablette	Score SUS pour le Joystick
P2	95%	100%
P4	95%	90%
P10	62.5%	90%
P11	62.5%	45%

.Nous leur avons également demandé de remplir un questionnaire post-test inspiré du NASA TLX (Hart 1988) concernant le dispositif de pilotage et les exigences physiques et mentales requises pour son utilisation. Les 4 participants ont convenu que l'interface tactile est moins exigeante physiquement que le joystick. L'exigence mentale pour apprendre à utiliser l'interface tactile n'a également pas posé de problème aux utilisateurs. Cependant, l'exigence mentale en planification, surtout lors des manœuvres complexes leur semble plus conséquente avec la tablette qu'avec le joystick.

4.3.8 Difficultés rencontrées lors de l'étude

Le fait que les participants soient principalement des résidents du centre de rééducation fonctionnelle a été utile dans la mesure où leurs propres ergothérapeutes étaient joignables en cas de besoin. Cependant, nous avons dû également tenir compte de leurs propres contraintes horaires. Ils avaient des séances de thérapie régulières, des cours, d'autres activités... Cela signifie que nous avons dû nous adapter, sur place, à leur emploi du temps, parfois sujet à des changements impromptus. Nous avons également dû nous adapter à leur fatigabilité, en ce sens que certaines sessions de test ont été retardées car le participant s'est senti fatigué ce jour-là pour diverses raisons, par exemple une longue journée d'école.

Ceci nous amène à un autre défi inhérent à l'étude : le fait que la population est considérée comme une population vulnérable. Leur profil de fatigabilité rend plus difficile l'expérimentation dans la mesure où nous devons faire preuve de prudence tout au long des différentes sessions d'essais en prêtant attention aux signes de malaise. Pour cette raison même, P6 n'a pas pu terminer une seule séance d'étude cinématique. Après seulement quelques essais avec le joystick, il nous a demandé d'arrêter les tests car la nature répétitive des tâches le mettait mal à l'aise et le mettait à rude épreuve. Dans son cas, on peut toujours tester l'interface tactile mais dans un cadre plus naturel qui ne nécessite pas de tâches répétitives. Un autre facteur de contrainte était le temps nécessaire pour installer l'appareillage d'expérimentation, notamment les caméras et les marqueurs destinés au suivi de vitesse sur les roues des fauteuils. Ce processus a duré plus de 20 minutes pour certains participants. Même s'il est nécessaire pour la collecte des données, cela a constitué une source d'ennui pour les participants. Dans les études futures de ce type, un appareil de suivi de la vitesse beaucoup plus rapide à installer doit être envisagé. Toujours concernant l'aspect matériel, notre système électronique n'est pour le moment compatible qu'avec les fauteuils roulants dotés d'une connexion R-Net ou Q-logic. Cela a quelque peu réduit la taille initiale de notre population cible dans le centre de rééducation fonctionnelle. Transférer les autres utilisateurs potentiels vers notre propre fauteuil roulant n'était pas possible car il n'était pas bien adapté à leur morphologie. De plus, comme expliqué plus haut, cela pourrait éventuellement les rendre moins à l'aise pendant les tests et introduire un biais important dans les résultats. Les travaux futurs sur le système électronique devraient le rendre compatible avec d'autres systèmes de connexion afin d'être plus polyvalent et ainsi pouvoir faire participer potentiellement un plus grand nombre de sujets. De la même manière, un facteur qui a réduit davantage notre population de tests dans l'étude cinématique a été le fait que deux participants (P1 et P3) ont eu leur propre fauteuil roulant envoyé en réparation durant une partie des tests. Ils avaient emprunté des fauteuils roulants auxquels ils n'étaient pas habitués, ce qui signifiait qu'ils ne pouvaient pas continuer les tests tant qu'ils n'avaient pas récupéré leur propre fauteuil roulant. Malheureusement, cela n'a pas été possible dans les délais impartis pour l'étude.

La plupart des utilisateurs ont indiqué que leur profil de vitesse habituel est défini sur des vitesses élevées en raison de leur manque de force afin de pouvoir atteindre une grande vitesse sans avoir à atteindre la pleine course du levier du joystick. Pendant les tests en vitesse 1, ils ont déclaré se sentir beaucoup plus fatigués qu'avec le niveau de vitesse 2. Nos observations suggèrent que ce sentiment découle de la combinaison de deux facteurs. Premièrement, les utilisateurs ont le réflexe d'appuyer plus fort sur le levier du joystick quand ils ont besoin d'accélérer. Lors des essais, ils étaient moins conscients de la limitation réelle

de la vitesse qui leur donnait envie d'accélérer plus que le niveau de vitesse autorisé. Ainsi, même après avoir poussé plus fort, ils ne pouvaient toujours pas accélérer comme ils le voulaient. Cela conduit au deuxième facteur en ce sens que l'effort qu'ils déploient pour piloter est prolongé dans la mesure où ils ont besoin de plus de temps pour atteindre leur destination. La fatigue s'accumule davantage, ce qui les amène à vouloir accélérer davantage pour atteindre leur destination plus rapidement. Rapidement, la combinaison de ces deux facteurs entraîne un cercle vicieux qui draine la force de l'utilisateur.

A première vue, la nature de transduction de l'interface tactile étant différente de celle du joystick, l'interface tactile devrait rendre ce problème moins important. Avec la tablette, l'utilisateur n'a pas besoin de maintenir une force pour maintenir le déplacement du fauteuil. Ainsi, le cercle vicieux évoqué ci-dessus n'aurait pas dû poser de problème avec l'interface tactile. Cependant, les utilisateurs ont toujours signalé une fatigue accrue lors de mouvements prolongés avec la tablette. La raison derrière cela est leur utilisation, comme mentionné ci-dessus, pour pousser plus fort sur le dispositif transducteur afin d'accélérer. C'est ainsi que nous avons pu voir clairement lors des tests que la plupart des participants appuyaient plus fort sur l'écran de la tablette alors que l'activation du mouvement ne nécessitait qu'un simple toucher. Ceci correspond à une observation similaire dans (Irwin et al. 2012) où les utilisateurs exerçaient une plus grande force que nécessaire afin d'activer un bouton sur un écran tactile. Les participants dans nos tests ont relâché leur force appliquée à l'écran lorsque nous avons explicitement attiré l'attention sur ce point. Ils ont déclaré se sentir moins fatigués après avoir suivi nos conseils. Une future étude sur les caractéristiques du toucher lors du pilotage avec l'interface tactile peut nous aider à mieux caractériser cet effet et de trouver une manière d'y palier.

4.3.9 Discussion des résultats

Dans l'ensemble, tous les participants ont réussi les tests avec les deux appareils. Non seulement ils étaient capables de mener à bien les tâches, mais ils étaient assez agiles, avec les deux dispositifs en se déplaçant dans la salle d'expérimentation par exemple pour se positionner au bon endroit indiqué par l'expérimentateur avant de commencer les différentes tâches. Cela impliquait des accélérations et des ralentissements répétitifs, en évitant des obstacles statiques et en effectuant parfois des manœuvres serrées. Grâce à l'interface tactile, les 4 participants ont pu terminer les sessions d'essai d'une durée de plus d'une heure chacune et nécessitant plus de 30 minutes de conduite en fauteuil roulant sans devoir s'arrêter à cause de la fatigue musculaire. Cependant, ils se sont tous sentis fatigués à la fin de la session, en particulier en raison du caractère répétitif des tests. C'était également le cas pour le joystick, à l'exception du participant 11 qui devait s'arrêter au milieu du test car il se sentait fatigué et avait demandé de terminer le test le lendemain. Ceci suggère que pour lui, l'interface tactile est nettement moins fatigante physiquement et cela est confirmé par ses remarques sur les questionnaires post-test.

Les 4 participants ont convenu que si l'interface tactile est moins fatigante en termes de force physique, elle est plus exigeante en termes de planification. Cela se reflète clairement dans leurs manœuvres serrées, où ils commettent davantage d'erreurs (collisions) et consacrent plus de temps à planifier leur trajectoire. Cela peut être attribué au fait qu'ils sont habitués à utiliser un joystick depuis des années et que l'interface tactile est un nouveau dispositif de pilotage pour eux, comme ils l'ont exprimé à la fin des tests. Les questionnaires et entretiens informels post-test ont également révélé que P2 et P10 préfèrent le joystick, tandis que P4 et P11 préfèrent l'interface tactile en tant que dispositif de pilotage. Dans (Guedira et al. 2018), la préférence des utilisateurs était corrélée à leur niveau de performance respectif avec chaque périphérique. Cependant, les tests de la présente étude suggèrent que leur préférence est plutôt corrélée à la fois au niveau de force physique et à l'âge. P4 et P11 sont à la fois les plus jeunes et avec le moins de force musculaire parmi les 4 participants. P2 et P10 ont également mentionné que s'ils avaient un niveau de force musculaire beaucoup plus faible, leur préférence aurait peut-être basculé vers l'interface

tactile. P10 a même expliqué qu'il est très intéressé par les possibilités d'interaction domotique offertes par la tablette. Il prévoit d'emménager dans une maison équipée de nombreux objets connectés et disposer d'un tel dispositif de pilotage lui serait très utile, surtout s'il ne dispose pas de l'assistance continue d'une tierce partie. Cela pourrait même le pousser dans le futur à considérer l'interface tactile de pilotage en tant que dispositif principal de pilotage s'il parvient à mieux l'utiliser.

Enfin, les utilisateurs estiment que, même s'ils n'avaient peut-être pas été plus efficaces avec l'interface tactile, ils auraient pu obtenir de meilleures performances si on leur accordait plus de temps d'entraînement.

Globalement, le côté positif de l'interface tactile par rapport au joystick est qu'elle a nécessité moins de force pour pouvoir piloter. Sur le plan négatif, elle exigeait plus de charge mentale que le joystick. Nous pouvons cependant supposer que la charge mentale peut diminuer avec le temps, à mesure que l'utilisateur s'y sera habitué. Contrairement au joystick qui, malgré une charge mentale plus légère, nécessitera toujours une certaine charge physique qui ne pourra pas être allégée avec l'entraînement.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les résultats de l'évaluation d'une interface de commande tactile sur un smartphone ou une tablette avec des utilisateurs de fauteuils roulants électriques souffrant de maladies neuromusculaires. Nous avons présenté une étude sur l'attitude et l'acceptation d'un groupe d'utilisateurs de la population cible afin de détecter les tendances qui guideront les futurs essais cliniques de cette nouvelle interface. Nous avons constaté que les participants aux tests étaient capables de comprendre rapidement l'utilisation de cette interface en tant que moyen de pilotage et nous avons établi une procédure efficace pour l'accompagnement de l'utilisateur durant la première session d'initiation. Ensuite, un sous-groupe a participé à un test formel visant à comparer les performances de l'interface tactile avec celles de leurs propres joysticks. Bien que le petit nombre de participants ne nous permette pas de procéder à une généralisation des résultats, les tests suggèrent que l'interface tactile peut être une alternative de pilotage efficace pour certaines personnes atteintes de maladies neuromusculaires et que ses performances ne sont pas très éloignées de celles du joystick. Les tests suggèrent également que les utilisateurs avec moins de force physique peuvent être enclins à utiliser une solution de pilotage si elle réduit la charge physique nécessaire, même si les performances sont légèrement inférieures à celles d'une autre solution exigeante physiquement. Enfin, l'ensemble des tests laisse supposer qu'avec un temps de formation suffisant, les utilisateurs pourraient atteindre des niveaux d'efficacité élevés avec l'interface tactile. Pour nous, cela ouvre l'opportunité d'une étude sur une durée plus longue concernant le pilotage avec l'interface tactile. La prochaine étape pour nous consistera donc à accompagner davantage les utilisateurs lors de leur formation, dans des situations réelles de la vie quotidienne, et à utiliser l'interface tactile sur période prolongée afin d'observer l'évolution de leurs performances sur le long terme.

D'un point de vue plus global, la présente étude dégage un certain nombre de tendances qui permettent de mieux guider des études cliniques futures visant à évaluer le pilotage tactile de fauteuils roulants électriques avec des patients neuromusculaires. Ces tendances peuvent être récapitulées comme suit:

- Une interface tactile sur smartphone reposant sur une métaphore de pilotage ressemblant à celle du joystick est utilisable par des personnes ayant un certain niveau de contrôle moteur manuel même avec une amplitude très réduite
- Il est nécessaire de personnaliser les fonctionnalités de l'interface aux spécificités de chaque utilisateur
- L'utilisateur peut également adapter sa technique de manipulation pour mieux bénéficier des fonctionnalités de l'interface.

- Cette interface pourrait permettre un pilotage avec moins d'effort physique qu'un joystick standard tout en gardant une performance proche.
- Les patients neuromusculaires peuvent privilégier l'utilisation d'un dispositif de pilotage nécessitant moins d'effort physique même si c'est au détriment d'une meilleure performance (dans une certaine mesure).

6 REMERCIMENTS

Nous remercions les ergothérapeutes et le staff du centre de rééducation fonctionnelle Le Brassat pour leur aide, sans laquelle la campagne de test de l'interface tactile présentée dans cette étude n'aurait pas été possible. Leur présence durant les séances de test ainsi que leur retour constructif nous ont grandement aidé à mener à bien nos tests. Nous adressons également nos plus vifs remerciements aux résidents du centre qui ont pris part à l'étude. Malgré leurs difficultés motrices, ils ont montré un grand enthousiasme lors des tests et ils ont été très coopératifs et nous ont donné des retours très constructifs. Nous tenons enfin à remercier l'équipe du Pôle Aides Techniques et Innovation de l'AFM TELETHON l'Association Française contre les Myopathies (AFM) pour leurs conseils et leur aide pour la mise en place de cette campagne de tests avec des personnes atteintes de maladies neuromusculaires.

Ce travail a été financé par l'IDEX Paris-Saclay, ANR-11-IDEX-0003-02

7 REFERENCES

- ▶ Adams, M.J., Johnson, S.A., Lefèvre, P., Lévesque, V., Hayward, V., André, T., Thonnard, J-L. 2013. Finger pad friction and its role in grip and touch. *Journal of The Royal Society Interface* .10 (80): 20120467. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2012.0467>.
- ▶ Ascadi, G. 2019. Duchene Muscular Dystrophy. Web: Retrieved May 11th, 2019 from <https://rarediseases.org/rare-diseases/duchenne-muscular-dystrophy/>
- ▶ Brooke, J. 1996. SUS: a 'quick and dirty' usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*. London: Taylor and Francis.
- ▶ Costa, M. F., Oliveira, A. G., Feitosa-Santana, C., Zatz, M., & Ventura, D. F. (2007). Red-green color vision impairment in Duchenne muscular dystrophy. *American journal of human genetics*, 80(6), 1064–1075. doi:10.1086/518127
- ▶ Cyrulnik, S.E. et Hinton, V.J. 2008. Duchenne muscular dystrophy: A cerebellar disorder? In *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 32, 3 (2008). 486-496
- ▶ Guedira, Y., Bimbar, F., Françoise, J., Farcy R. et Bellik, Y. 2018. Tactile Interface to Steer Power Wheelchairs: A preliminary Evaluation with Wheelchair Users. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, July 11th -13th, 2018, Linz, Austria. Ed. Springer, Berlin, Germany
- ▶ Guedira, Y., Dessailly, E., Farcy, R. et Bellik, Y. 2017. Evaluation cinématique d'une interface tactile pour le pilotage d'un fauteuil roulant électrique : une étude pilote, 29ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme Machine (IHM 2017), Poitiers, France. 2017. 9p.
- ▶ Guedira, Y., Jordan, L., Favey, C., Farcy, R., Bellik, Y. 2016. Tactile Interface for Electric Wheelchair. In *Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS 2016)*, Reno, USA. 2016. 313-314.
- ▶ Guerrier, Y., Naveteur, J., Kolski, C., & Poirier, F. (2014). Communication System for Persons with Cerebral Palsy - In Situ Observation of Social Interaction Following Assisted Information Request. In K. Miesenberger, D.I. Fels, D. Archambault, P. Penáz, W.L. Zagler (Eds.), *Computers Helping People with Special Needs - 14th International Conference, ICCHP 2014*, Paris, France, July 9-11, 2014, *Proceedings, Part I*, Springer, Lecture Notes in Computer Science, pp. 419-426.

- ▶ Harada, H., Tamaoka, A., Kohno, Y., Mochizuki, A., & Shoji, S. (1999). Exacerbation of myasthenia gravis in a patient after interferon- β treatment for chronic active hepatitis C. *Journal of the Neurological Sciences*, 165. 182-183. DOI:10.1016/s0022-510x(99)00082-9
- ▶ Hart, S.G. et Staveland, L.E. 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology*, 52 (1988), 139-183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- ▶ Haslett, J., Sanoudou, D., Kho, A., Bennett, R., Greenberg, S., Kohane, I.S, IS, Beggs, A.H., Kunkel, L. (2002). Gene Expression Comparison of Biopsies from Duchenne Muscular Dystrophy (DMD) and Normal Skeletal Muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(23), 15000-15005.
- ▶ Irwin, C.B., & 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), 1038-43.
- ▶ Isokoski, P. 2004. Performance of menu-augmented soft keyboards. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)* ACM Press, New York, NY USA, 423-430. DOI: 10.1145/985692.985746
- ▶ Jan M. M. S. 2006. Cerebral Palsy: Comprehensive Review and Update. In *Ann Saudi Med* 26(2). March 2006, 123-132.
- ▶ Jasvinder, C. 2011. Stepwise approach to myopathy in systemic disease. In *Frontiers in Neurology* 2 (August 2011) Article 49.
- ▶ Juel, V. C., & Massey, J. M. (2007). Myasthenia gravis. *Orphanet journal of rare diseases*, 2, 44. doi:10.1186/1750-1172-2-44
- ▶ Kirkby, R. L. 2016. *Wheelchair Skill Assessment and Training*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Rota, FL, USA (Nov. 2016)
- ▶ Mackay, W.E. 2000. Responding to cognitive overload: Co-adaptation between users and technology. *Intellectica*. 30, 1 (2000). 177-193
- ▶ Meola, G., Sansone, V., Perani, D., Scarone, S., Cappa, S., Dragoni, C., Cattaneo, E., Cotelli, M., Gobbo, C., Fazio, F., Siciliano, G., Mancuso, M., Vitelli, E., Zhang, S., Krahe, R. et Moxley, R.T. 2003. Executive dysfunction and avoidant personality trait in myotonic dystrophy type 1 (DM-1) and in proximal myotonic myopathy (PROMM/DM-2). In *Neuromuscular Disorders* 10 (Dec. 2003), 813-821.
- ▶ MTES (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), Ministère la Cohésion des Territoires. 2017. *Réglementation Accessibilité Batiment*. Retrieved on March 2017 from <http://www.accessibilite-batiment.fr/>
- ▶ Nair, A.G., Patil-Chhablani, P., Venkatramani, D.V., et Gandhi, R.A. 2014. Ocular myasthenia gravis: A review. *Indian Journal of Ophtalmology* 62, 10 (Oct. 2014), 985–991. DOI: 10.4103/0301-4738.145987
- ▶ Nardes, F., Araújo, A.P., Ribeiro, M.G. (2011). Mental retardation in Duchenne muscular dystrophy. *J Pediatr (Rio J)*, 88(1), 6-16.
- ▶ Oulasvirta, A., & Blom, J. (2008). Motivations in personalisation behaviour. *Interacting with Computers*, 20, 1-16.
- ▶ Pavlakis, S.G., Phillips, P.C., DiMauro, S., De Vivo, D.C. et Rowland, L.P. 1984. Mitochondrial myopathy, encephalopathy, lactic acidosis, and strokelike episodes: A distinctive clinical syndrome. In *Annals of Neurology* 4, 16 (Oct. 1984). 481-488. DOI: <https://doi.org/10.1002/ana.410160409>
- ▶ Pellegrini, N., Guillon, B., Prigent, H., Pellegrini, M, Orlikovski, D, Raphael, J-C et Lo-faso, F. 2004. Optimization of power wheelchair control for patients with severe Duchenne muscular dystrophy. *Neuromuscular Disorders* 14, 5 (May 2004), 297-300. DOI: 10.1016/j.nmd.2004.02.005
- ▶ Rivner, M. H., Pasnoor, M., Dimachkie, M. M., Barohn, R. J., and Mei, L. (2018). Muscle-Specific Tyrosine Kinase and Myasthenia Gravis Owing to Other Antibodies. *Neurologic clinics*, 36 (2), 293–310. doi:10.1016/j.ncl.2018.01.004

- ▶ Rushton, P.W, Kirby, R.L., Routhier, F., et Smith, C. 2014. Measurement Properties of the Wheelchair Skills Test Questionnaire for Powered Wheelchair Users. In *Disabil Rehabil Assist Technol* 11, 5 (Nov. 2014), 400–40. DOI:10.3109/17483107.2014.984778
- ▶ Scherer, K., Bedlack, R.S. and Simel, D.L. (2005). Does this patient have myasthenia gravis? *JAMA*, 293 (15).1906-1914. doi:10.1001/jama.293.15.1906
- ▶ Silverstein, B.A., Fine, L.J et Armstrong, T.J. 1987. Occupational factors and carpal tunnel syndrome. *American Journal of Industrial Medicine* 3, 11 (1987), 343-358. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.4700110310>
- ▶ Sowmini, P. R., Jawahar, M., & Bhanu, K. (2013). Uncommon presentation of a common disorder. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 16(1). 111–113. doi:10.4103/0972-2327.107720
- ▶ Statista.com, Number of smartphone users worldwide from 2014 to 2020 (in billions), Retrieved on July 6th, 2018 from : <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>
- ▶ Sunrise Medical. 2018. Switch-it Smart technologies: Alternative Drive Controls. Web. Retrieved from: <https://www.sunrisemedical.com/getattachment/956dd894-d6ec-4769-9f23-20593e0ad524/Switch-It-Alternative-Drive-Controls-Catalog.aspx>, on June 17th 2019.
- ▶ Sunrise Medical. 2019. MicroPilot: Zero-throw proportional control. Web. Retrieved from: <https://www.sunrisemedical.com/power-wheelchairs/electronics/mini-proportional-joysticks/switch-it-micropilot>, on June 17th 2019.
- ▶ Tapia, .M.A and Kurtenbach, G. (1995). In *Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User interface and software technology. UIST '95*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. ACM New York, NY, USA. 189-185
- ▶ Troise, D., Yoneyama, S., Resende, M.B., Reed, U., Xavier, G.F. and Hasue, H. (2014). The influence of visual and tactile perception on hand control in children with Duchenne muscular dystrophy. In *Developmental Medicine and Child Neurology*, 56 (9). Edited by Bernard Dan. Mac Keith Press. London, UK. 882-887. doi: 10.1111/dmcn.12469
- ▶ Ueda, Y., Suwazono, S., Maedo, S. and Higuchi I. (2017). Profile of cognitive function in adults with duchenne muscular dystrophy. In *Brain and Development*, 49, (3). 225-300. doi: 10.1016/j.braindev.2016.10.005
- ▶ Valiyil, R., & Christopher-Stine, L. (2010). Drug-related myopathies of which the clinician should be aware. *Current rheumatology reports*, 12(3), 213–220. doi:10.1007/s11926-010-0104-3
- ▶ Vinik, A.I., Suwanwalaikorn, S., Stansberry, K.B., Holland, M.T., McNitt, P.M. and Colen, LE. (1995). Quantitative measurement of cutaneous perception in diabetic neuropathy. *Muscle Nerve*, 18 (6). 574-84.
- ▶ Wästlund. E., Sponseller, K. et Pettersson, O. 2010. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications (ETRA '10)*. ACM Press, New York, NY USA, 133-136. DOI: 10.1145/1743666.1743699
- ▶ Wingeier, K., Giger, E., Strozzi, S., Kreis, R., Joncourt, F., Conrad, B., Gallati, S. and Steinlin M. (2011). Neuropsychological impairments and the impact of dystrophin mutations on general cognitive functioning of patients with Duchenne muscular dystrophy. *Journal of Clinical Neuroscience*, 18 (1). 90-95. doi: 10.1016/j.jocn.2010.07.118.

8 BIOGRAPHIE



Youssef GUEDIRA

Doctorant à l'université Paris-Saclay, il prépare sa thèse en Interaction Homme-Machine appliquée aux aides technologiques pour les personnes en situation de handicap. Plus précisément, Il travaille sur l'utilisation du tactile pour piloter les fauteuils roulants électriques.



Delphine DERVIN

Cadre Rééducation Croix-Rouge Française, et responsable plateau technique. De formation initiale ergothérapeute, elle est passionnée par l'accompagnement des personnes en situation de handicap. Ses missions successives de cadre de rééducation puis à présent de responsable d'établissement y sont entièrement liées par les défis du quotidien qui demandent, à tous les acteurs, de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour permettre aux personnes en situation de handicap de vivre en adéquation avec leurs aspirations.



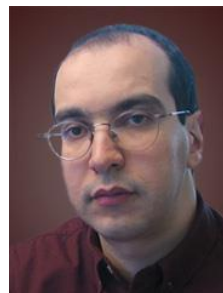
Pierre-Éric BROHM

Cadre ergothérapeute au centre de rééducation fonctionnelle Le Brassat, Croix Rouge Française.



René FARCY

Professeur Université Paris Sud, Spécialité Capteurs Optroniques. Responsable de l'équipe Instrumentation Biomédicale du Laboratoire Aimé Cotton. Son activité principale de recherche porte sur les aides aux déplacements pour les handicapés. Son équipe a conçu les cannes électroniques à Télémétrie laser modèles Télétact et Tom Pouce actuellement utilisées par les déficients visuels. Elle développe actuellement un fauteuil électrique évitant les chutes dans les escaliers et les collisions en toute situation climatique.



Yacine BELLIK

Yacine Bellik est maître de conférences habilité à diriger des recherches au LIMSI où il dirige l'équipe AMI (Architectures et Modèles pour l'Interaction). Il est spécialisé dans la conception, le développement et l'évaluation des interfaces multimodales appliquées en particulier dans le domaine du handicap visuel et du handicap moteur ainsi que dans celui des environnements ambiants intelligents.

Fuzzy4U : un moteur d'adaptation en logique floue pour l'accessibilité des interfaces utilisateurs

Tanguy Giuffrida, Eric Céret, Sophie Dupuy-Chessa, Jean-Philippe Poli

► To cite this version:

Tanguy Giuffrida, Eric Céret, Sophie Dupuy-Chessa, Jean-Philippe Poli. Fuzzy4U : un moteur d'adaptation en logique floue pour l'accessibilité des interfaces utilisateurs. Journal d'Interaction Personne-Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM), 2019, Volume 8, Issue 1, Special issue: the best of IHM'2018 (1), pp.27-59. hal-02390539

HAL Id: hal-02390539

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02390539>

Submitted on 3 Dec 2019

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.

Fuzzy4U : un moteur d'adaptation en logique floue pour l'accessibilité des interfaces utilisateurs

Tanguy Giuffrida

Université Grenoble Alpes,
CNRS, Grenoble INP*, LIG
38000 Grenoble, France.

tanguy.giuffrida@univ-grenoble-alpes.fr

Éric Céret

Université Grenoble Alpes,
CNRS, Grenoble INP*, LIG
38000 Grenoble, France.

Sophie Dupuy-Chessa

Université Grenoble Alpes,
CNRS, Grenoble INP*, LIG
38000 Grenoble, France.

Jean-Philippe Poli

CEA LIST
Laboratoire Analyse de Données
et Intelligence Artificielle
91191 Gif-sur-Yvette, France.

* Institute of Engineering Univ.
Grenoble Alpes

Fuzzy4U: A fuzzy logic adaptation engine for interfaces' accessibility

Abstract. With the massive spread of Internet use, the accessibility of user interfaces (UI) is an ever more pressing need. Much work has been developed on this subject in order to define generic or situational accessibility recommendations and to propose tools for user interface adaptation. However, difficulties remain, particularly related to the complexity of possible contexts of use, such as the multiplicity of characteristics of the context of use, the imprecision of the values assigned to these characteristics and the combination of multiple adaptation rules. This article shows how a dynamic adaptation engine based on fuzzy logic can be used to implement accessibility recommendations. We show how this approach makes it possible to overcome these difficulties through fuzzy logic with the capacity to manage combinatorial rules, making it possible to take into account potentially complex contexts of use. This approach is illustrated with a concrete example.

Key words: User Interface adaptation, fuzzy logic, accessibility, context of use, adaptation rules

Résumé. Avec la diffusion massive de l'utilisation d'Internet, l'accessibilité des interfaces est un besoin toujours plus prégnant. De nombreux travaux se sont penchés sur ce sujet afin de définir des recommandations d'accessibilité génériques ou situationnelles, et proposer des outils d'adaptation des interfaces utilisateurs. Cependant, des difficultés, notamment liées à la complexité des contextes d'usage possibles, demeurent tels que la multiplicité des caractéristiques du contexte d'usage, l'imprécision des valeurs attribuées à ces caractéristiques et la combinaison de multiples règles d'adaptation. Cet article montre comment un moteur d'adaptation dynamique basé sur la logique floue peut être utilisé pour implémenter les préconisations en accessibilité. Il montre comment cette approche permet de dépasser ces verrous grâce à la logique floue et sa gestion de la combinatoire des règles, permettant de prendre en compte un contexte d'usage potentiellement complexe que nous illustrons avec un exemple concret.

Mots-clés : Adaptation d'Interface Utilisateur, logique floue, accessibilité, contexte d'usage, règles d'adaptation

Édité par Joëlle Coutaz, Université de Grenoble et Patrick Girard, Université de Poitiers
Soumis le 15 juin 2019 – Accepté le 30 septembre 2019

1 INTRODUCTION

L'utilisation de l'informatique s'impose de plus en plus dans la vie quotidienne, notamment à travers Internet. On peut penser, par exemple, à la diffusion massive des réseaux sociaux, à l'accès aux comptes bancaires, aux déclarations d'impôts, aux prises de rendez-vous médicaux.

En France, le code de l'action sociale et des familles promeut l'utilisation des technologies numériques pour prévenir l'isolement, notamment dans l'article L233-1 de la loi 2015-1776 du 28 décembre 2015. Pourtant, le Haut Conseil de la famille, de l'enfance et de l'âge, dans son rapport du 16 mai 2019 (HCFEA, 2019), note l'existence d'une "fracture numérique" qui atteint "certains territoires [et] certains publics fragiles". Cette fracture retranscrit la difficulté d'une part importante de la population à utiliser l'outil informatique et constitue un facteur supplémentaire d'isolement. Ces personnes - notamment les personnes en difficulté neurocognitive ou les personnes âgées - montrent en effet une forte anxiété et un sentiment d'incompétence vis-à-vis de ces dispositifs (Quillion-Dupré et al., 2018). Par rapport à la population générale, elles ont besoin de plus de temps pour s'approprier l'utilisation d'une nouvelle technologie et requièrent plus d'aide et d'entraînement (Quillion-Dupré et al., 2018).

Si l'accompagnement humain est un facteur important de succès pour permettre à ces personnes d'accéder à l'usage des outils informatiques (Berner, 2014), la facilité d'utilisation des dispositifs est un point critique pour en favoriser l'adoption (Alm et al., 2007) : les difficultés vécues par ces utilisateurs posent de façon plus aiguë la question de l'accessibilité. L'accessibilité est définie par le W3C comme les moyens à mettre en œuvre pour « permettre un accès égal et des opportunités égales à tous les utilisateurs », afin notamment de « rendre possible une égale participation des personnes handicapées » (WAI, 2005).

Cependant, la Classification Internationale pour le Fonctionnement, le Handicap et la Santé de l'OMS insiste fortement sur le fait que le handicap est une limite imposée à l'engagement de la personne dans des activités, révélée, accrue ou allégée par des facteurs socio-environnementaux persistants ou ponctuels. Ainsi une personne atteinte de dégradation neurocognitive pourrait confortablement préparer ses repas ou discuter avec un membre de sa famille (des routines acquises depuis des années) tandis qu'elle aurait le plus grand mal à acquérir les bases d'usage d'un dispositif informatique : il s'agit alors d'une situation persistante. Une autre personne pourrait avoir assimilé l'envoi de mails, mais se trouver totalement impuissante lorsque le système lui afficherait un message urgent concernant une mise à jour, une difficulté ponctuelle ou un handicap situationnel (Wobbrock, 2019).

Au regard de ces situations, le besoin d'accompagnement est double : les dispositifs informatiques doivent prendre en compte non seulement les préférences de l'utilisateur, mais aussi ses limitations, qu'elles soient durables ou ponctuelles. En d'autres termes, l'adaptativité dynamique et situationnelle des interfaces utilisateurs devient un élément crucial des systèmes du futur.

Pourtant, les préconisations, comme nous le détaillerons dans la section 5, sont souvent des principes généraux ("le contenu doit être lisible par un enfant" d'environ 14 ans (Loranger, 2017)) et statiques ("le ratio de contraste recommandé est 4,5:1" (WCAG, 2009)), parfois complexes à combiner, voire contradictoires. Adapter une interface utilisateur à la situation, au handicap ponctuel, ne peut pas se faire sur la base de principes statiques : l'interface utilisateur doit réagir à la situation présente avec toute sa complexité, pour maintenir le niveau de service offert et préserver l'utilisabilité (Thevenin et Coutaz, 1999).

De nombreux travaux ont déjà traité des Interfaces Homme-Machine (IHM) adaptatives, des années 80 (Edmonds, 1981 ; Schneider-Hufschmidt et al., 1993 ; Kolski et al., 1998), jusqu'à récemment (Sottet et al., 2007 ; Blumendorf et al., 2008 ; Chesta et al., 2004 ;

Florins, 2006 ; Nguyen et al., 2016). Néanmoins, ces approches sont souvent complexes, comme l'illustrent les travaux en Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) (Whittle et al., 2014), largement explorées dans la littérature (Thevenin et al., 2003 ; Miñon et al., 2016 ; Paternò et al., 2009). De plus, des verrous scientifiques demeurent, en particulier si l'adaptation prend en compte l'utilisateur et pas seulement la plate-forme et l'environnement (Miñón et al., 2016 ; Yigitbas et al., 2017 ; Abrahão et al., 2017). Nous avons établi qu'il reste, *a minima*, trois verrous :

(a) la multiplicité des caractéristiques du contexte d'usage (le triplet <utilisateur, plate-forme, environnement>, (Calvary et al., 2003)), et en particulier du modèle de l'utilisateur : le cluster Virtual User Modelling and Simulation (VUMS, 2013) a identifié plus de 250 caractéristiques utiles pour simuler un utilisateur humain, en ne focalisant que sur les caractéristiques physiques de l'humain ;

(b) l'imprécision des valeurs attribuées à ces caractéristiques, que cette évaluation soit faite par capture (on peut par exemple inférer l'âge de l'utilisateur à partir d'une image prise par sa caméra, mais la précision est inférieure à 50% (Jung et al., 2018)) ou par déclaration (on peut demander à l'utilisateur de déclarer son acuité visuelle, mais l'incertitude sur la valeur collectée est ici aussi élevée (Jasberg et al., 2018)) ;

(c) la combinaison des règles d'adaptation : prendre en compte les multiples caractéristiques du contexte d'usage nécessite, sous une forme ou une autre (transformations de modèles, patrons de solutions, règles logiques, etc.), de définir de multiples règles, puis de les combiner pour obtenir une solution en résolvant à la fois le compromis entre les différentes règles et la gestion performante de cette combinatoire (Yang et Shao, 2007).

Avec l'objectif d'aborder ces trois verrous, nous proposons une approche basée sur la logique floue pour gérer l'adaptation au contexte d'usage. Notre approche a fait l'objet d'une première évaluation par des experts (Giuffrida et al., 2019). Nous focalisons ici sur l'intérêt de notre approche pour l'accessibilité.

Nous commençons par présenter la notion d'accessibilité, puis l'état de l'art en section 3, avant d'introduire en section 4 les concepts de la logique floue. La section 5 présente l'architecture logicielle de notre solution. Nous présentons ensuite, en section 6, notre prise en compte des préconisations d'accessibilité suivie, en section 7, par leur mise en œuvre, avant de conclure par la discussion de la section 8.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Une prise en compte de l'incertitude des valeurs du contexte d'usage et de la combinatoire des règles via la logique floue
- ✓ La possibilité d'effectuer un passage à l'échelle afin de gérer des contextes d'usage complexes

2 ACCESSIBILITE

2.1 La notion d'accessibilité

La notion d'accessibilité fait l'objet d'un travail important et ancien du World Wide Web Consortium (W3C), qui la décline dans plusieurs documents. Nous-nous sommes principalement appuyés 1) sur les règles normatives du W3C, présentées dans le Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) de 2009 qui contient des recommandations génériques sur l'accessibilité ; 2) sur les Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes (abrégé EAPM dans la suite du document) de 2016 qui décrivent les besoins des personnes malvoyantes pour que le contenu, les outils et les technologies électroniques leur soient accessibles ; et 3) sur les recommandations du projet européen Web Accessibility Initiative: Ageing Education and Harmonisation (WAI-AGE) de 2010 qui permettent d'augmenter l'accessibilité du web pour les personnes âgées ainsi que pour les personnes

en situation de handicap. Ces deux derniers documents sont des documents de travail du W3C.

Dans cet article, nous présentons les préconisations concernant l'accessibilité, en particulier l'accessibilité du Web, qui a fait l'objet d'un plus grand nombre d'études en raison de la généralisation de son usage. L'accessibilité du web peut en effet être vue comme une problématique d'adaptation au contexte : certaines personnes ou certaines situations entraînent des besoins particuliers que l'adaptation peut aider à traiter.

2.2 Exemple fil rouge

Bernard a 79 ans. De façon très classique à cet âge, sa vision est dégradée et il est atteint de cataracte. Cette affection induit une nette diminution de sa perception des couleurs (daltonisme) et une légère photophobie (sensibilité douloureuse aux couleurs trop lumineuses). Bernard a donc l'habitude de grossir les polices de caractères lorsqu'il consulte un site Internet. Il souffre aussi de douleurs articulaires qui l'obligent à utiliser une canne pour marcher. Mais Bernard reste actif et vient de partir en voyage à Lyon. Il souhaite résider dans un hôtel qu'on lui a recommandé, et doit utiliser le métro pour se rendre de la Gare de Part-Dieu à cet hôtel. Il ne connaît pas très bien la ville, mais sa fille lui a montré que l'hôtel propose une page décrivant les moyens d'accès. Bernard souhaite donc consulter cette page à la fois en entrant dans le métro, pour être sûr de la ligne et de l'arrêt, et à la sortie du métro pour se diriger jusqu'à l'hôtel.

Cet exemple illustre les règles suivantes d'adaptation dans le but de garantir l'accessibilité :

- En raison d'une acuité visuelle amoindrie : la taille de la police de caractères est augmentée, les espacements entre lettres, entre mots et entre lignes sont augmentés ;
- Si l'utilisateur est un senior : la taille de police de caractères est augmentée, la taille de police de caractères des liens est augmentée, la luminosité du fond d'écran est éclaircie, les espacements entre mots, entre lignes et entre paragraphes sont augmentés ;
- Si l'utilisateur est daltonien ou s'il a une autre forme de diminution de perception des couleurs : les couleurs sont modifiées afin de remplacer celles qui sont mal perçues ;
- En cas de photophobie, la luminosité du fond d'écran est assombrie, le niveau de contraste est réduit ;
- Si la luminosité ambiante est forte (plein soleil) : la luminosité du fond d'écran est éclaircie, le niveau de contraste est augmenté ;
- Si la luminosité ambiante est très faible : la luminosité du fond d'écran est assombrie.

3 ETAT DE L'ART

Notre état de l'art porte sur l'analyse de trois types de travaux : d'une part, ceux portant sur l'adaptation au service de l'accessibilité, puis les articles traitant des techniques d'adaptation sans logique floue, puis avec l'utilisation de la logique floue. En matière d'adaptation, la littérature distingue les systèmes adaptables et adaptatifs (Thevenin et al., 2003). Un système adaptable « est personnalisable sur intervention explicite de l'utilisateur qui peut agir sur les paramètres fixés par le concepteur » ; un système adaptatif « est doué de discrimination. Il sait reconnaître la situation (parmi plusieurs déclencheurs fixés par le concepteur) et adopte la réaction (recommandation) fixée elle aussi par le concepteur pour cette situation. Mais le système est incapable d'évaluer l'effet de sa réaction ».

Nous analysons les travaux au regard de quatre critères correspondant aux verrous présentés en introduction : la prise en charge de la multiplicité des caractéristiques des contextes d'usage (leur étendue), le traitement de l'incertitude des valeurs des caractéristiques des contextes d'usage, le niveau de complexité des règles et de la

combinaison des règles. Les travaux sur ces trois domaines étant très nombreux, seuls les plus représentatifs du domaine sont présentés ici. Concernant le contexte, nous nous appuyons sur la définition de (Dey, 2001) : « toute information pouvant être utilisée pour caractériser la situation d'une entité. Une entité étant une personne, un endroit, ou un objet considéré comme pertinent pour l'interaction entre un utilisateur et une application, y compris l'utilisateur et les applications elles-mêmes ». Plus précisément nous étudions son étendue au regard du triplet <utilisateur, plate-forme, environnement> (Calvary et al., 2003).

Certains travaux de notre état de l'art peuvent être considérés comme relevant de plusieurs catégories. Pour faciliter la lecture, ils sont présentés dans la catégorie qui nous semble la plus pertinente. Une synthèse de tous les travaux, indépendamment de leur catégorie, est fournie en section 3.4. Dans les sous-sections qui suivent, les travaux sont décrits selon l'ordre temporel de leur parution.

3.1 Travaux centrés sur l'accessibilité

La notion d'accessibilité fait l'objet d'un travail de normalisation du World Wide Web Consortium (W3C) depuis la fin des années 1990, mais reste un domaine à explorer du fait de la multiplicité des situations à prendre en compte (Schmutz et al., 2017). Nous présentons ci-dessous quelques travaux que nous estimons représentatifs des différentes orientations pour l'amélioration de l'accessibilité à destination des personnes atteintes de troubles divers.

(Richards et al., 2004) présentent un mécanisme d'adaptation des pages Web qui prend en compte plusieurs aspects de l'accessibilité. Ce mécanisme s'appuie sur 13 possibilités de changement (taille de police, espacement entre les caractères, modalité vocale, suppression du multi-colonnage, effacement des images, des fonds et des animations...). Il y a donc peu de règles et peu d'indications sur leur niveau de complexité. La combinaison de règles est envisagée (les utilisateurs multi-handicapés doivent pouvoir définir leurs règles ainsi que leurs combinaisons), sans plus de précision. Le contexte d'usage est réduit à quelques caractéristiques de l'utilisateur (âge, degré de handicap visuel, limitation cognitive, difficultés motrice des mains, manque d'expérience avec l'informatique), sans qu'il soit question de leur validité ou de leur incertitude.

(Kurniawan et al., 2006) présentent une liste de handicaps (visuels, moteurs, cognitifs, auditifs) liés à l'âge, déclinés en 21 caractéristiques (fatigue oculaire, réduction du champ visuel, ralentissement des réponses motrices, affaiblissement de la mémoire de travail...), avec leurs correspondances en termes d'adaptation (évitement des couleurs très soutenues, recentrage des informations critiques, remplacement des glisser-déplacer et des double-clics par d'autres interactions, ajout de rappels mémoriels...). Le contexte d'usage est donc centré sur l'utilisateur, et les règles sont à la fois simples et deux à deux exclusives : il n'y a pas de combinaison. L'incertitude n'est pas évoquée.

(Yang et Shao, 2007) proposent un système basé sur des règles d'adaptation pour prendre en compte le contexte de l'utilisateur et ses besoins. Le contexte comporte la situation de l'utilisateur (au bureau, en réunion, en train de conduire), les besoins d'accessibilité (classique, aveugle, malvoyant, sourd, malentendant) et les ressources disponibles (réseau, dispositif). Le contexte d'usage couvre donc les trois dimensions (utilisateur, plate-forme, environnement), mais de façon très partielle. L'adaptation reste relativement sommaire : les exemples fournis proposent de couper ou d'augmenter le son, d'afficher ou de supprimer les images, d'augmenter la taille de police et d'adapter la qualité audio/vidéo à la performance du réseau et à la taille de l'écran. Les règles sont donc simples et ne nécessitent pas de gestion de leur combinaison.

(Ghiani et al., 2017) ont pour but de fournir aux utilisateurs finaux un système adaptable, leur permettant de définir les règles à appliquer afin de leur permettre de personnaliser facilement et de manière autonome, le comportement de leurs applications pour l'Internet des Objets. Ils proposent un environnement permettant aux utilisateurs de spécifier facilement ces règles sous la forme de couple événement/action en limitant les conditions

aux éléments de contexte effectivement utilisables dans la situation de l'utilisateur. Cependant, cet article ne présente pas de règles d'adaptation à proprement parler et, s'il mentionne que l'utilisateur peut définir des règles combinées à l'aide des opérateurs binaires ET, OU et NON, il n'est pas mentionné de moyen de définir des priorités ou des poids associés aux règles pour gérer cette combinaison.

(Kolekar et al., 2018) proposent une approche pour fournir des IHM adaptatives dans le domaine de l'apprentissage, en prenant en compte le style d'apprentissage de l'utilisateur. Les utilisateurs sont catégorisés selon 8 styles d'apprentissage (actif, réflexif, visuel, verbal...), qui induisent des choix différents dans les media et les contenus à proposer. Ainsi, un apprenant visuel se verra proposer des supports graphiques (images, graphes, vidéos), tandis qu'un apprenant verbal disposera plutôt de textes, méls et annonces. Dans cette approche, le seul élément du contexte d'usage est le style d'apprentissage. Les règles ne peuvent pas être complexes et ne peuvent être combinées puisque les différents styles sont mutuellement exclusifs.

3.2 Approches sans logique floue

Cameleon (Thevenin et al., 2003) est une approche de référence, basée sur les modèles qui permet la génération dynamique d'IHM adaptée à leur contexte d'usage. Il s'appuie sur un processus de réification en 4 niveaux d'abstraction : modèle de tâches, IHM abstraite, IHM concrète et enfin IHM finale. Théoriquement, toutes les caractéristiques du contexte peuvent être prises en compte. Rien ne mentionne l'incertitude de leurs valeurs. Les règles d'adaptation sont des transformations de modèles appliquées conditionnellement selon le contexte d'usage, qui doivent être deux à deux exclusives, ce qui est particulièrement complexe à obtenir, par exemple lorsque deux caractéristiques devraient induire des adaptations antagonistes.

Maria (Paternò et al., 2009) est un environnement de développement d'IHM basé sur les modèles capable de générer dynamiquement des IHM adaptées aux différentes plates-formes utilisées par l'utilisateur en cas de migration d'une plate-forme à l'autre. L'article se focalise sur l'aspect plate-forme du contexte d'usage.

Supple (Gajos et al., 2010) prennent en charge la génération automatique d'IHM adaptées aux capacités, aux appareils, aux tâches, et aux préférences de chaque utilisateur. Les capacités visuelles et motrices sont les principales caractéristiques utilisateurs prises en charge lors de l'adaptation et 40 facteurs d'interface utilisateur (par exemple, la taille de police) sont considérés afin d'optimiser la disposition des éléments de l'IHM. Il a été noté dans (Peissner et al., 2012) que les performances de Supple sont problématiques car elles excèdent des temps raisonnables ; cela serait donc d'autant plus vrai en cas de combinaison complexe des règles.

(Lehmann et al., 2010) définit une architecture en trois couches (3-layer architecture) pour la conception d'IHM adaptative. L'adaptation se base sur le contexte d'usage et vise les environnements intelligents. Les informations utilisées sont directement lues à partir de capteurs, sans gestion de l'incertitude. Le processus d'adaptation se limite à des « situations types ».

(Genaro Motti et al., 2012) se penchent sur l'utilisation de l'Apprentissage Automatique (Machine Learning) pour adapter des IHM au contexte d'usage, principalement dans le but d'optimiser les interactions des utilisateurs et de limiter leurs erreurs. L'Apprentissage Automatique permet de gérer des données complexes et floues, et de calculer des inférences complexes à partir de celles-ci. Cependant, l'Apprentissage Automatique nécessite de recueillir une base de connaissances importante avant de proposer des adaptations améliorant effectivement l'expérience utilisateur. De plus, cet article présente des cas d'applications potentiels, mais aucun n'a réellement été mis en pratique.

MyUI (Peissner et al., 2012) est une infrastructure de développement d'IHM visant à améliorer l'accessibilité par le biais d'une adaptation à l'utilisateur. Les règles d'adaptation sont ici gérées grâce à des patrons. Ces travaux listent un grand nombre de caractéristiques utilisateurs. Cependant, ces caractéristiques sont principalement déclarées, et MyUI utilise des seuils fixes pour définir les différents états d'une caractéristique. En termes de règles, MyUI se focalise sur l'amélioration de l'accessibilité en fonction de certains handicaps.

Cedar (Akiki, 2016) fournit une architecture facilitant le développement d'IHM adaptatives au sein de progiciels, basé sur des simplifications en fonction de rôle. Cedar permet ainsi d'avoir une adaptation efficace, mais dans un cadre contrôlé.

(Miñon et al., 2016) propose, quant à lui, un système nommé « Adaptation Integration System », basé sur Cameleon. Ce système vise à intégrer des exigences d'accessibilité pour des personnes en situation de handicap en incluant les règles d'adaptation dans le processus de développement. Ce travail utilise des caractéristiques peu nombreuses et gère la combinaison de handicaps par la définition de sous-ensembles prédéfinis qui limitent la puissance de l'approche.

3.3 Approches d'adaptation des IHM basées sur la logique floue

Il existe aussi des travaux intégrant la logique floue pour la réalisation de systèmes adaptatifs.

(Beka Be Nguema et al., 2000) décrivent le développement d'une IHM tolérante à l'erreur humaine (ou HETI, pour Human-Error-Tolerant Interfaces) lors du contrôle d'un processus industriel simple. Le cas d'étude présenté est relativement simple, ne comprenant que 5 règles floues, possédant des poids, et dont la combinatoire est gérée manuellement au sein des règles. Cette contribution ne prend pas non plus en compte de caractéristiques utilisateurs, uniquement leurs actions lors du processus industriel.

(Nyongesa et al., 2003) présentent une autre approche en logique floue pour l'adaptation de page web afin d'améliorer l'expérience utilisateur. Elle se base cependant sur 7 cas d'utilisation, par exemple, Passer une commande et Effectuer une recherche. Les données sont inférées à partir des comportements utilisateurs, limitant de fait la taille du modèle utilisateur et donc les règles d'adaptation. Cette contribution n'aborde donc pas la question de la combinaison des règles qui nous semble centrale.

FSAM (Cao et al., 2005) est un outil basé sur la logique floue permettant de choisir le service le plus adapté à un utilisateur en fonction de son contexte d'usage. Ces travaux se restreignent à un choix entre des services prédéfinis et n'abordent pas les questions de l'interaction homme-machine.

(Desruelle et al., 2011) proposent une approche en logique floue pour le développement d'applications mobiles adaptatives, pour des plates-formes mobiles aux performances diverses (hardware, OS, API, etc.). L'utilisateur n'est pas pris en compte, limitant de fait le nombre de caractéristiques et leur incertitude.

(Papatheocharous et al., 2012) proposent un mécanisme d'adaptation d'IHM basé sur la logique floue, considérant trois facteurs cognitifs des utilisateurs définis par (Riding et Cheema, 1991) : « Verbal/Imager », « Analyst/Wholist », et capacité de la mémoire de travail, chacun de ces aspects ayant des implications particulières sur le design. Ces travaux ne gèrent donc qu'un nombre restreint de caractéristiques. De plus, l'approche comprend une gestion manuelle de la composition des règles, ce qui limite les compétences du système et sa capacité à prendre en charge des situations inattendues.

(Soui et al., 2013) présentent une approche pour la personnalisation d'IHM grâce à la logique floue. Ces travaux utilisent des relations sémantiques entre composants d'IHM et préférences utilisateurs afin de sélectionner les composants les plus adaptés. Le cas d'étude présenté ne donne qu'une seule règle, à deux entrées et une sortie, et la combinatoire entre

les entrées a été gérée manuellement au sein de la règle. Ce travail ne prend donc pas en compte des aspects qui nous semblent importants tels que l'étendue du contexte d'usage et la combinaison des règles.

Enfin, (Cueva-Fernandez et al., 2016) proposent un outil qui permet à des conducteurs ou des passagers de voiture de développer des applications au moyen d'une interface vocale. La logique floue est ici utilisée pour calculer le niveau d'expertise et de concentration de l'utilisateur : débutant, intermédiaire ou avancé, chaque niveau impliquant la fourniture de plus ou moins d'options et d'informations. Les règles floues utilisées sont au nombre de 7. Elles utilisent 10 caractéristiques (nombre d'applications créées ; nombre de demandes d'aide ; nombre de jurons...) afin de modifier une sortie : le niveau d'expertise. Cette utilisation de la logique floue ne correspond donc pas à ce que nous souhaitons faire en termes de règle d'adaptation.

3.4 Analyse

Notre analyse des travaux existants s'appuie sur des critères relatifs aux difficultés de réalisation de moteur d'adaptation. Il s'agit de : 1) l'étendue du contexte d'usage pris en compte en termes de couverture des 3 aspects (utilisateur, plate-forme, environnement) ainsi que du nombre de caractéristiques considérées, 2) la gestion de l'incertitude sur les valeurs des caractéristiques du contexte d'usage, 3) la complexité et 4) la combinaison des règles d'adaptation.

Le tableau 1 regroupe les différents travaux cités ci-dessus et les évalue au regard de nos critères avec des boules de Harvey. Les critères considérés permettent de regrouper les différents travaux présentés dans les sous-sections précédentes.

Les travaux centrés sur l'accessibilité et décrits en section 3.1 (Richards et al., 2004 ; Kurniawan et al., 2006 ; Yang et Shao, 2007 ; Ghiani et al., 2017 ; Kolekar et al., 2018) se focalisent sur l'utilisateur pour le calcul des adaptations, sans toutefois prendre en compte un nombre important de caractéristiques. La prise en compte de l'étendue du contexte d'usage peut donc être considérée comme limitée. En matière d'adaptation, il est parfois difficile de savoir si ces approches sont statiques, adaptatives ou adaptables. Enfin, l'incertitude, la complexité ou la combinaison des règles ne sont que rarement mentionnées et ne sont pas traitées dans les travaux sur l'accessibilité.

Les travaux (Thevenin et al., 2003 ; Paternò et al., 2009 ; Gajos et al., 2010 ; Lehmann et al., 2010 ; Genaro Motti et al. 2012 ; Peissner et al., 2012 ; Akiki, 2016 ; Miñon et al., 2016), décrits en section 3.2, traitent tous d'adaptation dynamique en fonction d'un contexte d'usage plus ou moins étendu et comprenant un nombre plus ou moins élevé de caractéristiques. Ces travaux, à l'exception de (Genaro Motti et al., 2012) détaillé page suivante, s'appuient sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Cependant, selon (Akiki et al., 2014), l'IDM ne parvient pas à produire des IHM adaptables jusqu'aux utilisateurs finaux. En effet, les approches IDM souffrent de plusieurs limites : (1) le paradigme, qui repose sur des modèles et des langages complexes, est difficile à apprendre (Marçal de Oliveira et al., 2015) et encore plus à maîtriser par les développeurs (Myers et al., 2000 ; Abrahao et al., 2017). Les développeurs ont des difficultés à produire les « bons modèles à chaque niveau d'abstraction » (Lütjen et al., 2014). De plus, l'IDM ne parvient pas non plus à garantir que le système résultant sera fonctionnel (Mussbacher et al., 2014); (2) lorsqu'ils adoptent une approche basée sur les modèles, les développeurs doivent produire tous les modèles et transformations nécessaires avant de générer les interfaces utilisateur, ce qui conduit à une sorte d'effet tunnel (Deuff et al., 2013) ; (3) la génération d'IHM par l'IDM n'est pas suffisamment mature pour couvrir tous les besoins des utilisateurs finaux, et notamment la capacité de basculer entre modalités (Coutaz, 2010) ; (4) la convivialité des interfaces utilisateur générées par les approches IDM est généralement considérée comme faible (Meixner et al., 2011) ; de plus, les modèles étant complexes, leur utilisation est réservée à des experts, ce qui empêche la participation des utilisateurs finaux au processus de

Tableau 1. Comparaison des travaux de l'Etat de l'Art en fonction des critères ciblés

Approches	Etendue du contexte d'usage	Incertitude	Complexité	Combinaison des règles
(Richards et al., 2004)	◐	○	○	○
(Kurniawan et al., 2006)	◐	○	○	○
(Yang et Shao, 2007)	◐	○	○	○
(Ghiani et al., 2017)	◐	○	○	○
(Kolekar et al., 2018)	◐	○	○	○
Cameleon (Thevenin et al., 2003)	●	○	○	◐
Maria (Paternò et al., 2009)	◐	○	○	○
Supple (Gajos et al., 2010)	◐	○	○	○
3-layer architect (Lehmann et al., 2010)	●	○	○	○
MyUI (Peissner et al., 2012)	●	○	○	◐
Cedar (Akiki, 2016)	◐	○	○	○
(Miñon et al., 2016)	●	○	○	◐
(Genaro Motti et al., 2012)	●	●	○	●
(Beka Be Nguema et al., 2000)	○	●	○	○
(Nyongesa et al., 2003)	◐	●	○	○
FSAM (Cao et al., 2005)	◐	●	○	◐
(Desruelle et al., 2011)	○	●	○	◐
(Papatheocharous et al., 2012)	○	●	○	○
(Soui et al., 2013)	○	●	○	○
(Cueva-Fernandez et al., 2016)	○	●	○	○

● : traité, ◐ : partiellement traité, ○ : non traité

développement et bloque ainsi l'utilisation des approches centrées utilisateurs, recommandées pour assurer leur satisfaction (Akiki et al., 2014 ; Abrahao et al., 2017). Par conséquent, il est difficile d'atteindre les attentes utilisateurs en termes de facilité d'utilisation, d'apprentissage, de satisfaction, d'attractivité, les affects ou les émotions induits – en bref, une bonne expérience utilisateur (Abrahao et al., 2017 ; ISO 9241-210:2010 ; Law et al., 2009). De manière générale, les travaux sur l'adaptation au contexte ne se penchent pas sur l'incertitude, la complexité ou la combinaison des règles.

Les travaux de (Beka Be Nguema et al., 2000 ; Nyongesa et al., 2003 ; Cao et al., 2005 ; Desruelle et al., 2011 ; Papatheocharous et al., 2012 ; Soui et al., 2013 ; Cueva-Fernandez et al., 2016) utilisent la logique floue et prennent bien en compte l'incertitude des valeurs. Dans les travaux de (Cao et al., 2005 ; Desruelle et al., 2011), la composition des règles est gérée par la logique floue, mais l'absence de prise en compte d'un contexte d'usage à large couverture limite les capacités de la solution. Aucun de ces travaux n'aborde vraiment la question de la combinaison des règles.

Enfin, les travaux de Genaro Motti (Genaro Motti et al., 2012) ont les meilleures notes globales, gérant 3 de nos 4 critères. Cependant, l'utilisation de l'Apprentissage Automatique

nécessite de disposer d'une base de connaissances importante – et donc difficile à acquérir – avant de pouvoir effectuer des adaptations correspondant effectivement aux besoins des utilisateurs.

Afin de dépasser les limites des travaux actuels et de proposer une solution qui permette de gérer l'incertitude du contexte et de nombreuses caractéristiques et règles d'adaptation, nous nous intéressons à la réalisation d'un système d'adaptation des IHM basé sur la logique floue. Pour aller au-delà des propositions existantes en logique floue, nous montrerons son intérêt pour deux aspects peu abordés jusqu'alors qui sont la complexité des règles et la combinaison des règles d'adaptation.

4 LOGIQUE FLOUE

Afin de comprendre l'utilisation de la logique floue pour l'adaptation des IHM, cette section en présente les principes et son processus d'inférence.

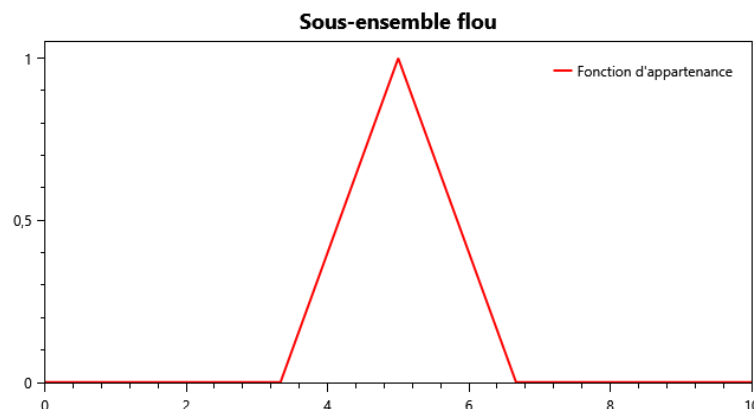
4.1 Systèmes experts flous

Les systèmes experts flous sont des algorithmes d'intelligence artificielle capables de reproduire des raisonnements à partir de règles basées sur la logique floue. La logique floue peut être vue comme une extension de la logique booléenne classique pour prendre en compte l'incertitude et l'imprécision : alors que la logique classique ne considère que deux valeurs (« vrai » et « faux »), la logique floue considère un ensemble infini de valeurs réelles comprises entre 0 et 1. Cette logique a été introduite par Zadeh (Zadeh, 1965) afin de se rapprocher du raisonnement humain et d'éviter les effets de seuil des opérateurs de comparaison. La logique floue permet également d'écrire des règles plus proches du langage naturel.

4.2 Concepts de sous-ensemble flou et de variable linguistique

La logique floue est basée sur le concept de sous-ensemble flou. Soit X l'univers du discours, c'est-à-dire un ensemble d'objets dénotés x . Un sous-ensemble flou A de X est totalement caractérisé par une fonction appelée « fonction d'appartenance ». Cette fonction indique à quel point un objet x appartient à X , alors que dans les ensembles « crisp » (le terme « crisp » se définit par opposition à flou), les objets appartiennent ou non à l'ensemble. Les sous-ensembles flous sont donc utiles pour représenter l'imprécision des entrées ou l'incertitude liée aux connaissances mises en œuvre. La figure 1 représente un sous-ensemble flou défini sur $[0;10]$ avec une fonction d'appartenance triangulaire qui représente « approximativement 5 ».

Figure 1. Exemple de sous-ensemble flou

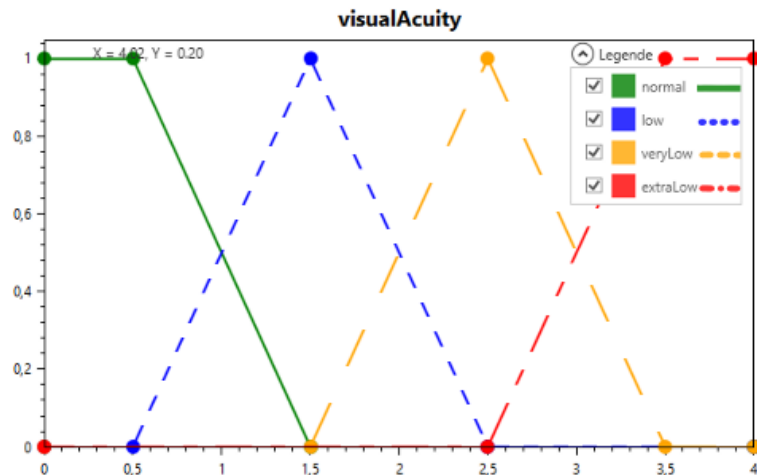


Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes : triangulaire, trapézoïdale, Gaussienne, etc.

Le concept suivant dérive des sous-ensembles flous et s'appelle « variable linguistique » (Zadeh, 1975) qui est un triplet (V, X_V, T_V) défini par : 1) V , son nom ; 2) X_V , le domaine sur lequel elle est définie ; 3) T_V , une collection finie de sous-ensembles flous appelés « termes » qui qualifient V et qui sont nommés.

La figure 2 représente une variable linguistique appelée « Acuité visuelle » définie sur le domaine $[0;4]$ (similairement aux propositions de MyUI (Peissner et al., 2012)), composée de quatre termes (« Normal », « Faible », « Très faible » et « Minimal ») et leurs fonctions d'appartenance associées.

Figure 2. Exemple de variable linguistique : Acuité visuelle



4.3 Utilisation de règles floues pour modéliser les connaissances

Les définitions précédentes sont utilisées pour définir les connaissances d'experts humains dans un ensemble de règles. Ces règles sont basées sur une combinaison de propositions floues élémentaires. Une proposition floue élémentaire est la définition de « V est A » à partir d'une variable linguistique (V, X_V, T_V) où A est un terme de T_V . Ainsi, si l'on reprend la variable linguistique « Acuité visuelle » de la figure 2, une proposition floue pourrait être « Acuité visuelle est faible ». Cette proposition est évaluée à partir de la fonction d'appartenance du terme impliqué pour une acuité visuelle donnée. Cette valeur est floue et donc comprise entre $[0, 1]$ contrairement à la logique classique dans laquelle l'évaluation d'une proposition est soit vraie (1) soit fausse (0).

Une expression floue est une composition de propositions floues élémentaires ou d'autres expressions à l'aide d'opérateurs logiques : négation (non), conjonction (et), disjonction (ou), le ou exclusif n'étant pas géré.

Les propositions floues sont des cas particuliers d'expressions floues. Par exemple, soit deux propositions floues « V est A » utilisant (V, X_V, T_V) et « W est B » utilisant (W, X_W, T_W) . Alors, « V est A et W est B », « V est A ou non W est B » sont des expressions floues. La valeur de vérité des expressions floues est obtenue en appliquant les opérateurs sur les valeurs de vérité de leurs opérandes.

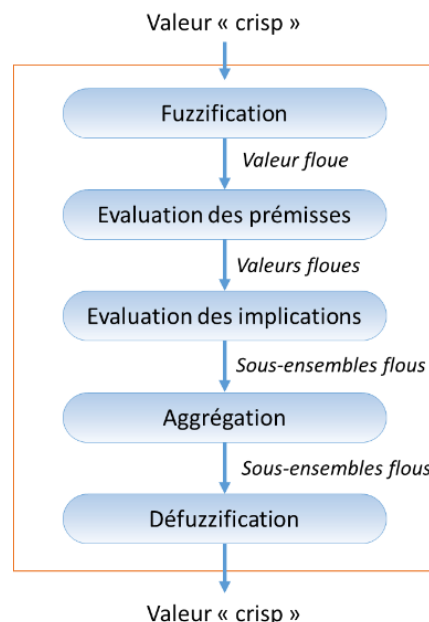
Ces expressions sont donc utilisées pour exprimer les connaissances des experts humains dans les règles floues. Une règle floue est composée d'une prémisse (ou antécédent) et d'une conclusion (ou conséquence) et est de la forme « SI prémisse ALORS conclusion ». Une prémisse est une expression floue alors qu'une conclusion est une déclaration floue de nature différente. Une conclusion peut être une proposition floue. Dans ce cas, la règle est de la forme : « SI Acuité visuelle est faible ALORS la taille de police est élevée. » Une conclusion peut être une fonction mathématique des entrées de la prémisse. Ces règles sont dites de la forme Takagi-Sugeno et sont de la forme « SI acuité visuelle est faible ALORS taille_de_police=f(acuité visuelle) ».

Ainsi, les règles associent les entrées du système aux sorties à l'aide d'une implication floue (dénotée par ALORS).

4.4 Inférence floue

Le formalisme utilisé pour représenter les connaissances ayant été présenté, nous pouvons nous intéresser au processus d'inférence, c'est-à-dire au calcul des sorties. En effet, dans la section précédente nous avons vu comment une règle fonctionnait ; nous allons à présent voir comment les règles fonctionnent ensemble. Il existe deux types d'inférence en logique floue en fonction du type de règle utilisé : l'inférence de Mamdani et l'inférence de Takagi-Sugeno. Dans les deux cas, les règles sont évaluées individuellement puis agrégées en utilisant leur activation pour pondérer leurs sorties respectives et obtenir ainsi la valeur de sortie finale. De par la nature de leurs conclusions, les systèmes de Mamdani sont plus interprétables et l'écriture des règles est plus intuitive, contrairement aux systèmes de Sugeno qui sont plus appropriés à l'apprentissage automatique. Nos règles provenant d'une expertise, nous avons naturellement choisi un système de Mamdani (Bouchon-Meunier, 2007) dont le processus d'inférence est décrit ci-après et résumé dans la figure 3.

Figure 3. Vue d'ensemble de l'inférence de Mamdani



La première étape consiste à évaluer chacune des propositions floues élémentaires présentes dans les prémisses des règles : cette étape est appelée fuzzification. Elle prend les valeurs « crisp » des entrées et associe une valeur floue en fonction des fonctions d'appartenance des termes. Par exemple, en utilisant la variable linguistique « Acuité visuelle » de la figure 2 et le terme « normal », pour une acuité visuelle de 0, « acuité visuelle est normale » est évaluée à 1. Pour une acuité visuelle de 1, « acuité visuelle est normale » et « acuité visuelle est faible » sont chacun évalués à 0.5.

Les prémisses sont ensuite calculées. La valeur des prémisses devient alors la valeur d'activation de la règle. Par exemple, si on prend les opérateurs de Zadeh, pour une acuité visuelle de 0, la valeur de la prémisse « acuité visuelle est normale ou acuité visuelle est faible » est $\max(1,0)=1$.

La fonction d'implication est ensuite appliquée à la conclusion des règles. Le résultat est un sous-ensemble flou qui peut être interprété comme une distribution des valeurs pour les sorties. La figure 4 montre le sous-ensemble flou résultant de l'application d'une implication minimum lorsque la règle est activée à 0,75.

Les sous-ensembles flous des différentes règles concernant la même sortie sont ensuite agrégés par une méthode particulière, comme par exemple la fonction maximum (figure 5).

Enfin, le sous-ensemble flou de chaque sortie est transformé en valeur « crisp » : cette étape est appelée défuzzification. Il existe différentes fonctions de défuzzification. La plus connue consiste à calculer le barycentre de l'aire sous la courbe (figure 5).

Figure 4. Résultat de l'implication

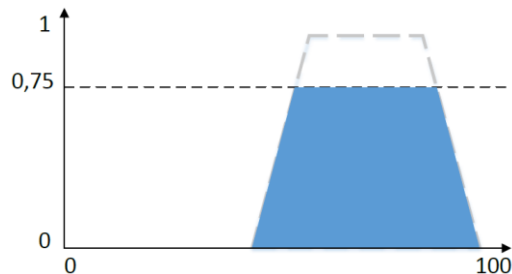
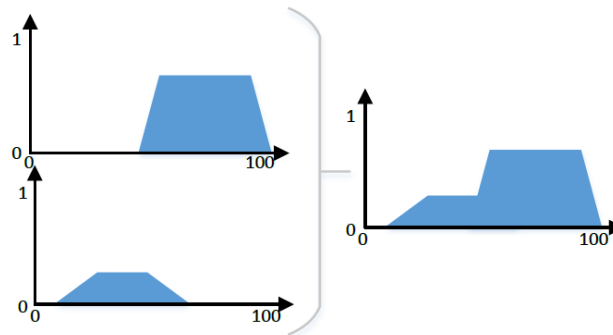


Figure 5. Application de l'agrégation maximum à deux sous-ensembles flous



Pour nos travaux, nous avons choisi de remplacer l'étape d'agrégation et de défuzzification par une étape unique qui consiste à calculer le barycentre de chacune des sorties individuellement et de les pondérer entre eux en fonction de l'aire obtenue par l'implication floue. Ce changement a été effectué car il a pu être adapté aux domaines discrets ordonnés : la valeur la plus proche de la somme pondérée des barycentres est alors utilisée comme valeur finale. Cela permet d'assurer une transition progressive entre les différentes valeurs d'une sortie, même dans le cas de domaines discrets ordonnés.

5 LE SYSTEME FUZZY4U

Dans cette section, nous montrons les apports de la logique floue au sein d'un système d'adaptation des IHM, en particulier pour l'accessibilité. Nous commençons par présenter l'architecture logicielle de Fuzzy4u avant de discuter de l'intégration de la logique floue dans son moteur d'adaptation.

5.1 Architecture logicielle

L'architecture de Fuzzy4U comprend 3 composants principaux : un moteur d'inférence, un moteur d'adaptation et le système interactif à adapter (voir figure 6).

Le moteur d'inférence a la charge de déduire dynamiquement la valeur du contexte d'usage à partir des données captées, par exemple, le nombre de clics « valides » effectués sur des interacteurs tels que liens, boutons, listes, et le nombre de clics « invalides » (à côté de tout interacteur) afin de déterminer si l'utilisateur a une bonne précision de la main.

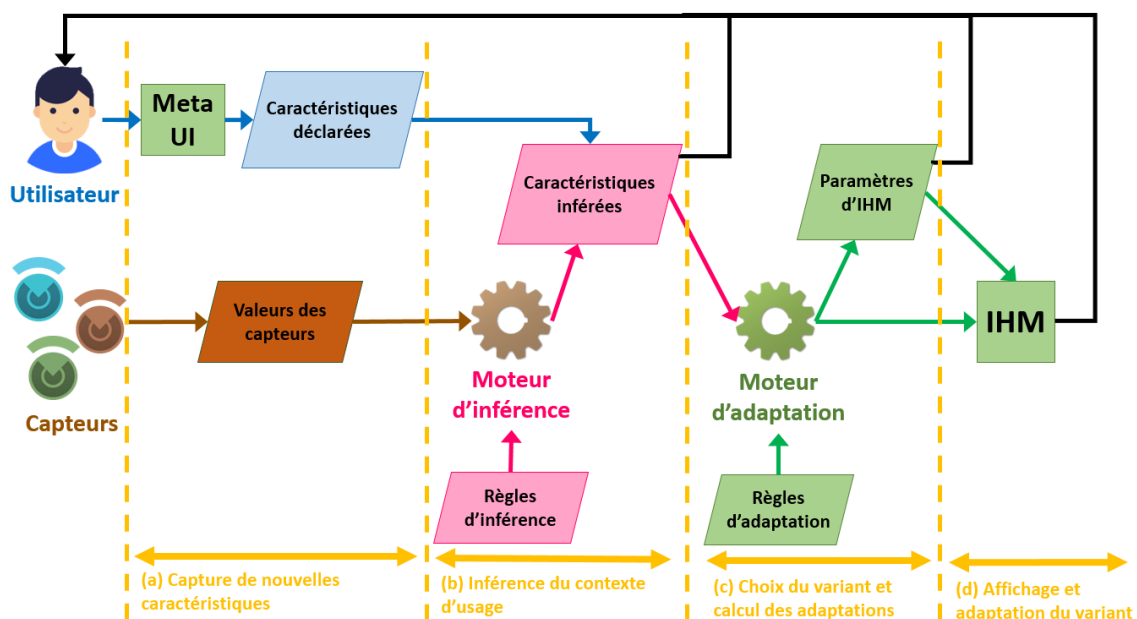
D'autres données peuvent être déclarées par l'utilisateur au moyen d'une méta-UI (Coutaz, 2006). Dans notre cas, cette méta-IHM regroupe un ensemble de caractéristiques que l'utilisateur peut manipuler pour contrôler l'adaptation, telles que ses caractéristiques

(dyslexie, daltonisme, acuité visuelle, etc.) ou encore directement des caractéristiques de l'IHM (taille de police, espacement des mots, etc.). Notre méta-IHM se limite ici aux caractéristiques de l'utilisateur. Elle ne permet pas de visualiser ou de modifier les règles d'adaptation.

Les données inférées et déclarées sont envoyées au moteur d'adaptation. En cas de données inférées et déclarées portant sur la même caractéristique, ce seront les données fixées par l'utilisateur (donc déclarées) qui seront prises en compte.

Le moteur d'adaptation se sert ensuite des données ainsi que d'une base de règles d'adaptation pour sélectionner une version adéquate de l'IHM, appelée variant (Céret et al., 2016), sur laquelle des paramètres de présentation (couleurs, police de caractères...) seront appliqués. Par exemple, si la précision de la main de l'utilisateur est faible, le moteur d'adaptation peut augmenter l'espace pris en compte pour le clic sur les interacteurs afin d'améliorer l'utilisabilité de l'interface pour cet utilisateur spécifique.

Figure 6. Architecture logicielle de Fuzzy4U pour l'adaptation d'IHM



Nous illustrons le fonctionnement de Fuzzy4U sur l'exemple fil rouge. Les capteurs de luminosité ambiante perçue par la plate-forme (par exemple 50.000 lux) ainsi que le nombre de bons et de mauvais clics (par exemple, 130 clics sur un interacteur et 212 dans une zone vide) servent d'entrées initiales. Le moteur d'inférence, selon sa base de règles, transforme les « 50.000 lux » en « luminosité : plein soleil », ainsi que les clics en « précision de la main : très faible ».

Cependant, l'utilisateur, Bernard, a pu utiliser la méta-IHM pour déclarer certaines caractéristiques, telles que la précision des mains qu'il a déclarée comme étant « bonne ». Etant donné qu'une caractéristique a été à la fois inférée et déclarée, la valeur déclarée prend la priorité, et la précision des mains connue par le système pour Bernard restera donc « bonne ».

Ces deux caractéristiques (bonne précision de la main et luminosité plein soleil) sont ensuite transmises au moteur d'adaptation qui détermine si des adaptations sont nécessaires. En l'occurrence, une bonne précision des mains n'implique pas de modification de l'IHM, mais l'éclairage ambiant entraîne une augmentation du contraste et de la luminosité afin de conserver une lisibilité suffisante de l'écran.

Le moteur d'inférence est distinct du moteur d'adaptation dans un but de séparation des préoccupations : le premier est chargé de transformer des valeurs brutes (comme un certain

nombre de clics valides et invalides) en valeurs utilisables par le second (comme une précision de la main « très faible »).

5.2 Les apports de la logique floue

5.2.1 Incertitude

Toutes les caractéristiques ont un degré d'incertitude, qu'elles soient inférées par le moteur (ex : imprécision du calcul de la précision des mains grâce à un ratio entre clics valides et clics invalides) ou déclarées par l'utilisateur (ex : deux utilisateurs ayant une acuité visuelle identique pourraient chacun la définir différemment).

La logique floue permet, grâce aux fonctions d'appartenance (voir la définition en section 3) de prendre en compte une incertitude. Par exemple, la figure 2 montre la définition de la variable linguistique (voir la définition en section 3) acuité visuelle : la valeur est définie en abscisses (ici de 0 à 4), et la certitude des 4 différents états (normal, low, veryLow et extraLow) est spécifiée en ordonnées. L'état « normal » est ainsi certain lorsque que l'acuité visuelle varie de 0 à 0.5. À partir de 0.5 et jusqu'à 1.5, la certitude de l'état « normal » décroît au profit de l'état « low » qui gagne en certitude. À 1.5, l'état « low » a donc 100% de certitude alors que l'état « normal » est à 0%. Le croisement des courbes (aux abscisses 1, 2 et 3) indique donc une probabilité de 50% pour les deux états.

5.2.2 Complexité des règles

Outre la prise en compte de l'incertitude, des difficultés sont liées à l'expression des règles d'adaptation. En particulier, les règles qui disposent de nombreux seuils peuvent devenir assez lourdes en logique booléenne.

Reprenons l'exemple de la règle sur le niveau d'acuité visuelle présenté en section 4.2. Nous l'avons vu, plusieurs seuils sont nécessaires (ici, 1, 2, 3 et 4) et la granularité finale de la variable de sortie est relativement faible (ici, 4 valeurs possibles : 12, 14, 16, 18). Cette granularité peut être améliorée, mais au détriment du nombre de seuils.

En logique floue, l'implémentation de cette règle comprend la définition des variables linguistiques d'entrée et de sortie (figure 7), et la création des règles en logique floue (figure 8).

Figure 7. Définition des variables linguistiques d'acuité visuelle et de taille de caractères

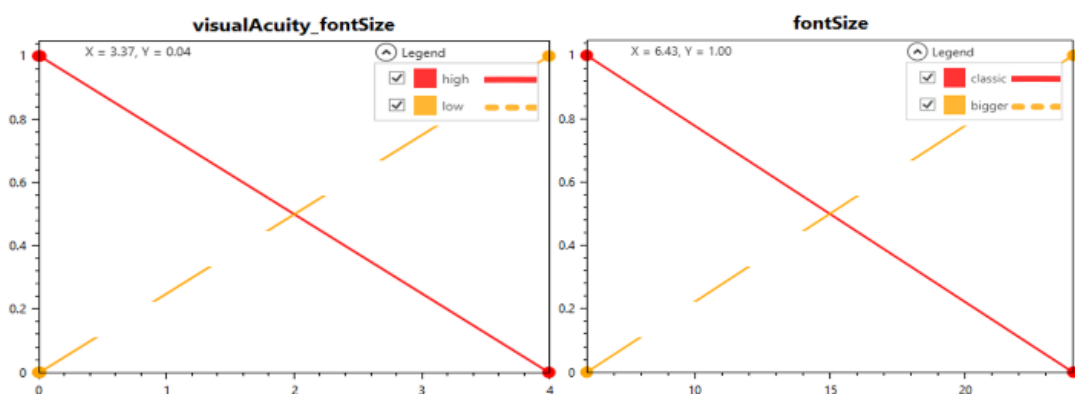


Figure 8. Définition de règles floues pour le calcul de la taille de police en fonction de l'acuité visuelle

- If visualAcuity_fontSize is high then fontSize is classic
- If visualAcuity_fontSize is low then fontSize is bigger

Compte tenu des définitions des domaines de variables, la règle en logique floue est simple et ne comporte que deux cas.

En utilisant la méthode de défuzzification des barycentres pondérés (ou centre de gravité), la valeur de sortie `fontSize` est comprise entre 12 et 18 points. Son principe est de calculer le barycentre du sous-ensemble flou de sortie pour chacune des règles, et d'en faire une somme pondérée par l'aire sous la courbe. En considérant toutes les règles ayant une même sortie, la valeur défuzzifiée peut s'écrire :

$$d(\text{sortie}) = \frac{\sum_i C_i \times A_i}{\sum_i A_i}$$

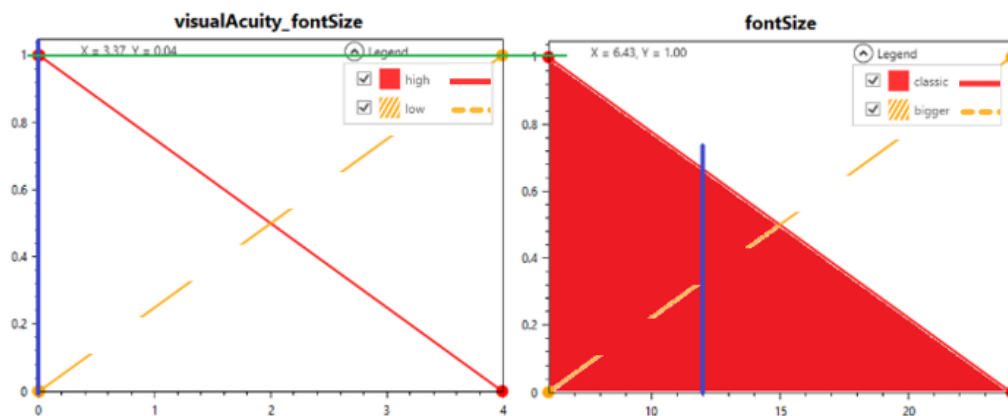
où C_i est la valeur du barycentre et A_i l'aire sous la courbe pour la $i^{\text{ème}}$ règle concernant cette sortie.

Cette défuzzification est utilisable sur des variables linguistiques continues. Nous l'avons adaptée aux variables discrètes car, dans notre cas, les domaines discrets sont ordonnés, ce qui nous permet de donner du sens au barycentre. Dans ce cas, l'aire sous la courbe est simplement remplacée par la valeur correspondante dans l'histogramme qui sert de fonction d'appartenance.

Afin de comprendre le principe de cette méthode, deux exemples sont donnés dans les figures 9 et 10.

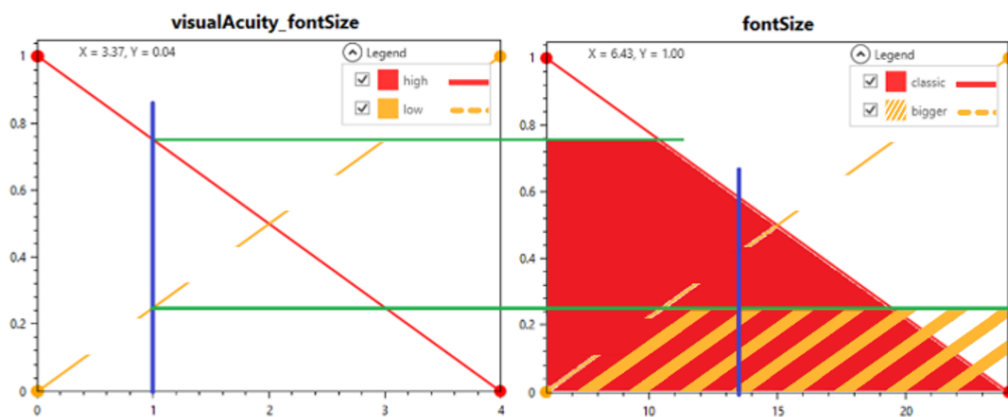
Sur la figure 9, on voit que pour une acuité visuelle à 0 en entrée, le terme « high » est activé à 100% et le terme « low » à 0%. Selon la première règle, l'activation du terme de sortie « classic » se fait lui aussi à 100%, représenté par l'aire rouge. Le barycentre de ce triangle rectangle est situé au premier tiers de sa base, soit une valeur de 12 pour la variable de sortie `fontSize` ayant un domaine entre 6 et 24.

Figure 9. Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 0



Pour une acuité visuelle à 1 en entrée (figure 10), le terme « high » est cette fois activé à 75% et le terme « low » à 25%. Cela est représenté par les deux lignes vertes et l'activation du terme de sortie « classic » à 75%, représenté par l'aire rouge et l'activation du terme de sortie « bigger » à 25%, représenté par l'aire orange. Les barycentres de ces deux quadrilatères sont ensuite calculés (12.3 pour le barycentre lié à « classic » et 10.071 pour celui lié à « bigger »), puis pondérés en fonction de leurs aires (respectivement 84.375 et 39.375), afin d'obtenir le résultat final de 13.5 points pour la variable `fontSize`. Nous avons ainsi l'état « bigger » qui a pris un peu plus de poids comparé à l'état « classic », donnant une taille de police de 13.5 au lieu de la valeur 12 du cas précédent. Ces résultats sont donc continus et suivent une fonction « `fontSize = 12 + visualAcuity * 1.5` ».

Figure 10. Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 1



Cet exemple montre comment la logique floue a les capacités d'éviter les effets de seuil. Elle permet dans certains cas de simplifier l'expression des règles d'adaptation tout en permettant d'obtenir des valeurs de sortie plus précises.

5.2.3 Combinaison de règles

Le dernier verrou à aborder est la combinatoire des règles qui peut survenir lorsque plusieurs variables d'entrées peuvent influencer sur une même variable de sortie (Blouin et al., 2011). Par exemple, il peut être nécessaire d'augmenter l'espace cliquable autour des interacteurs, soit quand l'acuité visuelle est faible, soit quand la précision des clics (et donc des mains) est faible. Un problème se pose quand l'une des deux variables d'entrée est forte alors que l'autre est faible.

La logique floue a l'avantage de pouvoir gérer cela de manière intrinsèque, notamment par le biais de la gestion de l'incertitude : sans avoir un poids différent, une certitude plus importante a plus d'impact. Il reste toutefois possible de spécifier des poids au besoin.

Considérons l'exemple de la taille de la zone de clic des interacteurs, nommée ici `clickCorrection`. Elle se base sur l'acuité visuelle (figure 2) et la précision des mains (dont la forme du graphique est identique à celui de la figure 2) afin de définir un niveau plus ou moins important de correction de la taille ; la variable linguistique de sortie, `clickCorrection`, étant composée de 4 valeurs discrètes représentant 4 degrés de correction allant de `noCorrection` à `highCorrection` (figure 11).

Figure 11. Règles floues définies pour le calcul du `clickCorrection` en fonction de la précision des mains et de l'acuité visuelle

- If handPrecision is normal then clickCorrection is noCorrection
- If handPrecision is low then clickCorrection is lowCorrection
- If handPrecision is veryLow then clickCorrection is mediumCorrection
- If handPrecision is extraLow then clickCorrection is highCorrection
- If visualAcuity is normal then clickCorrection is noCorrection
- If visualAcuity is low then clickCorrection is lowCorrection
- If visualAcuity is veryLow then clickCorrection is mediumCorrection
- If visualAcuity is extraLow then clickCorrection is highCorrection

Les 4 premières règles se basent sur l'état de la variable `handPrecision` – normal, low, veryLow, extraLow – et fournissent une valeur de sortie pour `clickCorrection` – allant

respectivement de noCorrection à highCorrection. Les 4 dernières règles sont identiques à l'exception de la variable d'entrée qui est cette fois visualAcuity. On peut noter qu'il n'est pas nécessaire dans l'expression de ces règles de se soucier de leur éventuelle contradiction ou de leur combinaison. En logique floue, la valeur de sortie est déterminée par la défuzzification.

Dans l'exemple de la correction de la taille des interacteurs pour obtenir une transition lissée d'une valeur à l'autre des paramètres de sortie, nous avons opté pour la défuzzification dite des barycentres pondérés (cf. sous-section 4.2.2). Ainsi, avec une acuité visuelle à 0 et une précision des mains à 4 en entrée, le résultat est « lowCorrection ». Alors qu'une acuité visuelle à 1 et une précision des mains à 4 en entrée donneront une sortie « mediumCorrection ».

Cet exemple montre comment la logique floue permet de gérer la combinaison des règles d'adaptation par la défuzzification, sans avoir à mettre en place un algorithme spécifique de priorisation.

Maintenant que nous avons décrit des avantages de la logique floue, la prochaine partie détaillera comment des recommandations d'accessibilité peuvent être traduites en règles floues.

6 REGLES POUR L'ACCESSIBILITE

Le premier point à noter est que certaines préconisations pour l'accessibilité sont destinées à être exploitées lors de la création de l'IHM par un concepteur ou un développeur humain et sont difficiles, en l'état actuel, à implémenter sous forme d'adaptation d'IHM. Par exemple, la règle 1.2.1 du WCAG précise que tout contenu purement vidéo doit être accompagné *a minima* soit d'une auto-description, soit d'une version alternative (textuelle ou audio). La mise à disposition d'une telle alternative ne relève pas du système d'adaptation. On pourrait dès lors supposer que la règle 1.2.1 n'est pas utile pour notre objectif. Cependant, si l'on va plus loin, on peut réinterpréter la règle en termes d'adaptation : lorsque l'utilisateur est malvoyant et que l'interface propose un support purement visuel, il convient d'offrir par défaut une version alternative, comme l'affichage en braille de l'auto-description si l'utilisateur dispose de cette possibilité, ou l'utilisation d'une version audio. Lorsque l'utilisateur est sourd, il convient d'afficher les sous-titres sans que l'utilisateur ait à les demander.

Nous présentons ci-dessous la traduction en règles des trois catégories de recommandations citées (WCAG, EAPM et WAI-AGE). Les règles sont dans un premier temps exprimées suivant la syntaxe la plus communément utilisée, « If ... then... else... », avant de montrer comment elles sont exploitées dans notre proposition. Notre objectif ici est d'obtenir des règles aussi simples que possible, quitte à en formuler plusieurs, éventuellement contradictoires. L'intérêt principal de cette approche est d'obtenir des règles facilement compréhensibles et facilement réalisables.

De plus, nos règles sont structurées pour prendre en compte la situation de l'utilisateur à chaque instant, et ainsi adapter les IHM aux difficultés, qu'elles soient persistantes ou situationnelles (Wobbrock, 2019). Pour cela, elles s'appuient sur des caractéristiques dynamiques et évolutives du contexte d'usage. Ces caractéristiques peuvent être, soit déclarées par l'utilisateur, soit, lorsque c'est possible, inférées par le système. Par exemple, on peut inférer la tranche d'âge d'une personne par l'analyse d'une photographie prise avec la caméra de son dispositif, mais ses préférences en termes de couleurs ou de volumétrie de texte doivent être déclarées. D'autre part, les caractéristiques peuvent être, soit énumérées (la tranche d'âge peut être 'kid', 'teenager', 'grown-up', ou 'senior'), soit être plus ou moins vraies (la dyslexie pouvant être plus ou moins prononcée, on considère que l'attribut 'dyslexic' est plus ou moins vrai). Les règles sont destinées à donner des indications sur les caractéristiques de l'IHM, par exemple, avoir comme résultat 'language=FR' (la langue

utilisée dans l'interface est le français) ou 'backgroundLuminosity is darker' (l'arrière-plan doit être assombri).

Dans les sections suivantes, nous montrons comment nous avons transcrit quelques règles d'accessibilité en règles d'adaptation. Nous avons choisi des règles simples qui peuvent s'appliquer régulièrement et qui illustrent les adaptations à des problématiques persistantes (acuité visuelles) ou situationnelles (luminosité ambiante).

6.1.1 Taille de police

Nous n'avons trouvé aucune recommandation du W3C concernant la taille de police à appliquer par défaut. La taille par défaut utilisée semble être celle des navigateurs, généralement définie à 16px, d'après le site W3C Online Web Tutorials (W3School).

Le WCAG recommande de donner la possibilité d'agrandir le texte jusqu'à 200% de sa taille d'origine (recommandation n° 1.4.4), et les EAPM du W3C indiquent, quant à elles, que certaines personnes ont besoin d'une taille de police plus grande pour distinguer les lettres (n° 3.3.1). Toutefois, ils précisent aussi que d'autres personnes, ayant par exemple une bonne acuité visuelle, mais un problème de vision tunnelisée (altération de la vision périphérique), peuvent préférer de plus petites lettres pour visualiser davantage de mots. Il n'est toutefois pas précisé à quelle taille de police correspond « plus petites lettres ». Nous avons donc choisi de traduire cela par la possibilité de réduire un texte jusqu'à 50% de sa taille d'origine. La taille de texte doit donc pouvoir être agrandie jusqu'à 200% de sa taille originale et réduite jusqu'à 50%, ce qui, en se basant sur la taille par défaut de 16px, se traduit par une fourchette allant d'un minimum de 8px à un maximum de 32px.

D'autres catégories de personnes peuvent bénéficier d'une adaptation de la taille de police. Ainsi, pour les personnes âgées, le projet WAI-AGE recommande l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt, soit 16-19px¹. (De Lara et al., 2010) indiquent dans le critère de réussite 2.4.14 que les liens adjacents doivent fournir suffisamment d'espace de clic pour éviter les erreurs –les utilisateurs âgés ont des difficultés à cliquer dans de petites zones de liens. (Dellaporta, 2007) recommande un texte de grande taille pour les liens hypertextes, une zone de prise en compte du clic suffisamment importante, et un espacement adéquat entre interacteurs afin d'éviter toute activation accidentelle.

Concernant les utilisateurs dyslexiques, (McCarthy et Swierenga, 2009) indiquent que l'un de principaux problèmes rencontrés est de trouver le texte trop petit. (De Santana et al., 2012) indiquent que la plus petite taille de texte recommandée se situe entre 12 et 14px, et (Rello et al., 2013) recommandent une taille de 18pt, ce qui se traduit par 24px.

À partir de ces données, nous pouvons établir les règles élémentaires suivantes, avec les caractéristiques suivantes : visualAcuity décrit l'acuité visuelle de l'utilisateur, age son âge, dyslexic son niveau de dyslexie (plus ou moins vrai), tunnelVision sa perte de vision périphérique, fontSize la taille de police de caractères du texte, linkSize la taille des hyperliens.

- | | |
|------------------------------|-------------------------|
| (R1) if visualAcuity is low | then fontSize is bigger |
| (R2) if age is senior | then fontSize is bigger |
| (R3) if dyslexia is high | then fontSize is bigger |
| (R4) if tunnelVision is high | then fontSize is lower |
| (R5) if age is senior | then linkSize is bigger |

¹ Pour mémoire, le point est une ancienne unité d'imprimerie qui correspond à une taille en centimètres, et qui n'a donc pas de correspondance directe en informatique, mais qui est considéré comme valant 1,333 pixel.

Les termes “bigger” et “lower” sont ici utilisés en prenant pour base la valeur de police de caractères par défaut du site. La première règle pouvant se traduire par « plus l'acuité visuelle est faible, plus il faut augmenter la taille de la police ». Ainsi, une taille de police par défaut définie à 16px sera agrandie ou diminuée en fonction des différentes caractéristiques. Par exemple à 20 px, si l'utilisateur est une personne âgée, ou à 22px si l'utilisateur est une personne âgée et qu'il a une acuité visuelle légèrement plus amoindrie.

6.1.2 Niveau de contraste et gestion de couleurs

La problématique des couleurs utilisées sur une IHM est complexe. En effet, comme l'ont dit Sarah Horton et Whitney Quesenbery, « sans contraste, le monde entier serait gris. Les concepteurs doivent respecter les besoins en contraste de couleur pour les personnes avec une vision ou une perception de couleurs dégradées. Les combinaisons de couleurs qui sont facilement distinguables pour quelqu'un avec une vision normale peuvent ne pas fonctionner pour des personnes souffrant de l'un des nombreux handicaps visuels existants. La perception des couleurs peut aussi être réduite par des facteurs environnementaux, comme les paramètres d'affichage ou les conditions lumineuses » (Horton et Quesenbery, 2014). Cet extrait illustre bien l'impératif de prendre en compte non seulement les différentes caractéristiques de l'utilisateur mais aussi d'autres paramètres comme sa plate-forme et son environnement pour arriver à un compromis acceptable. Dans ce contexte, la luminosité du dispositif est un élément important pouvant influencer sur le contraste. Cependant, le réglage de cette luminosité depuis une application ou un site Internet n'est le plus souvent pas réalisable, voire jamais dans le cas des sites Internet. Il n'est pas non plus évident que ce réglage automatique suffise à maintenir l'utilisabilité de l'IHM : nous avons tous l'expérience d'une IHM illisible en plein soleil malgré les tentatives de compensation de notre téléphone. L'IHM elle-même doit renforcer l'adaptation en modifiant la palette des couleurs utilisées.

Le WCAG recommande un contraste entre l'arrière-plan et le texte selon un ratio d'au moins 4.5:1 afin de respecter le niveau intermédiaire d'accessibilité (level AA - recommandation 1.4.3), et un ratio d'au moins 7:1 pour le niveau élevé (level AAA - recommandation 1.4.6).

La recommandation 2.4.2 des EAPM précise qu'un fond d'écran clair ne sera pas lisible, voire douloureux, pour des personnes atteintes d'une sensibilité accrue à la lumière, ou photophobie. Ces utilisateurs nécessiteront donc un fond d'écran plus sombre. De plus, la recommandation 3.1.2 du W3C traite du contraste entre le fond d'écran et le texte et précise que : 1) pour ces personnes photophobes, le texte a aussi besoin d'avoir une faible luminosité, et 2) d'autres personnes, incluant notamment les personnes âgées (qui subissent classiquement une perte de sensibilité à la lumière), nécessiteront un contraste élevé entre le fond d'écran et le texte, et que certains lisent notamment mieux avec un texte clair sur un fond sombre.

(De Santana et al., 2012) recommandent d'éviter les fonds d'écran d'un blanc pur pour les utilisateurs atteints de dyslexie car une part significative d'entre eux est trop sensible à sa luminosité (sensibilité scotopique) et verra le texte comme s'il vibrait ou s'il était flou. Il est recommandé de privilégier des couleurs pastel, par exemple d'un texte bleu foncé sur un fond beige. En cas de dyslexie, il conviendra d'utiliser plutôt des fonds et des textes de couleurs pastel tout en maintenant un bon niveau de contraste.

Une autre catégorie de personnes pouvant avoir des problèmes de contraste sont les daltoniens qui représentent environ 8% de la population masculine et 2% de la population féminine (Laccarino et al., 2006). Le daltonisme se traduit par un « écrasement » des couleurs perçues qui induit un problème de contraste lorsque les couleurs perçues ont des luminosités trop proches les unes des autres. Il conviendra d'éliminer les couleurs non perceptibles en fonction du type de daltonisme et de les remplacer par des couleurs de même luminosité que les couleurs initiales pour maintenir le contraste (Mochizuki et al., 2008).

Enfin, en cas d'environnement sombre, (Rempel et al., 2011) recommandent d'utiliser une polarité négative (c'est-à-dire un texte clair sur un fond sombre) afin d'améliorer la lisibilité. Nous traduirons cette préconisation par la mise en place d'un arrière-plan de plus en plus sombre en fonction de la luminosité ambiante.

Nous pouvons déduire plusieurs règles de ces considérations, pour faire varier le niveau de contraste et/ou de luminosité, non pas en cherchant à calculer directement une couleur qui pourrait se trouver en contradiction avec la charte graphique de l'application, mais en évaluant dans quelles directions doit se faire l'adaptation puis en calculant les couleurs résultantes à partir de la charte graphique :

(R6) If photophobia is high	then backgroundLuminosity is darker
(R7) If age is senior	then backgroundLuminosity is lighter
(R8) If dyslexia is high	then backgroundLuminosity is darker
(R9) If ambientLight is sunlight	then backgroundLuminosity is lighter
(R10a) If ambientLight is low	then backgroundLuminosity is darker
(R10b) If ambientLight is veryLow	then backgroundLuminosity is darker
(R10c) If ambientLight is extraLow	then backgroundLuminosity is darker
(R11) If dyslexia is high	then backgroundSaturation is pastel
(R12) If ambientLight is sunlight	then contrastLevel is higher
(R13) If photophobia is high	then contrastLevel is lower
(R14) If Deuteranopia is high	then greenAvoidanceLevel is higher
(R15) If Protanopia is high	then redAvoidanceLevel is higher
(R16) If Tritanopia is high	then blueAvoidanceLevel is higher

De même que pour les termes « bigger » et « lower » utilisés pour la taille de la police dans la sous-section précédente, les termes “darker”, “lighter”, « higher » et « lower » sont, là aussi, à corrélérer avec les valeurs par défaut utilisées sur le site pour les différentes caractéristiques de sortie.

Concernant la gestion des couleurs et le niveau de contraste, nous avons choisi de traduire les recommandations par l'utilisation de 3 variables : luminosité de l'arrière-plan (backgroundLuminosity), niveau de saturation de l'arrière-plan (backgroundSaturation) et niveau de contraste (contrastLevel). La luminosité et la saturation correspondent à deux des trois composantes du système de gestion des couleurs TSL (Teinte Saturation Luminosité). La troisième composante, la teinte, ne sera pas modifiée puisqu'elle correspond à la charte graphique du site web. Après avoir défini une nouvelle couleur d'arrière-plan en fonction de la luminosité et de la saturation, la variable de niveau de contraste est ensuite utilisée pour calculer une couleur de police de contraste suffisant avec la nouvelle couleur d'arrière-plan.

Enfin, les recommandations en termes de polarité ont été traduites ici par plusieurs règles pouvant se renforcer : à mesure que la luminosité baisse, la luminosité de l'arrière-plan est assombrie progressivement.

6.1.3 Espacements entre lettres, mots, lignes et paragraphes

Concernant l'espacement entre les lettres, mots, lignes et paragraphes, la recommandation 1.4.8 du WCAG suggère de fournir à l'utilisateur le choix entre plusieurs espacements de lignes et de paragraphes avec, notamment, un choix d'espacement de ligne d'au moins 1.5 pour les blocs de texte, et un espacement de paragraphe d'au moins 1.5 fois l'espacement de lignes. La recommandation 1.4.12 du WCAG indique, quant à elle, que l'espacement entre les lettres doit être au moins 0.12 fois la taille de la police, l'espacement entre les mots, au moins 0.16 fois la taille de la police, l'espacement entre les lignes, au moins 1.5 fois la taille de la police, et l'espacement entre les paragraphes, au moins 2 fois la taille de la police.

Les EAPM indiquent que, pour pouvoir lire un texte, certaines personnes nécessitent plus d'espacement entre les lettres (recommandation 3.4.2), entre les mots (recommandation 3.4.3) et entre les lignes d'un bloc de texte (3.4.1) ;

(Dellaporta, 2007) recommande d'utiliser un espacement doublé entre les mots pour les personnes âgées. (Rello et al., 2012) recommandent, pour les personnes dyslexiques, un espacement de lettres augmenté de 7%, un espacement de lignes 1.4 fois plus grand que l'espacement standard, et un espacement de paragraphe correspondant à 1 ligne de texte vide, soit 2 fois l'espacement de lignes.

De l'ensemble de ces recommandations, nous déduisons les règles suivantes où `wordSpacing`, `lineSpacing` et `paragraphSpacing` représentent l'espacement à utiliser entre, respectivement, les mots, les lignes et les paragraphes :

(R17) If `visualAcuity` is low then `letterSpacing` is bigger

(R18) If `dyslexia` then `letterSpacing` is bigger

(R19) If `visualAcuity` is low then `wordSpacing` is bigger

(R20) If `age` is senior then `wordSpacing` is bigger

(R21) If `dyslexia` is high then `wordSpacing` is bigger

(R22) If `visualAcuity` is low then `lineSpacing` is bigger

(R23) If `age` is senior then `lineSpacing` is bigger

(R24) If `dyslexia` is high then `lineSpacing` is bigger

(R25) If `age` is senior then `paragraphSpacing` is bigger

(R26) If `dyslexia` is high then `paragraphSpacing` is bigger

7 CAS D'ETUDE

Maintenant que nous avons décrit notre architecture et détaillé le fonctionnement de la logique floue ainsi que les règles d'accessibilité que nous souhaitons utiliser, nous pouvons présenter comment notre architecture logicielle se concrétise sous forme d'un prototype.

7.1 Le prototype

L'architecture logicielle présentée en 5.1 a été mise en œuvre au moyen de technologies web et repose sur NodeJS, permettant d'exécuter du JavaScript aussi bien du côté serveur que du côté client. Les objets utilisés tels que les différents modèles de contexte ou la base de règles d'inférences, sont stockés dans des fichiers JSON.

Concernant le moteur en logique floue, nous utilisons ExpressIF, un outil développé par CEA Tech appelé par un Web Service par une requête http.

Le moteur d'adaptation actuel s'appuie sur 81 règles en logique floue : 67 règles portant sur l'utilisateur, 6 règles pour la plate-forme et 8 règles pour l'environnement. Il n'est pas spécifique à l'exemple de Bernard. Pour le cas de Bernard, les règles R6 à R13 n'ont pas été implémentées dans le prototype.

Notre prototype est un site web de réservation d'hôtel. Il comprend 8 pages : (1) une page d'accueil de présentation de l'hôtel (Fig. 12) ; (2) une page détaillant les différentes chambres et suites proposées par l'hôtel (descriptions succinctes et détaillées) ; (3) une page pour le service de restauration et du bar ; (4) une page de présentation du service de petit-déjeuner ; (5) une page pour divers services (wifi, télévision, voiturier, ...) ; (6) une page de localisation, donnant l'adresse de l'hôtel, et les meilleurs moyens d'accès ; (7) une page de réservation avec le formulaire de réservation et (8) une page de confirmation de réservation.

Fig. 12. Page d'accueil de l'hôtel (non adaptée – variant PC)

ACCUEIL CHAMBRES & SUITES RESTAURANT & BAR PETIT DÉJEUNER SERVICES LOCALISATION

Bienvenue à L'Hôtel [Voir les chambres](#)

BIENVENUE À L'HÔTEL LE ROYAL LYON

Le Royal Lyon est une grande Maison de Famille de 72 chambres sur 5 étages dont 10 suites offrant la vue sur la Place Bellecour et sur Saône et Rhône.

C'est un lieu où souffle l'esprit lyonnais, science de l'accueil mariant tradition et créativité, une adresse confidentielle pour voyageurs soucieux d'art de vivre, de discrète élégance et de service naturellement généreux.

Ce lieu offre un condensé de ce que Lyon, ses artisans et producteurs... proposent de mieux en terme de savoir-faire, de créations et d'originalités.

Nous vous accueillons dans le confort, l'élégance et le charme avec un décor simple, moderne et épuré. La couleur blanche associée au bleu ou au rouge des tissus donne une immédiate impression de confort et de tranquillité.

Les chambres ont été décorées avec des meubles contemporains signés Ligne Roset, côte à côte avec une bergère ancienne de Gilles Nouailhac, les tissus signés Ralph Lauren, Pierre Frey, Lelièvre, Designer Guild, Brunschweg. Elles rappellent un certain classicisme et réfèrent à la tradition Lyonnaise de la soie.

COFFRET GOURMETS EN DUO

Art de vivre, un coffret qui s'adresse aux amoureux de cuisine, aux passionnés de pâtisserie, aux amateurs de grands crus.

[En savoir plus](#)

- Only Lyon
- Mentions légales
- Contactez-nous
- Notre blog

f t g+

M GALLERY

Les adaptations s'exécutent suffisamment rapidement pour ne pas gêner la navigation (environ 80ms pour naviguer entre pages). Ce prototype sera testé à brève échéance lors d'une expérimentation avec plus d'une centaine d'utilisateurs finaux.

7.2 La situation de Bernard

Nous présentons ici l'exemple de Bernard en nous appuyant sur le prototype quand bien même certaines règles d'adaptation illustrées dans cet exemple ne sont pas implémentées, celles-ci ne présentant pas, *a priori*, de problème spécifique. Les adaptations présentées dans cette section sont donc celles envisagées.

La page de localisation du site de l'hôtel est présentée sur la figure 13. Sur la version non adaptée de cette IHM, la taille de police est définie à 12,8px, ce qui est inférieur à la taille que nous avons identifiée comme taille par défaut (16px, voir section 5.1.1). L'arrière-plan est beige (en RGB : 255, 249, 222) tandis que le texte est gris foncé (en RGB : 24, 24, 24). Calculé avec les formules du WCAG, le ratio de contraste est de 16.8:1, ce qui est largement conforme aux préconisations (au minimum 7.1:1, voir section 6.1.2) pour une utilisation en luminosité normale.

Fig. 13. Page de localisation de l'hôtel (non adaptée - variant smartphone)



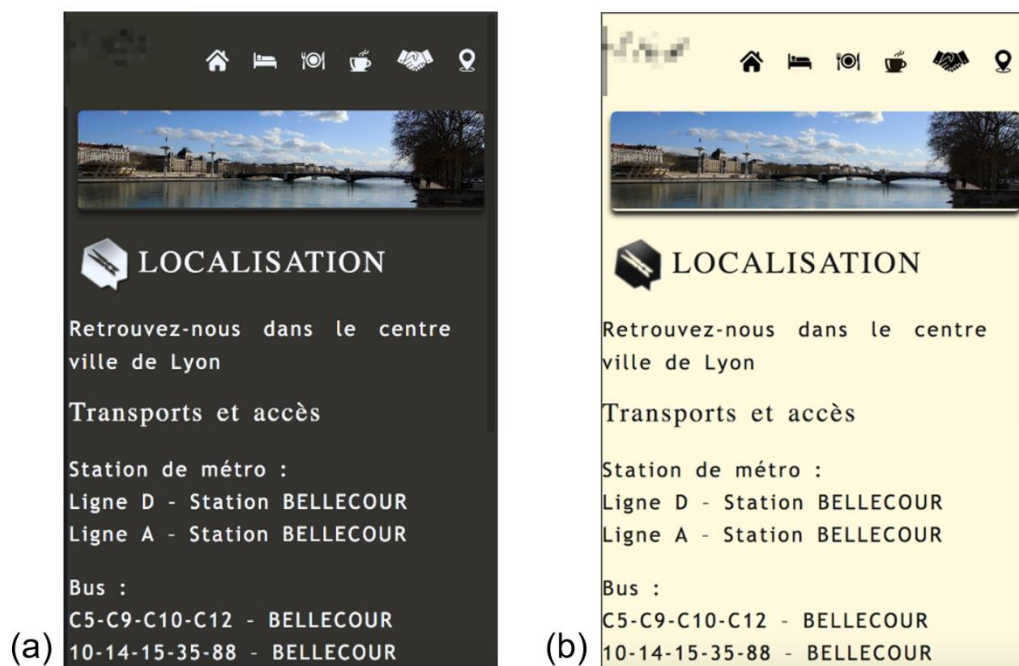
À l'ouverture du site web, le moteur d'inférence détecte la situation courante : il évalue la taille de l'écran de Bernard, déduit qu'il s'agit d'un smartphone et charge le variant correspondant. L'adaptation se base ensuite sur différentes caractéristiques du contexte d'usage, déclarées ou inférées. La luminosité ambiante est captée dans le but de détecter que Bernard, présentement dans le métro, est dans un environnement relativement sombre. Bernard a par ailleurs déclaré des caractéristiques personnelles : il a fourni sa date de naissance, il a indiqué souffrir de la cataracte (à un niveau qu'il a estimé « assez fort ») et de daltonisme dû à cette cataracte. Il a aussi précisé ne pas être dyslexique, ni atteint de vision tunnelisée.

Si l'IHM ne s'adaptait pas à cette situation, Bernard n'aurait pas le choix : il devrait zoomer sur la page ou modifier le paramétrage de son navigateur pour agrandir la taille de la police de caractères. Cependant, n'ayant qu'une main libre du fait de sa canne, zoomer à l'aide d'un pincement serait complexe. De plus, outre le fait de nécessiter une action

utilisateur, le zoom proportionnel entraîne généralement le besoin de scroller horizontalement pour chaque ligne à lire, ce qui n'est pas recommandé (WCAG), encore moins pour les personnes âgées (WAI-AGE). Il ne pourrait pas facilement augmenter l'espacement entre les lettres, mots et paragraphes, alors que, nous l'avons vu, c'est un facteur de confort.

Dans le cas présent, avec une interface adaptative, le moteur activerait les règles floues impactées par l'acuité visuelle de Bernard, son âge, sa photophobie, ainsi que la luminosité ambiante : R1, R2, R5, R6, R7, R10, R13, R17, R19, R20, R22, R23 et R25. Ces règles nous renverraient une valeur pour la taille de police de tout texte (R1 et R2) et la taille de police des hyperliens en particulier (R1, R2 et R5), le niveau de luminosité et de saturation de l'arrière-plan (R6, R7 et R10), le niveau de contraste entre arrière-plan et texte (R13), et les divers espacements (R17, R19, R20, R22, R23 et R25). Un point important ici est que les règles peuvent se renforcer mutuellement ou s'opposer. Concernant l'espacement entre les mots, le fait que Bernard soit considéré comme âgé entraînerait une augmentation de l'espacement (R20) tout comme le fait qu'il soit considéré comme ayant une acuité visuelle dégradée, entraînant le même effet (R19). En termes de niveau de contraste et de gestion des couleurs, nous avons ici des règles de finalités opposées : d'une part, un assombrissement de l'arrière-plan dû à la photophobie (R6) et à la diminution de la luminosité ambiante (R10), et d'autre part, un éclaircissement en raison de l'âge de Bernard (R7). Ici, la combinaison du lot de règles R10 ainsi que la règle R6 auraient plus de poids que la règle R7, entraînant la mise en place d'une interface assombrie (figure 14a).

Fig. 14. Page de localisation de l'hôtel adaptée à Bernard pour smartphone et pour un environnement sombre (a) et un environnement lumineux (b)



Une fois arrivé à sa station de métro, Bernard reprend son téléphone afin de regarder comment atteindre l'hôtel. Bernard sort de la station de métro tout en consultant la page de localisation de l'hôtel : la luminosité ambiante augmente progressivement jusqu'à atteindre le plein soleil à l'extérieur. Dès lors, le système réagirait en activant de moins en moins le lot de règles R10 et en lançant l'activation de la règle R12. La diminution de R10 entraînerait un retour à la normal en terme de luminosité d'arrière-plan, et l'IHM reviendrait à sa version standard avec son fond beige clair. Cependant, la règle R12 déclencherait une augmentation du niveau de contraste avec le texte. La condition « if sunlight » étant de plus en plus vérifiée au fil de l'avancement de Bernard vers la sortie, la règle préconiserait un ratio de contraste de plus en plus fort, ce qui entrerait en contradiction avec les conclusions de la règle R13 : la

cataracte induisant une légère photophobie, la condition « if photophobe » a une probabilité non nulle et tend donc à légèrement atténuer le contraste. La combinaison des règles en logique floue permet de trouver un compromis sans avoir besoin de déterminer un système de priorisation : le contraste préconisé dans une telle situation serait légèrement inférieur à celui que recommanderait la règle sur la luminosité seule (figure 14b).

8 DISCUSSION

Nous avons illustré avec des exemples concrets comment notre prototype prend en compte les règles d'accessibilité et de là, améliorer la prise en compte de l'accessibilité. Ce prototype est de taille réaliste pour un site web. Les règles à mettre à œuvre simultanément sont suffisamment nombreuses (81) pour obtenir une combinaison de règles réaliste.

Avec l'exemple de Bernard, nous avons détaillé un ensemble de 26 règles. Nous avons choisi une situation qui nécessitait l'activation simultanée de 13 d'entre elles. Enfin, avec l'exemple du calcul du niveau de contraste, nous avons montré comment les règles peuvent s'opposer ou se renforcer, et comment le moteur d'adaptation en logique floue, grâce à la défuzzification, produirait le résultat idoine.

Dans (Giuffrida et al., 2019), une évaluation avec des experts a permis de tester la pertinence des choix du moteur en logique floue. Il est maintenant nécessaire de tester la combinaison des règles avec des utilisateurs finaux. Pour ce faire, une expérimentation est en cours de réalisation avec le prototype présenté dans cet article afin de voir s'il permet de répondre convenablement à nos problématiques d'accessibilité.

La plupart des recommandations que nous avons trouvées dans la littérature est transcribable en règles d'adaptation. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une métrique qui caractérise les éléments de contexte, les seuils, et les actions pour ces seuils. Par exemple, pour la recommandation du WAI-AGE sur l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt pour les personnes âgées, nous avons une métrique (l'âge), un seuil (« personne âgée », traduit ici par un âge supérieur à 55 ans), et une action (taille de police minimale). Toutefois, métrique, seuil et action peuvent être difficiles à identifier. Tel est le cas, par exemple, de la règle 1.1.1 du WCAG qui spécifie que « si le contenu non textuel vise d'abord à créer une expérience sensorielle spécifique, l'équivalent textuel fournit au moins une identification descriptive de ce contenu non textuel ». A moins d'annoter le contenu des IHM avec des indicateurs d'intention, il n'est pas possible de détecter automatiquement que l'intention du concepteur est de créer une expérience sensorielle. Il est donc impossible d'exprimer que l'identification descriptive doit être proposée par défaut si l'utilisateur n'est pas à même de partager cette expérience sensorielle.

En outre, la littérature fournit peu de règles à respecter en cas de contexte d'usage complexe et dynamique, par exemple pour une personne ayant une combinaison de plusieurs handicaps (permanents ou situationnels). Tel est le cas de Bernard, pourtant un exemple simplifié qui ne tient compte que d'un nombre restreint de caractéristiques. Cette question difficile a été abordée dans quelques travaux comme la thèse d'Amélie Roche en 2015. Toutefois, à notre connaissance, ce problème a été traité davantage sous l'angle des techniques de conception d'IHM pour les polyhandicapés (et notamment le recueil de besoins) que sous l'angle de la définition de systèmes adaptatifs.

Dans un système adaptatif, l'une des difficultés est que deux handicaps non exclusifs peuvent avoir des recommandations qui se renforcent ou s'opposent. On pourrait par exemple souhaiter augmenter la taille de police (car un utilisateur a une mauvaise acuité visuelle) mais aussi la réduire (car cet utilisateur est atteint de vision tunnelisée). Une adaptation ne prenant en compte que l'un des handicaps pourrait poser problème : l'utilisateur pourrait se retrouver pénalisé en raison du second handicap qui nécessiterait une adaptation opposée. Notre outil permet ici de calculer un compromis entre les deux recommandations, via la logique floue et sa gestion de la combinatoire des règles.

A l'inverse, avant de généraliser l'approche, il conviendra de répondre à trois questions : (a) toutes les règles d'adaptation peuvent-elles se ramener à des séries de règles floues simples ? (b) la recherche de compromis ne risque-t-elle pas d'être contre-productive dans certains cas ? et (c) les utilisateurs sont-ils davantage satisfaits avec un système adaptatif qu'avec un système non adaptable ? Ce dernier point est celui que nous allons aborder expérimentalement à court terme.

9 CONCLUSION

Avec la diffusion massive de l'utilisation d'Internet, l'accessibilité des interfaces est un besoin toujours plus prégnant. Cependant, même si de nombreux travaux ont abordé cette thématique, il demeure des verrous tels que l'incertitude du contexte d'usage et de la combinaison de multiples règles d'adaptation. Dans cet article, nous avons montré comment Fuzzy4U permet d'améliorer dynamiquement l'accessibilité des IHM grâce à un moteur d'adaptation utilisant la logique floue.

Nous avons aussi précisé comment des recommandations d'accessibilité statiques, sont traduisibles en règles d'adaptation floues, et comment ces règles peuvent ensuite être activées dynamiquement en fonction de la situation de l'utilisateur pour améliorer l'accessibilité des IHM. Pour cela, la logique floue dispose d'une gestion intrinsèque de l'incertitude et de la combinatoire des règles, permettant de les combiner pour se renforcer ou se modérer mutuellement afin de parvenir à un résultat moyenné. Nous avons montré sur un prototype comme elle pouvait être mises en œuvre. Ce prototype doit maintenant être testé auprès d'utilisateurs représentatifs pour évaluer la pertinence des adaptations.

Au vu des difficultés à identifier les recommandations d'accessibilité, dispersées dans la littérature, et à les formaliser en règles codées dans le cas de contextes d'usage complexes, il serait intéressant de créer un référentiel de règles basées sur les recommandations.

LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ L'amélioration de l'accessibilité des IHM au travers d'un moteur d'adaptation en logique floue
- ✓ La prise en charge des handicaps multiples grâce à la combinatoire des règles
- ✓ La création d'un référentiel de règles d'accessibilité

10 REFERENCES

- ▶ ABRAHÃO, S., BORDELEAU, F., CHENG, B., KOKALY, S., PAIGE, R. F., STÖRRLE H. et WHITTLE, J., 2017. User Experience for Model-Driven Engineering: Challenges and Future Directions. In 2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS).
- ▶ ALM, N., DYE, R., GOWANS, G., CAMPBELL, J., ASTELL, A. J. ET ELLIS, M., 2007. A COMMUNICATION SUPPORT SYSTEM FOR OLDER PEOPLE WITH DEMENTIA. IEEE COMPUTER SOCIETY, WASHINGTON.
- ▶ AKIKI, P., BANDARA A. K., YU Y., 2014. ADAPTIVE MODEL-DRIVEN USER INTERFACE DEVELOPMENT SYSTEMS. ACM COMPUTER SURVEY, 47 (1), ARTICLE 9 (MAI 2014), 33 PAGES.
- ▶ AKIKI, P., 2016. ENGINEERING ADAPTIVE MODEL-DRIVEN USER INTERFACES FOR ENTERPRISE APPLICATIONS. IN IEEE TRANSACTIONS ON SOFTWARE ENGINEERING, 42 (12), PP. 1118-1147.
- ▶ BEKA BE NGUEMA M., KOLSKI C., MALVACHE N., WAROUX D., 2000. DESIGN OF HUMAN ERROR TOLERANT INTERFACE USING FUZZY LOGIC. ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 13 (3), PP. 279-292.
- ▶ BERNER, J., 2014. PSYCHOSOCIAL, SOCIO-DEMOGRAPHIC AND HEALTH DETERMINANTS IN

INFORMATION COMMUNICATION TECHNOLOGY USE BY OLDER-ADULTS. THÈSE DE DOCTORAT, BLEKINGE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SUÈDE.

- ▶ BLOUIN, A., MORIN, B., BEAUDOUX, O., NAIN, G., ALBERS, P. ET JEZEQUEL J.-M., 2011. COMBINING ASPECT-ORIENTED MODELING WITH PROPERTY-BASED REASONING TO IMPROVE USER INTERFACE ADAPTATION. IN PROCEEDINGS OF THE 3RD ACM SIGCHI SYMPOSIUM ON ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS, PISE, ITALY, PP. 85-94.
- ▶ BLUMENDORF, M., FEUERSTACK S. ET ALBAYRAK, S., 2008. MULTIMODAL USER INTERFACES FOR SMART ENVIRONMENTS: THE MULTI-ACCESS SERVICE PLATFORM. IN PROCEEDINGS OF THE WORKING CONFERENCE ON ADVANCED VISUAL INTERFACES, NAPOLI, 2008, PP. 478-479.
- ▶ BOUCHON-MEUNIER B., 2007. LA LOGIQUE FLOUE. PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE - PUF (Ed.), 2007.
- ▶ CALVARY, G., COUTAZ, J., THEVENIN, D., LIMBOURG, Q., BOUILLON, L. ET VANDERDONCKT, J., 2003. A UNIFYING REFERENCE FRAMEWORK FOR MULTI-TARGET USER INTERFACES. INTERACTING WITH COMPUTERS, 15 (3), PP. 289-308.
- ▶ CAO, J., XING, N., CHAN, A., FENG, Y. ET JIN, B., 2005. SERVICE ADAPTATION USING FUZZY THEORY IN CONTEXT-AWARE MOBILE COMPUTING MIDDLEWARE, IN PROCEEDINGS OF THE 11TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED AND REAL-TIME COMPUTING SYSTEMS AND APPLICATIONS (RTCSA'05), HONG KONG, CHINA, PP. 496-501.
- ▶ CERET, E., DUPUY-CHESSA, S., CALVARY, G. ET BITTAR, M., 2016. SYSTEM AND METHOD FOR MAGNETIC ADAPTATION OF A USER INTERFACE, FRANCE INPI BREVET TPI2015053, 07 07 2015 ET 07 07 2016.
- ▶ CHESTA C., PATERNO F. ET SANTORO C., 2004. METHODS AND TOOLS FOR DESIGNING AND DEVELOPING USABLE MULTI-PLATFORM INTERACTIVE APPLICATIONS, PSYCHNOLOGY JOURNAL, VOL. 2, PP. 123-139.
- ▶ COUTAZ J., 2006. META-USER INTERFACES FOR AMBIENT SPACES. IN PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TASK MODELS AND DIAGRAMS FOR USERS INTERFACE DESIGN (TAMODIA'06), Hasselt, Belgium, pp. 1-15.
- ▶ COUTAZ J., 2010. User Interface Plasticity: Model Driven Engineering to the Limit!. ACM, ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS (EICS 2010) INTERNATIONAL CONFERENCE, KEYNOTE PAPER, BERLIN, GERMANY, PP. 1-8.
- ▶ CUEVA-FERNANDEZ, G., ESPADA, J. P., GARCIA-DIAZ, V., CRESPO, R. G. ET GARCIA-FERNANDEZ, N., 2016. FUZZY SYSTEM TO ADAPT WEB VOICE INTERFACES DYNAMICALLY IN A VEHICLE SENSOR TRACKING APPLICATION DEFINITION, IN SOFT COMPUTING, 20 (8), PP. 3321-3334.
- ▶ DE LARA, S., WATANABE, W., DOS SANTOS, E. ET FORTES, R., 2010. IMPROVING WCAG FOR ELDERLY WEB ACCESSIBILITY, IN PROCEEDINGS OF THE 28TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN OF COMMUNICATION (SIGDOC'10), SÃO PAULO, BRÉSIL.
- ▶ DE SANTANA, V. F., DE OLIVEIRA, R., ALMEIDA, L. D. A. ET BARANAUSKAS, M. C. C., 2012. WEB ACCESSIBILITY AND PEOPLE WITH DYSLEXIA, IN PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CROSS-DISCIPLINARY CONFERENCE ON WEB ACCESSIBILITY (W4A'12).
- ▶ DELLAPORTA, A., 2007. WEB ACCESSIBILITY AND THE NEEDS OF USERS WITH DISABILITIES, IN ADVANCES IN UNIVERSAL WEB DESIGN AND EVALUATION: RESEARCH, TRENDS AND OPPORTUNITIES. IGI GLOBAL, 2007, PP. 1-24.
- ▶ DESRUELLE, H., BLOMME, D. ET GIELEN, F., 2011. ADAPTIVE MOBILE WEB APPLICATIONS: A QUANTITATIVE EVALUATION APPROACH, IN INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB ENGINEERING, SPRINGER BERLIN HEIDELBERG, PP. 375-378.
- ▶ DEUFF, D., COSQUER, M., 2013. USER-CENTERED AGILE METHOD. FOCUS SERIES, WILEY-ISTE ED., FIRST EDITION, 127 PAGES, ISBN 978-1848214538.

- ▶ DEY, A.K., 2001. UNDERSTANDING AND USING CONTEXT, IN PERSONAL UBIQUITOUS COMPUTING, 5 (1), PP. 4-7.
- ▶ EDMONDS, E.A., 1981. ADAPTIVE MAN-COMPUTER INTERFACES. IN COOMBS, M. J. AND ALTY, J. L., (EDS.), COMPUTING SKILLS AND THE USER INTERFACES. ACADEMIC PRESS, LONDON.
- ▶ FLORINS, M., 2006. GRACEFUL DEGRADATION: A METHOD FOR DESIGNING MULTIPLATFORM GRAPHICAL USER INTERFACES. THÈSE DE DOCTORAT, LOUVAIN-LA-NEUVE, BELGIQUE.
- ▶ GAJOS, K. Z., WELD, D. S., ET WOBROCK J. O., 2010. AUTOMATICALLY GENERATING PERSONALIZED USER INTERFACES WITH SUPPLE. ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 174 (12-13), AUGUST 2010, PP. 910-950.
- ▶ GENARO MOTTI, V., MEZHOUDI, N. ET VANDERDONCKT, J. (EDS.), 2012. MACHINE LEARNING IN THE SUPPORT OF CONTEXT-AWARE ADAPTATION. WORKSHOP ON CONTEXT-AWARE ADAPTATION OF SERVICE FRONT-ENDS (PISA, 13/11/2012). IN: FRANCISCO JAVIER CAMINERO GIL, FABIO PATERNÒ, JEAN VANDERDONCKT, PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP ON CONTEXT-AWARE ADAPTATION OF SERVICE FRONT-ENDS, 2012.
- ▶ GHIANI, G., MANCA, M., PATERNO, F. ET SANTORO, C., 2017. PERSONALIZATION OF CONTEXT-DEPENDENT APPLICATIONS THROUGH TRIGGER-ACTION RULES. ACM TRANSACTIONS ON COMPUTER-HUMAN INTERACTION (TOCHI), 24(2), ARTICLE 14, 33 PAGES.
- ▶ GIUFFRIDA, T., DUPUY-CHESSA, S., POLI, J.-PH., CERET, E., 2019. FUZZY4U: A FUZZY LOGIC SYSTEM FOR USER INTERFACES ADAPTATION. IN IEEE THIRTEEN INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH CHALLENGES IN INFORMATION SCIENCE (RCIS), MAY 29-31, 2019, BRUSSELS, BELGIUM.
- ▶ HAUT CONSEIL DE LA FAMILLE, DE L'ENFANCE ET DE L'AGE (HCFEA), 2019. AVIS DU CONSEIL DE L'AGE SUR LA DEMARCHE MONALISA ET SUR LA POLITIQUE DE MAINTIEN DU LIEN SOCIAL ET DE LUTTE CONTRE L'ISOLEMENT DES PERSONNES AGEES, ADOPTE LE 16 MAI 2019, [HTTP://WWW.HCFEA.FR](http://www.hcfea.fr).
- ▶ HORTON, S. ET QUESENBERRY, W., 2014. A WEB FOR EVERYONE: DESIGNING ACCESSIBLE USER EXPERIENCES, ROSENFELD MEDIA ED., 288 PAGES.
- ▶ IACCARINO, G., MALANDRINO, D., DEL PERCIO, M. ET SCARANO, V., 2006. EFFICIENT EDGE-SERVICES FOR COLORBLIND USERS. PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WORLD WIDE WEB (WWW'06), EDINBURGH, SCOTLAND.
- ▶ ISO 9241-210:2010. ERGONOMICS OF HUMAN-SYSTEM INTERACTION - PART 210: HUMAN-CENTRED DESIGN FOR INTERACTIVE SYSTEMS. 2010. ISO, GENEVA, SWITZERLAND.
- ▶ JASBERG, K. ET SIZOV, S., 2018. NEUROSCIENTIFIC USER MODELS: THE SOURCE OF UNCERTAIN USER FEEDBACK AND POTENTIALS FOR IMPROVING WEB PERSONALISATION. IN: HACID H., CELLARY W., WANG H., PAIK HY., ZHOU R. (EDS.) WEB INFORMATION SYSTEMS ENGINEERING (WISE 2018). WISE 2018. LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE, VOL 11234. SPRINGER, CHAM
- ▶ JUNG, S. G., AN, J., KWAK, H., SALMINEN, J. ET JANSEN, B. J., 2018. ASSESSING THE ACCURACY OF FOUR POPULAR FACE RECOGNITION TOOLS FOR INFERRING GENDER, AGE, AND RACE. IN TWELFTH INTERNATIONAL AAAI CONFERENCE ON WEB AND SOCIAL MEDIA.
- ▶ KOLEKAR, S., PAI, R. ET MANOHARA, M. M., 2018. RULE-BASED ADAPTIVE USER INTERFACE FOR ADAPTIVE E-LEARNING SYSTEM. IN EDUCATION AND INFORMATION TECHNOLOGIES 24, PP. 613-641.
- ▶ KOLSKI C. ET LE STRUGEON, E., 1998. A REVIEW OF INTELLIGENT HUMAN-MACHINE INTERFACES IN THE LIGHT OF THE ARCH MODEL. INTERNATIONAL JOURNAL OF HUMAN-COMPUTER INTERACTION, 10 (3), PP. 193-231.
- ▶ KURNIAWAN, S. H., KING, A., EVANS, D. G. ET BLENKHORN, P. L., 2006. PERSONALISING WEB PAGE PRESENTATION FOR OLDER PEOPLE. INTERACTING WITH COMPUTERS, 18(3), PP.

457-477.

- ▶ LAW, E. L.-C., ROTO V., HASSENZAHN, M., VERMEEREN, A. P.O.S. ET KORT, J., 2009. UNDERSTANDING, SCOPING AND DEFINING USER EXPERIENCE: A SURVEY APPROACH. IN PROCEEDINGS OF THE SIGCHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS (CHI '09). ACM, NEW YORK, NY, USA, PP. 719-728.
- ▶ LEHMANN, G., RIEGER, A., BLUMENDORF M. ET ALBAYRAK, S., 2010. A 3-LAYER ARCHITECTURE FOR SMART ENVIRONMENT MODELS. IN 8TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS WORKSHOPS, MANNHEIM, PP. 636-641.
- ▶ LORANGER, H., 2017. PLAIN LANGUAGE IS FOR EVERYONE, EVEN EXPERTS. NIELSEN NORMAN GROUP. ACCESSIBLE EN LIGNE : [HTTPS://WWW.NNGROUP.COM/ARTICLES/PLAIN-LANGUAGE-EXPERTS/](https://www.nngroup.com/articles/plain-language-experts/).
- ▶ LÜTJEN, M., KREOWSKI, H.-J., FRANKE M., THOBEN, K.-D. ET FREITAG, M., 2014. MODEL-DRIVEN LOGISTICS ENGINEERING – CHALLENGES OF MODEL AND OBJECT TRANSFORMATION. *PROCEDIA TECHNOLOGY*, VOL. 15, PP. 303-312. ISSN 2212-0173.
- ▶ MARÇAL DE OLIVEIRA, K., GIRARD, P., GUIDINI GONÇALVES, T., LEPREUX, S., AND KOLSKI, C., 2015. TEACHING TASK ANALYSIS FOR USER INTERFACE DESIGN: LESSONS LEARNED FROM THREE PILOT STUDIES. IN PROCEEDINGS OF THE 27TH CONFERENCE ON L'INTERACTION HOMME-MACHINE (IHM '15). ACM, NEW YORK, NY, USA, ARTICLE 31, 6 PAGES.
- ▶ MCCARTHY, J. E. ET SWIERENGA, S. J., 2009. WHAT WE KNOW ABOUT DYSLEXIA AND WEB ACCESSIBILITY: A RESEARCH REVIEW. *UNIVERSAL ACCESS IN THE INFORMATION SOCIETY*, 9(2), PP.147–152.
- ▶ MEIXNER, G., PATERNO, F. ET VANDERDONCKT, J., 2011. PAST, PRESENT, AND FUTURE OF MODEL-BASED USER INTERFACE DEVELOPMENT. *I-COM 10*, 3 (NOVEMBER 2011), 2–10.
- ▶ MIÑON, R., PATERNO, F., ARRUE, M. ET ABASCAL, J., 2016. INTEGRATING ADAPTATION RULES FOR PEOPLE WITH SPECIAL NEEDS IN MODEL-BASED UI DEVELOPMENT PROCESS. *UNIVERSAL ACCESS IN THE INFORMATION SOCIETY*, 15 (1), PP. 153-168.
- ▶ MOCHIZUKI, R., NAKAMURA, T., CHAO, J. ET LENZ, R., 2008. COLOR-WEAK CORRECTION BY DISCRIMINATION THRESHOLD MATCHING, IN CONFERENCE ON COLOUR IN GRAPHICS, IMAGING, AND VISION, VOL. 2008, N° 1, PP. 208-213, SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- ▶ MUSSBACHER, G., AMYOT, D., BREU, R., BRUEL, J.-M., CHENG, B.H.C., COLLET, P., COMBEMALE B., FRANCE, R.B., HELDAL, R., HILL, J., KIENZLE, J., SCHÖTTLE, M., STEIMANN, F., STIKKOLORUM, D. ET WHITTLE, J., 2014. THE RELEVANCE OF MODEL-DRIVEN ENGINEERING THIRTY YEARS FROM NOW. IN MODEL-DRIVEN ENGINEERING LANGUAGES AND SYSTEMS (MODELS'14), LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE, VOL. 8767, PP. 183-200.
- ▶ MYERS, B., HUDSON, S. E., AND PAUSCH, R., 2000. PAST, PRESENT, AND FUTURE OF USER INTERFACE SOFTWARE TOOLS. *ACM TRANSACTION ON COMPUTER-HUMAN INTERACTION (TOCHI)*, 7 (1), (MARCH 2000), PP. 3-28.
- ▶ NGUYEN, T.-D., VANDERDONCKT, J. ET SEFFAH, A., 2016. UIPLML: A PATTERN TOOL FOR ENGINEERING MULTI-PLATFORMS INFORMATION SYSTEMS. IN TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH CHALLENGES IN INFORMATION SCIENCE (RCIS), JUNE 1-3, 2016, GRENOBLE, FRANCE.
- ▶ NYONGESA, H. O., SHICHENG, T., MALEKI-DIZAJI, S., HUANG, S. T. ET SIDDIQI, J., 2003. ADAPTIVE WEB INTERFACE DESIGN USING FUZZY LOGIC, IN PROCEEDINGS IEEE/WIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB INTELLIGENCE (WI 2003), PP. 671-674.
- ▶ PAPTHEOCHAROUS, E., BELK, M., GERMANAKOS, P. ET SAMARAS, G., 2012. PROPOSING A FUZZY ADAPTATION MECHANISM BASED ON COGNITIVE FACTORS OF USERS FOR WEB

- PERSONALIZATION. IN 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS AND INNOVATIONS (IAI), SEPT. 2012, HALKIDIKI, GREECE, PP.135-144.
- ▶ PATERNO, F., SANTORO, C., ET SPANO, L. D., 2009. MARIA: A UNIVERSAL, DECLARATIVE, MULTIPLE ABSTRACTION-LEVEL LANGUAGE FOR SERVICE-ORIENTED APPLICATIONS IN UBIQUITOUS ENVIRONMENTS. ACM TRANSACTIONS ON COMPUTER-HUMAN INTERACTION (TOCHI), 16 (40), 2009.
 - ▶ PEISSNER, M., HÄBE, D., JANSSEN, D. ET SELLNER, T., 2012. MYUI: GENERATING ACCESSIBLE USER INTERFACES FROM MULTIMODAL DESIGN PATTERNS. IN PROCEEDINGS OF THE 4TH ACM SIGCHI SYMPOSIUM ON ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS, NEW YORK.
 - ▶ QUILLION-DUPRÉ, L., MONFORT, E. ET RIALLE, V., 2018. TABLETTE TACTILE ET ADULTES ÂGÉS, APPORTS D'UN PROGRAMME D'INITIATION ADAPTÉ AUX TROUBLES NEUROCOGNITIFS, EDUCATION & FORMATION – E-311, NOVEMBRE 2018, PP. 43-59.
 - ▶ RELLO, L., KANVINDE, G., ET BAEZA-YATES, R., 2012. LAYOUT GUIDELINES FOR WEB TEXT AND A WEB SERVICE TO IMPROVE ACCESSIBILITY FOR DYSLEXICS. IN PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CROSS-DISCIPLINARY CONFERENCE ON WEB ACCESSIBILITY (W4A'12).
 - ▶ RELLO, L., PIELOT, M. ET MARCORD, M.-C., 2013. SIZE MATTERS (SPACING NOT): 18 POINTS FOR A DYSLEXIC-FRIENDLY WIKIPEDIA. IN PROCEEDINGS OF THE 10TH ACM INTERNATIONAL CROSS-DISCIPLINARY CONFERENCE ON WEB ACCESSIBILITY (W4A'13), RIO DE JANEIRO, BRAZIL, PP.1-4.
 - ▶ REMPEL, A. G., MANTIUK, R. ET HEIDRICH, W., 2011. DISPLAY CONSIDERATIONS FOR IMPROVED NIGHT VISION PERFORMANCE. IN PROCEEDINGS OF THE 19TH COLOR AND IMAGING CONFERENCE, PP. 191-194(4), SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUB.
 - ▶ RICHARDS, J. T. ET HANSON, V. L., 2004. WEB ACCESSIBILITY: A BROADER VIEW. IN PROCEEDINGS OF THE 13TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON WORLD WIDE WEB, PP. 72-79.
 - ▶ RIDING, R. ET CHEEMA, I. 1991. COGNITIVE STYLES — AN OVERVIEW AND INTEGRATION. IN EDUCATIONAL PSYCHOLOGY, VOL. 11, PP. 193-215.
 - ▶ SCHMUTZ, S., SONDEREGGER, A. ET SAUER, J., 2017. EFFECTS OF ACCESSIBLE WEBSITE DESIGN ON NONDISABLED USERS: AGE AND DEVICE AS MODERATING FACTORS. IN ERGONOMICS 61, PP. 1-39.
 - ▶ SCHNEIDER-HUFSCHMIDT, M., KÜHME, T., ET MALINKOWSKI, U. (EDS.) (1993). ADAPTIVE USER INTERFACES: PRINCIPLES AND PRACTICE. NORTH HOLLAND.
 - ▶ SOTTET, J.S., GANNEAU, V., CALVARY, G., COUTAZ, J., DEMEURE, A., FAVRE, J.-M., DEMUMIEUX, R., 2007. MODEL-DRIVEN ADAPTATION FOR PLASTIC USER INTERFACES. IN: BARANAUSKAS C., PALANQUE P., ABASCAL J., BARBOSA S.D.J. (EDS.) HUMAN-COMPUTER INTERACTION – INTERACT 2007. LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE, VOL. 4662. SPRINGER, BERLIN, HEIDELBERG.
 - ▶ SOUI, M., ABED, M. ET GHEDIRA, K., 2013. FUZZY LOGIC APPROACH FOR ADAPTIVE SYSTEMS DESIGN. IN: KUROSU M. (EDS.) HUMAN-COMPUTER INTERACTION. TOWARDS INTELLIGENT AND IMPLICIT INTERACTION. HCI 2013. LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE, VOL. 8008. SPRINGER, BERLIN, HEIDELBERG, PP. 141-150.
 - ▶ THEVENIN, D. ET COUTAZ, J., 1999. PLASTICITY OF USER INTERFACES: FRAMEWORK AND RESEARCH AGENDA. PROCEEDING OF IFIP CONFERENCE ON HUMAN COMPUTER INTERACTION INTERACT. AUGUST 30 – SEPTEMBER 3,1999. EDINBURGH, SCOTLAND. SASSE, A. AND JOHNSON, C. (EDS.), IFIPIOS PRESS.
 - ▶ THEVENIN, D., COUTAZ, J. ET CALVARY, G., 2003. A REFERENCE FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF PLASTIC USER INTERFACES, IN MULTI-DEVICE AND MULTI-CONTEXT USER

INTERFACES: ENGINEERING AND APPLICATIONS FRAMEWORKS.

- ▶ VIRTUAL USER MODELING AND SIMULATION CLUSTER (VUMS), 2013. ACCESSIBLE EN LIGNE : [HTTP://VUMS.ITI.GR/INDEXB60B.HTML?PAGE_ID=44](http://vums.itl.gr/indexb60b.html?page_id=44).
- ▶ WHITTLE, J., HUTCHINSON, J., ROUNCFIELD, M., 2014. THE STATE OF PRACTICE IN MODEL-DRIVEN ENGINEERING, IEEE SOFTWARE, 31(3), PP. 79-85.
- ▶ WOBROCK, J., 2019. SITUATIONALLY AWARE MOBILE DEVICES FOR OVERCOMING SITUATIONAL IMPAIRMENTS. IN PROCEEDINGS OF THE ACM SIGCHI SYMPOSIUM ON ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS (EICS '19). ACM, NEW YORK, NY, USA, PP. 1-18.
- ▶ YIGITBAS, E., SAUER, S. ET ENGELS, G., 2017. ADAPT-UI: AN IDE SUPPORTING MODEL-DRIVEN DEVELOPMENT OF SELF-ADAPTIVE UIS. IN PROCEEDINGS OF THE ACM SIGCHI SYMPOSIUM ON ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS, LISBON, 2017.
- ▶ WEB ACCESSIBILITY INITIATIVE (WAI), 2015. INTRODUCTION TO WEB ACCESSIBILITY. ACCESSIBLE EN LIGNE : [HTTPS://WWW.W3.ORG/WAI/FUNDAMENTALS/ACCESSIBILITY-INTRO](https://www.w3.org/WAI/fundamentals/accessibility-intro).
- ▶ YANG, S.J. ET SHAO, N.W., 2007. ENHANCING PERVASIVE WEB ACCESSIBILITY WITH RULE-BASED ADAPTATION STRATEGY. EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, 32 (4), PP. 1154-1167.
- ▶ ZADEH, L., 1965. FUZZY SETS, IN INFORMATION AND CONTROL, 8 (3), PP. 338-353.
- ▶ ZADEH, L., 1975. THE CONCEPT OF A LINGUISTIC VARIABLE AND ITS APPLICATION TO APPROXIMATE, IN INFORMATION SCIENCES, VOL. 9, PP. 43-80.

11 BIOGRAPHIE



Tanguy Giuffrida

est doctorant en informatique et marketing, au sein de l'équipe Ingénierie de l'Interaction Homme-Machine du Laboratoire d'Informatique de Grenoble. Ses travaux de recherche sont centrés sur l'adaptation des IHM dans un but d'amélioration de l'accessibilité des utilisateurs.



Eric Céret

est Maître de Conférences en Informatique à l'Université Grenoble Alpes. Après 20 ans dans l'industrie du logiciel comme ingénieur et chef de projet, il a soutenu sa thèse en 2014, sur la flexibilité des méthodes de développement pour les IHM. En 2015, il a été recruté comme maître de conférences. Il focalise ses recherches sur la modélisation de l'utilisateur au service de l'adaptation et de la personnalisation des IHM. Plus particulièrement, il étudie les aspects dynamiques de ce modèle, c'est-à-dire les possibilités de représenter un utilisateur changeant et mobile. Enfin, il examine comment prendre en compte cette représentation pour offrir une IHM correspondant au mieux aux attentes de l'utilisateur.



Sophie Dupuy-Chessa

est Professeure en Informatique à l'Université Grenoble Alpes depuis 2014. Elle a obtenu sa thèse à Grenoble en 2000 dans le domaine du génie logiciel, plus précisément en modélisation. Puis elle a été chargée de cours à l'Université de Genève et chargée de recherche au Xerox Research Center Europe. En 2002, elle a été recrutée comme Maître de conférences à l'Université Pierre Mendès-France où elle a développé ses recherches à la croisée des chemins entre interaction homme-machine et systèmes d'information. Ses activités actuelles portent sur la qualité des systèmes d'information innovants en se focalisant sur l'expérience utilisateur par l'adaptation des interfaces homme-machine.



Jean-Philippe Poli

est ingénieur-chercheur au CEA List depuis 2007 et enseignant à l'école Centrale Supélec depuis 2004. Il a soutenu sa thèse en 2007 sur l'indexation automatique des flux télévisuels à l'Institut National de l'Audiovisuel et l'Université Paul Cézanne. En 2007, il est recruté au CEA pour travailler sur des projets sécurité pour lesquels il développe un système expert flou nouvelle génération, appelé ExpressIF. Ses recherches portent aujourd'hui sur la représentation des connaissances vagues, l'apprentissage de modèles interprétables et l'explicabilité des décisions. Les applications de ses travaux sont nombreuses, comme par exemple la médecine personnalisée, la sécurité et la plasticité des interfaces.

Combinaison de dispositifs tactiles comme support à l'analyse de données

Gary Perelman, Marcos Serrano, Christophe Bortolaso, Célia Picard,
Mustapha Derras, Emmanuel Dubois

► **To cite this version:**

Gary Perelman, Marcos Serrano, Christophe Bortolaso, Célia Picard, Mustapha Derras, et al.. Combinaison de dispositifs tactiles comme support à l'analyse de données. Journal d'Interaction Personne-Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM), 2019, 8 (1), pp.1 - 26. hal-02383908

HAL Id: hal-02383908

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02383908>

Submitted on 3 Dec 2019

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.

Combinaison de dispositifs tactiles comme support à l'analyse de données

Gary Perelman^(*),
Marcos Serrano^(°),
Christophe Bortolaso
(*), Célia Picard (*),
Mustapha Derras (*),
Emmanuel Dubois (°)

(*) Berger-Levrault, Toulouse,
France

{prénom.nom}@Berger-Levrault.fr

(°) Université Toulouse 3, IRIT -
ELIPSE

{prénom.nom}@irit.fr

Combination of tactile devices for data analytics

Résumé. Bien que l'analyse ubiquitaire de données soit une approche prometteuse, l'analyse des données dans des tableurs sur des tablettes est une tâche fastidieuse en raison de la taille limitée de l'affichage et du vocabulaire tactile. Dans cet article, nous présentons la conception et l'évaluation de nouvelles techniques d'interaction reposant sur la combinaison d'une tablette contenant les données et d'un smartphone utilisé comme médiateur entre l'utilisateur et la tablette. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser des gestes de "stacking", c'est-à-dire de poser une arrête d'un smartphone sur l'écran de la tablette. Le stacking est un moyen peu coûteux, facile à mettre en œuvre, efficace, et basé sur l'utilisation des smartphones toujours disponibles pour améliorer l'analyse des données sur des tablettes, en augmentant le vocabulaire utilisé et en élargissant la surface d'affichage. Nous explorons d'abord des solutions basées sur le stacking pour délimiter le vocabulaire d'interaction possible et présenter la fabrication d'une coque conductive pour smartphone. Ensuite, nous proposons de nouvelles techniques basées sur le stacking pour réaliser l'analyse de données d'un tableur, c'est-à-dire la création de tableaux croisés dynamiques et leur manipulation. Nous évaluons nos techniques de stacking par rapport aux interactions tactiles fournies par les applications de tableur mobiles actuelles. Nos études révèlent que certaines de nos techniques d'interaction sont 30% plus rapides que le toucher pour créer des tableaux croisés dynamiques.

Mots-clés : Interaction mobile, manipulation de données, interaction multi-dispositifs.

Abstract: Although ubiquitous data analysis is a promising approach, analyzing data in spreadsheets on tablets is a tedious task due to the limited size of the display and tactile vocabulary. In this article, we present the design and evaluation of new interaction techniques based on the combination of a tablet containing the data and a smartphone used as a mediator between the user and the tablet. To do this, we propose to use stacking gestures, i. e. to place a smartphone on top of a tablet. Stacking is an inexpensive, easy to implement, efficient and effective way to improve the analysis of data on tablets, increasing the vocabulary and broadening the display surface by using smartphones that are always available. We first explore stacking-based solutions to delimit the possible interaction vocabulary and present the manufacture of a conductive shell for smartphones. Then, we propose new techniques based on stacking to perform data analysis of a spreadsheet, i.e. the creation of pivot tables and their manipulation. We evaluate our stacking techniques against the tactile interactions provided by current mobile spreadsheet applications. Our studies reveal that some of our interaction techniques are 30% faster than touch to create pivot tables.

Mots-clés : Mobile interaction, data manipulation, multi-device interaction.

1 INTRODUCTION

L'analyse ubiquitaire des données (Elmqvist et al., 2013) consiste à intégrer le processus d'analyse de données dans l'environnement pour donner un sens aux données n'importe où et à tout moment. Ce type de processus d'analyse revêt une importance croissante du fait que les appareils mobiles, en particulier les tablettes, constituent désormais de réels supports de travail professionnels (Baudisch et al., 2010). Pour faciliter l'analyse des données, les utilisateurs transforment généralement les données brutes en tableaux ou en visualisations graphiques, tels que des graphiques ou des diagrammes de dispersion. Le tableau croisé dynamique (Jelen et al., 2010; Microsoft, 2019) est l'une des solutions les plus connues pour générer rapidement ces visualisations de données. Il s'agit d'un type de tableau qui combine les données en appliquant une "fonction d'agrégation" comme le tri, la moyenne ou la somme. De nombreuses applications mobiles (Excel (Excel, 2018), QlikView (QlikView, 2018), QlikSense (QlikSense, 2018), Tableau mobile (Tableau, 2018), par exemple) et des systèmes Web (Voyager (Wongsuphasawat et al., 2016) fournissent cet outil. Cependant, l'interaction avec les tableaux croisés dynamiques sur les tablettes reste difficile : la petite taille de l'écran induit de multiples étapes de navigation, zoom et changement de vue; l'interaction tactile est limitée, puisque les gestes tactiles sont assignés à la navigation dans l'espace de données. Ces problèmes d'interaction nuisent considérablement à la définition de solutions pratiques pour créer et ajuster des tableaux croisés dynamiques. Les travaux présentés dans cet article visent donc à élargir les possibilités d'interaction pour l'analyse de données sur des tablettes, en élargissant les capacités d'interaction actuellement disponibles.

Pour résoudre ce problème, des approches ont exploré l'utilisation de l'interaction multi-touch (Banovic et al., 2011; Heo et al., 2016; Wagner et al., 2014) et du stylet (Jo et al., 2017; Pfeuffer et al., 2017) pour étendre les degrés de liberté en entrée (DoF). Toutefois, ces approches n'étendent pas la taille d'affichage limitée des appareils mobiles. En outre, les utilisateurs doivent apprendre un nouveau vocabulaire multitouch et seuls les stylos actifs peuvent être différenciés du toucher du doigt. Nous proposons comme alternative d'utiliser un périphérique toujours disponible, le smartphone (Santosa et al., 2013), en tant qu'interacteur tangible avec la tablette, et d'employer des gestes de "stacking": le stacking consiste à mettre une arrête ou un coin du smartphone en contact avec l'écran de la tablette contenant le tableau de données à analyser. Le smartphone constitue alors un médiateur (tel que défini dans (Brudy et al., 2016)) entre l'utilisateur et la tablette en fournissant un ensemble d'outils supplémentaires. L'intérêt est triple : 1) nos gestes de stacking n'empêchent pas l'utilisation d'interactions tactiles régulières ; 2) le vocabulaire tactile, consacré à la navigation dans les données, est complété par des gestes de stacking, dédiés à la manipulation des données ; et 3) la zone d'affichage initiale est étendue avec un deuxième écran, qui permet de séparer plusieurs visualisations, telles que des feuilles de calcul, des graphiques ou des tableaux croisés dynamiques.

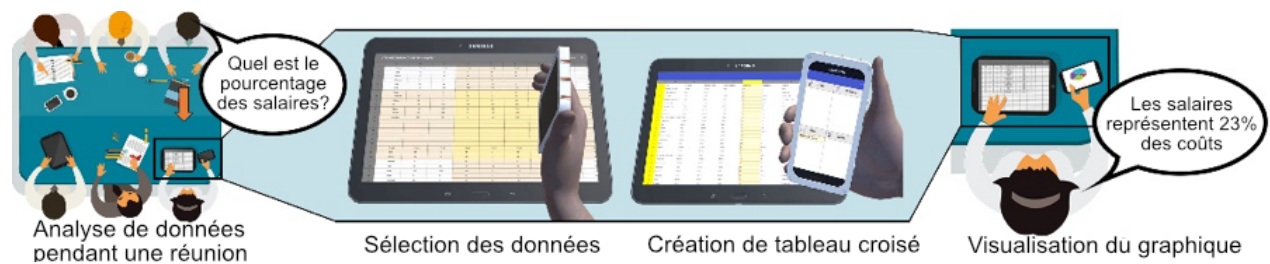
QUESTIONS DE RECHERCHE :

- ✓ Quels gestes de stacking peuvent être réalisés confortablement ?
- ✓ Comment sélectionner des plages de données efficacement avec des gestes de stacking ?
- ✓ Comment créer des tableaux croisés dynamiques efficacement avec des gestes de stacking ?

Dans ces travaux, nous étudions un cas d'utilisation concret qui illustre le besoin d'utilisateurs représentatifs (des élus locaux) en termes d'analyse ubiquitaire de données. Ce cas souligne la nécessité d'une nouvelle solution permettant de générer rapidement des tableaux croisés dynamiques sur des tablettes. Nous explorons ensuite le confort et la faisabilité technique des gestes de stacking : l'étude des différents gestes physiques, tactiles et combinés (physiques + tactiles) qui peuvent être réalisés avec la surface mise en contact conduit à définir un vocabulaire d'interaction exploitant le paradigme de stacking qui soit confortable pour l'utilisateur. Sur la base de ces études, nous concevons et évaluons des techniques de stacking pour les deux étapes de l'analyse de données sur des feuilles de calcul (voir figure 1) : premièrement, la sélection d'une plage de cellules de données (nécessaire

avant toute manipulation de données qu'il s'agisse d'un simple filtrage ou d'une action plus complexe de création de graphiques) et, deuxièmement, la création d'un tableau croisé dynamique (tâche représentative du domaine d'analyse de données (Jelen et al., 2010; Jo et al., 2017)). Nous évaluons ces techniques dans deux expérimentations différentes et les comparons à une solution basée sur les interactions tactiles classiques.

Fig. 1 : Illustration d'un scénario d'utilisation de techniques d'interaction basées sur le stacking : pendant une réunion, Jessica utilise son smartphone et nos techniques de stacking pour 1) sélectionner rapidement les données sur la tablette et 2) créer un tableau croisé dynamique pour générer un graphique.



L'ensemble de cet article, présenté de manière plus synthétique dans (Perelman et al., 2019), décrit des travaux menés dans le cadre de la thèse du premier auteur (Perelman, 2018) et réunit donc :

- les premiers travaux présentés lors de la conférence IHM2017 (Perelman et al., 2017) portant sur l'exploration des gestes de stacking et l'étude expérimentale en lien avec la sélection d'une page de cellule,
- les travaux complémentaires présentés lors de la conférence IHM2018 (Perelman et al., 2018) portant sur l'utilisabilité des gestes de stacking pour la création d'un tableau croisé dynamique,
- la mise en situation du paradigme de stacking dans le contexte d'une activité concrète, celle d'élus d'agglomérations urbaines.

Dans cet article, nous présentons d'abord dans la section 2 un cas d'étude concret d'analyse ubiquitaire de données pour des élus municipaux. Après avoir présenté dans la section 3 l'état de l'art des solutions existantes pour surmonter les limitations des techniques d'interaction sur tablette, nous abordons en section 4 l'analyse de la faisabilité physique et technologique des techniques d'interaction basées sur le stacking. En section 5, nous présentons la conception et l'évaluation de techniques d'interaction reposant sur le stacking pour la sélection de données dans des tableurs sur tablette. À partir des résultats recueillis, nous abordons en section 6 la conception et l'évaluation de techniques basées sur le stacking pour créer des tableaux croisés dynamiques. Nous concluons l'article par une discussion de notre approche et des perspectives de recherche.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ la mise en contexte réel du besoin d'extension des capacités d'interaction actuelles pour l'analyse ubiquitaire de données ;
- ✓ l'analyse de la faisabilité physique et technologique de techniques d'interaction (TI) basées sur le stacking ;
- ✓ la conception et l'évaluation de TI basées sur le stacking pour la sélection de données dans des tableurs sur des tablettes : les résultats montrent que certaines de nos techniques exploitant le paradigme de stacking permettent de sélectionner une plage de cellules entre 15% et 20% plus rapidement qu'avec les interactions tactiles classiques des tableurs ;
- ✓ la conception et l'évaluation de TI basées sur le stacking afin de créer des tableaux croisés dynamiques résumant les données : les résultats montrent que certaines de nos techniques permettent de créer et de remplir un tableau croisé dynamique 23.1% plus rapidement qu'avec les interactions tactiles classiques des tableurs.

2 UN CAS D'ETUDE CONCRET : ANALYSE UBIQUITAIRE DE DONNEES POUR DES ELUS MUNICIPAUX

Dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Berger-Levrault développant des solutions logicielles pour l'administration publique et les autorités locales, nous avons mené une série d'interviews semi-guidées afin d'analyser les besoins de leurs utilisateurs finaux en termes de techniques d'interaction pour les contextes mobiles. En effet, les élus sont au contact d'une large gamme de produits (logiciels de gestion administrative, logiciels spécialisés - action sociale, enfance, marchés publics, métiers techniques) dont plusieurs sont particulièrement complexes dû à la quantité importante de réglementations (qui, de plus, évoluent régulièrement) et de services. L'étude du contexte de travail et des besoins a permis de mieux comprendre les problématiques sous-jacentes en termes d'interaction et de proposer des solutions pertinentes et adaptées. Les participants à cette étude ont été recrutés par l'intermédiaire de salariés de l'entreprise Berger-Levrault et par le biais du club MAGEL (association loi 1901) qui regroupe les collectivités utilisatrices des logiciels Berger-Levrault et dont l'objectif est de représenter et défendre les intérêts des collectivités publiques auprès de l'entreprise.

Nous nous sommes concentrés sur l'un de leurs principaux utilisateurs, à savoir les élus locaux (tels que les maires ou les responsables des autorités de district). Ces utilisateurs ont régulièrement besoin d'accéder aux données de la communauté (budget, démographie) en dehors de leur environnement de bureau (par exemple, les réunions du conseil). Pour répondre à ces situations, Berger-Levrault a développé, ou est en train de développer, des versions mobiles de la plupart de ses applications. Les élus disposant d'ores et déjà de nombreux dispositifs mobiles de types tablettes et smartphones, plus légers et moins encombrants que des ordinateurs portables, ils disposent alors de supports matériels et logiciels pour accéder aux données en-dehors de leur bureau et en contexte de mobilité, par exemple, en réunion, dans la rue ou dans leur véhicule. Comprendre les conditions de mises en œuvre de ces dispositifs est l'objet de notre analyse de terrain basée sur un entretien semi-guidé.

2.1 Protocole expérimental et principaux résultats

L'entretien semi-guidé s'est concentré sur l'environnement de travail et sur les tâches principales des élus. Pour préserver la forme d'une discussion libre, les questions ne servaient qu'à alimenter ou à recentrer la discussion. Ces entretiens ont été menés avec huit maires élus (tous des hommes). Leurs communes respectives sont composées de 563 à 466,297 habitants et de 14 à 69 membres élus. Les personnes interrogées connaissaient bien les ordinateurs de bureau et les appareils mobiles classiques (7,5 sur une échelle de 1 à 10). Tous utilisent des suites bureautiques (tableurs et programmes de présentation). La majorité utilise

des logiciels de messagerie (ex : Gmail) et des logiciels administratifs dédiés fournis par Berger-Levrault. L'interview durait en moyenne 66 minutes par participant.

De ces entretiens, il ressort notamment une diversité de tâches accomplies par les élus avec l'aide d'outils et supports informatiques. Nous les avons synthétisées en 4 groupes :

- La relation citoyen, qui consiste en l'écoute, l'enregistrement et la réponse aux différentes demandes des citoyens.
- La veille d'actualité et la communication, qui vise à découvrir et retransmettre des informations d'actualité, publier des articles rédigés par l'élu et animer une réflexion collective avec les citoyens sur des sujets de société à l'aide d'une plate-forme numérique de communication (de type forum de discussion) ou lors de rencontres citoyennes.
- La gestion des finances, qui correspond à la gestion du budget de la collectivité.

Ce dernier groupe de tâches est très nettement celui qui met en jeu le plus large espace d'informations à manipuler et donne lieu à des compte rendus approfondis, discutés et réguliers. Dans ce contexte, parmi toutes les tâches accomplies par les élus, beaucoup requièrent l'exploration et la manipulation de représentations graphiques de données à l'aide de graphiques (gestion budgétaire, analyse démographique, etc.). À cette fin, les représentants élus utilisent des logiciels tels que Microsoft Excel ou QlikView (Excel, 2018; QlikView, 2018) dans un environnement fixe. Bien que leur travail nécessite une analyse de données omniprésente, plusieurs élus ont signalé le manque d'outils appropriés et faciles à utiliser pour effectuer cette tâche sur des appareils mobiles : « Nous utilisons un tableau de bord pré-créé lors des réunions du conseil. Si les diagrammes prédéfinis ne suffisent pas, la réunion est levée afin que nous puissions en créer de nouveaux sur un ordinateur [de bureau] ». Comme cette exigence constituait le résultat le plus fréquent des entretiens, nous avons développé avec les participants un scénario d'utilisation dans lequel les élus devaient effectuer une analyse des données sur un appareil mobile et non pas seulement une présentation de données.

2.2 Un scénario d'usage représentatif d'une des activités des élus

Avant une réunion du conseil, Jessica, une élue, effectue une analyse des données du budget de la ville de l'année en cours, triées par districts (Fig. 1). Equipée uniquement de sa tablette professionnelle, la présentation de son analyse lors de la réunion du conseil suscite des questions de la part d'autres élus concernant l'augmentation des coûts. Pour répondre, elle doit effectuer une nouvelle analyse en séparant les types de coûts pour chaque district, par exemple le salaire des employés, le coût de la sous-traitance et le coût des matériaux.

Elle utilise un tableau croisé dynamique (Excel, 2018) pour produire rapidement un résumé d'analyse croisée à partir duquel une représentation graphique est rapidement générée. À cette fin, elle suit un processus en deux étapes : 1) sélectionner les données du tableur correspondant au budget de la ville ; 2) créer le tableau croisé dynamique en affectant la variable "district" aux lignes du tableau, la variable "types de coûts" aux colonnes du tableau et en définissant la fonction d'agrégation (par exemple, la fonction "moyenne", pour calculer la moyenne du coût du matériel pour chaque district). Bien que ce processus soit facile et rapide sur les interfaces de bureau, dans le contexte d'interfaces sur dispositifs mobiles, la sélection des données dans le tableur et la configuration du tableau croisé dynamique nécessitent plusieurs manipulations tactiles qui s'avèrent assez fastidieuses (voir la section 3 - État de l'art pour une description détaillée de ces lourdeurs).

Ce scénario sert de base à notre travail et illustre la nécessité d'un ensemble de techniques d'interaction facilitant l'utilisation des tableaux croisés dynamiques sur des tablettes. Au-delà du contexte des élus, de telles techniques d'interaction seraient également pertinentes dans de nombreux autres contextes tels que les rapports d'inspection des bâtiments, les réunions budgétaires, la gestion des employés, la gestion des ressources en cas de crise, etc. Notre approche consiste à employer un périphérique généralement disponible, le smartphone, en tant qu'interacteur pour faciliter l'interaction avec les tableurs sur

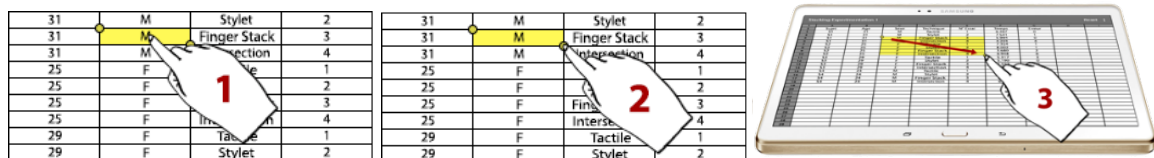
les tablettes. Nous avons conçu et comparé expérimentalement différentes techniques de stacking pour chacune des deux étapes de la création d'un tableau croisé dynamique : sélection de données (étude 1) et création d'un tableau croisé dynamique (étude 2) que nous présentons respectivement dans les sections 5 et 6.

3 ETAT DE L'ART

Dans cette section, nous résumons d'abord les limites de l'interaction tactile avec des tableurs sur des tablettes. Ensuite, nous passons en revue les approches existantes pour surmonter ces limitations en étendant les capacités d'interaction en entrée / sortie.

3.1 Tableurs sur tablette : approches tactiles actuelles

Fig. 2. : Pour sélectionner une plage de cellules avec l'interaction tactile, l'utilisateur 1) tape pour sélectionner une cellule, 2) tape sur l'ancre de cellule sélectionnée et 3) fait glisser le doigt pour élargir la plage.



Interagir avec les tableurs sur les tablettes repose généralement sur le mapping direct d'un geste tactile (swipe, pinch/spread, tap, double tap) sur une tâche spécifique (défilement, zoom, sélection d'une seule cellule, édition) (Elmqvist et al., 2013; Google Spreadsheet, 2017). Toute autre tâche nécessite une combinaison de ces gestes tactiles fondamentaux. Par exemple, pour sélectionner une plage de cellules 1), l'utilisateur tape pour sélectionner une cellule, 2) tape sur l'ancre de la cellule sélectionnée et 3) fait glisser le doigt pour élargir la plage (voir Fig. 2). L'utilisation de gestes tactiles pour une tâche aussi fréquente et commune est assez fastidieuse en raison de la longueur du processus et de la petite taille des ancres des cellules. Et pourtant, il est généralement suivi de tâches encore plus complexes (par exemple, filtrer, générer et configurer un graphique, calculer des sommes, etc.) : pour activer ces tâches, l'utilisateur utilise des raccourcis dans la barre d'outils ou une barre de menu dans la partie supérieure de l'écran qui ouvre un menu déroulant, ce qui rend l'interaction globale encore plus longue en termes de nombre d'actions.

La taille de l'écran mobile étant limitée, l'affichage d'icônes ou de menus pour les nombreuses commandes entraîne des occultations ; ne pas les afficher entraîne une longue navigation dans les multiples menus et commandes disponibles avant d'atteindre la fonctionnalité appropriée. Alors qu'une interaction à deux doigts pourrait permettre l'activation de raccourcis, de menus ou de modes, celle-ci est par défaut réservée à un geste de zoom ou de swipe. Pour résoudre ces problèmes, la section suivante présente les techniques d'interaction proposées pour étendre les capacités d'interaction classiques des appareils mobiles en entrée et en sortie.

3.2 Interaction multimodale pour tablette

Des gestes multitouch basés sur des accords (Banovic et al., 2011; Uddin et al., 2016; Wagner et al., 2014), des taps consécutifs (Heo et al., 2014; Heo et al., 2016) ou une interaction bimanuelle (Goguy et al., 2014) ont été explorés pour élargir le vocabulaire tactile des tablettes. L'utilisation de la parole en combinaison avec un dispositif tactile pour interroger un jeu de données (Srinivasan et al., 2018) étend également les possibilités de saisie. Les techniques d'interaction en l'air autour de l'appareil (Baudisch et al., 2010; Hasan et al., 2013) ont été prises en compte pour organiser les menus ou manipuler les données d'application (par exemple, manipuler un objet 3D). Avec ces approches, les capacités de sortie des

tablettes ne sont pas étendues et peuvent même être réduites afin de fournir un retour dédié permettant de mieux comprendre et mémoriser l'utilisation de ces modalités.

La combinaison de stylet et du toucher pour la manipulation de tableaux sur des tablettes a également été explorée pour améliorer l'accès à de multiples fonctionnalités (modification d'une cellule, copier / coller des données, navigation dans une feuille et mise en forme / couleur d'une cellule) (Pfeuffer et al., 2017), ainsi que pour créer des graphiques plus facilement grâce à la manipulation des tableaux croisés dynamiques (Jo et al., 2017). Néanmoins, ces deux approches nécessitent un stylet dédié (pour le différencier d'un doigt), et la visualisation en parallèle des données brutes et du rendu graphique reste limitée.

Des interfaces tangibles telles que MagGetz (Hwang et al., 2013) proposent de manipuler plusieurs interacteurs liés à des actions spécifiques telles que contrôler un curseur ou appuyer un bouton d'application. Une interaction tangible nécessite généralement des objets dédiés qui peuvent être moins pratiques dans un contexte mobile.

3.3 Interaction multi-écrans autour des tablettes

Par rapport aux approches précédentes, l'interaction multi-écrans présente l'avantage d'étendre à la fois l'entrée et la sortie. La combinaison de tablettes permet par exemple de distribuer des visualisations sur plusieurs appareils, tout en étendant les capacités de saisie grâce à l'utilisation des différents écrans tactiles qui peuvent être spatialement localisés (Langner et al., 2018; Wozniak et al., 2016). Une alternative moins lourde consiste à explorer comment tirer parti de la position et du mouvement du smartphone autour d'une tablette. Il a été utilisé par exemple dans Thaddeus (Wozniak et al., 2014) pour explorer une représentation graphique affichée sur la tablette ou dans BATMAN (Piazza et al., 2013) pour déclencher des actions (sélection du menu, activation de l'outil de dessin). Une solution proche de ces deux techniques consiste à utiliser un grand écran virtuel dont seule une partie est affichée sur le dispositif mobile, en fonction de sa position par rapport à cet écran virtuel ("peephole") (Rädle et al., 2014). Cependant, ces approches reposent sur des systèmes de détection externes pour suivre la position du smartphone autour de la tablette, ce qui limite l'utilisation de telles techniques en dehors des environnements de laboratoire.

Des chercheurs ont également exploré l'utilisation d'une montre intelligente pour étendre le vocabulaire tactile (Chen et al., 2014). Cependant, ses avantages sont contrebalancés par la taille de l'écran, ce qui limite son rôle à celui d'appareil complémentaire (Horak et al., 2018), principalement utilisé pour fournir des retours ou des raccourcis de commandes.

3.4 Stacking de multiples écrans

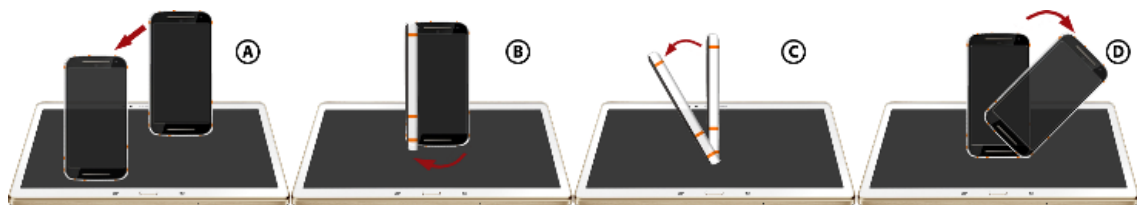
Le stacking de multiples écrans, c'est-à-dire lorsqu'un écran (appelé support) détecte la présence d'un autre écran (appelé interacteur), offre l'avantage de ne nécessiter aucun capteur externe. Par exemple, dans THAW (Leigh et al., 2015), l'écran de l'ordinateur affiche un motif spécifique pouvant être détecté par l'écran du smartphone. Ce modèle permet au smartphone de suivre sa position par rapport à l'écran de l'ordinateur. Une centrale inertielle intégrée est utilisée pour détecter son orientation. En conséquence, le smartphone peut être utilisé comme (Bier et al., 1993) "lentille magique" ou directement comme objet tangible dans l'application. Dans Phonetouch ((Schmidt et al., 2010; Schmidt et al., 2012), le contact avec un smartphone est détecté par une table tactile en utilisant une combinaison de capteurs (accéléromètres de smartphone et interaction tactile sur le plateau). Dans ce cas, le smartphone est utilisé pour transférer des données entre le smartphone et la tablette, pour afficher des commentaires privés ou comme outil d'interaction tangible. Dans ACTUI (Li et al., 2015), le smartphone est équipé d'une coque en cuivre (avec un motif spécifique sur le bord). L'écran de la tablette peut alors détecter et suivre la position et l'orientation du smartphone. Dans ce cas, le smartphone est utilisé pour explorer la troisième dimension d'un modèle 2D affiché sur l'écran de la tablette. Notre approche repose sur une solution de suivi reposant sur ce principe.

Ces travaux apportent des solutions technologiques concrètes pour faciliter la détection des gestes de stacking. Ils proposent également des scénarios d'utilisation spécifiques en exploitant les propriétés du stacking en termes de 1) ajout d'un écran supplémentaire et 2) extension du vocabulaire d'interaction. Dans cet article, nous explorons de manière plus systématique l'espace de conception des gestes de stacking. Nous proposons et évaluons également un nouvel ensemble de techniques de stacking pour l'analyse de données de tableurs sur tablette.

4 GESTES DE STACKING : CONFORT ET FAISABILITE TECHNIQUE

Dans une première étape de notre travail sur l'utilisation du stacking pour faciliter l'analyse des données sur des tablettes, nous avons mené une étude exploratoire des gestes de stacking. Nous avons d'abord identifié les dimensions des gestes de stacking, puis mené une expérimentation visant à éliminer les gestes inconfortables. Sur la base de cette analyse, nous avons développé un prototype fonctionnel permettant d'implémenter de manière robuste des techniques d'interaction basées sur le stacking.

Fig. 3. Gestes de stacking possibles : A) translation, B) rotation à plat, C) inclinaison, et D) rotation en coin



4.1 Dimensions des gestes de stacking

Dans notre contexte, le stacking consiste à mettre un smartphone en contact avec un écran de tablette qui le détecte. Ce smartphone constitue un interacteur pour faciliter l'interaction avec les tableurs sur les tablettes. Trois aspects majeurs caractérisent les gestes de stacking : les surfaces empilées, la prise en main et le type de gestes :

- Surface empilée : correspond au bord ou au coin du smartphone détecté par la tablette. Bien que les faces avant et arrière du smartphone puissent également être empilées, elles obstrueraient une partie importante de l'écran de la tablette.
- Prise en main : décrit quelle main tient le smartphone. L'utilisateur se sert de cet interacteur pour établir un contact avec la tablette puis éventuellement pour déclencher une commande ou observer un résultat sur le Smartphone. Compte tenu de ce contexte et de notre scénario d'utilisation (voir section 2.2), l'utilisateur doit donc tenir le smartphone avec la main dominante, sous la forme d'un interacteur tactile et tangible, tandis que la tablette repose sur une table. Les gestes tactiles sur les écrans de la tablette et du smartphone peuvent être effectués avec la main non dominante. Nous excluons de notre étude une utilisation du stacking en situation mobile ou debout. Nous traiterons ce cas dans des travaux futurs.
- Type de gestes : définit les gestes possibles pour l'utilisateur. Avec le smartphone, l'utilisateur peut faire des gestes de "stack" (c.-à-d. Poser un bord / un coin de smartphone sur l'écran de la tablette) et de "unstack" (c.-à-d. Soulever le smartphone). Une fois le geste de stack réalisé, quatre manipulations physiques sont possibles (voir figure 3) : translation du smartphone sur l'écran de la tablette (A) ; rotation à plat du smartphone sur l'écran de la tablette (B) ; inclinaison du smartphone autour du bord ou de la surface empilée, de sorte que le smartphone reste en contact avec l'écran de la tablette (C) ; et rotation en coin du smartphone (D). Enfin, les gestes tactiles (toucher, glisser ou pincer / étaler) peuvent être utilisés sur les deux appareils. En conséquence, une fois le geste de

stack réalisé, l'utilisateur peut effectuer une série de gestes tactiles, physiques ou composés (c'est-à-dire physiques puis tactiles).

4.2 Etude préliminaire : analyse du confort des gestes de stacking

L'utilisation de techniques d'interaction utilisant le stacking nécessite que l'utilisateur tienne un smartphone et le déplace sur l'écran de la tablette. Comme cela peut sembler contre nature à l'origine, nous avons décidé d'évaluer le confort du stacking par le biais d'une étude préliminaire et d'éliminer les plus inconfortables.

Les participants devaient, en premier lieu, réaliser le geste de stack du smartphone sur l'écran de la tablette. Plusieurs orientations initiales pour le stack ont été testées (smartphone en mode portrait et paysage ; 4 orientations à plat pour les deux configurations - cf. Fig. 3-B). Ensuite, les participants devaient réaliser :

- (1) une des quatre manipulations physiques du smartphone (translation, rotation à plat, inclinaison, rotation de coin – Fig. 3),
- (2) un geste tactile sur l'écran du smartphone (tap, drag, pinch, spread) ou
- (3) un geste composé nécessitant une inclinaison du smartphone, puis un geste tactile sur son écran. Nous avons limité notre exploration des gestes composés à ceux basés sur une inclinaison suivie d'un geste tactile sur l'écran du smartphone. En effet, les gestes étant réalisés de manière séquentielle, réaliser un geste tactile après une translation, une rotation à plat ou une rotation de coin, revient à réaliser ce geste tactile suite à un stack initial dans une autre position/orientation (toutes deux testées via les étapes précédentes du protocole). En revanche, l'inclinaison pouvant rendre l'écran partiellement inaccessible et n'étant pas intégrée dans le stack initial, nous avons choisi de l'évaluer dans notre protocole. D'autre part, deux gestes tactiles peuvent être réalisés consécutivement sans qu'aucun n'impacte la réalisation de l'autre. Nous n'avons donc pas exploré les gestes composés qui en découlent.

Nous avons utilisé une tablette Samsung Galaxy Tab S de 10,5 pouces et un smartphone Galaxy S4 de 5 pouces, les deux appareils étant éteints. Six participants (âge = 26,4 ans, SD = 1,67, 2 femmes) ont pris part à cette pré-expérimentation. Ils étaient tous droitiers et familiarisés avec les dispositifs mobiles (6.9 en moyenne sur une échelle allant de 0 à 9). Les participants ont évalué le confort de chaque geste en utilisant une échelle de Likert à 5 points. Les gestes tactiles sur le smartphone ont été effectués de deux manières différentes : avec les doigts de la main tenant le smartphone ou avec les doigts de l'autre main (bimanuellement). Nous n'avons pas étudié les gestes tactiles sur la tablette puisqu'ils sont indépendants du geste de stacking.

En ce qui concerne tous les gestes tactiles (unimanuel et bimanuel), les "tap" et les "drag" ont été en grande partie considérés comme étant confortables (95,83% et 87,5% respectivement notés 3 ou plus). Les pinch / spread ont été jugés inconfortables dans l'ensemble (notés 1 ou 2), en particulier lorsqu'ils ont été effectués à une main (dans 47,9% des essais). En ce qui concerne les gestes physiques, le geste de translation a été jugé confortable (noté 3 ou plus) dans 87,8% des essais. Tous les autres gestes physiques ont révélé un certain inconfort. En effet, la rotation s'est avérée inconfortable (notée 1 ou 2 dans 37,5% des essais) dans certaines orientations. Le fait de basculer dans un coin était jugé inconfortable dans 29,2% des essais. Les gestes composés étaient quant à eux considérés inconfortables (notés 1 ou 2) dans 38,9% des essais, en particulier lorsqu'un pinch ou un spread était requis (notés 1 ou 2 dans 69,8% de ces essais).

Sur la base de ces résultats, nous avons décidé d'utiliser uniquement les gestes de translation et les gestes tactiles (unimanuel et bimanuel) considérés comme étant confortables. Les résultats ont également révélé que le smartphone devait être en mode portrait : cela signifie que seuls les gestes de stacking reposant sur la mise en contact du bord inférieur du smartphone avec la tablette étaient confortables.

4.3 Implémentation d'un prototype robuste

Pour mettre en œuvre ces gestes de translation, nous avons besoin d'un prototype capable de détecter la position du bord inférieur du smartphone, son orientation et sa translation sur l'écran de la tablette. Pour créer ce prototype, nous avons reproduit le principe utilisé dans CapStones et Cap-TUI (Blagojevic et al., 2013; Chan et al., 2012). Nous avons imprimé en 3D un boîtier de smartphone et recouvert son dos d'une feuille de cuivre (0,1 mm d'épaisseur), traversée de trois bandes de cuivre sur chaque bord de l'appareil (Fig. 4 - à gauche). La tablette détecte ces trois bandes (largeur de 5 à 6 mm) sous forme de trois événements tactiles simultanés et génère un événement stack. Nous avons choisi trois bandes pour détecter l'orientation du smartphone sur l'écran de la tablette car il n'existait pas de geste tactile commun nécessitant trois points tactiles alignés et simultanés : notre implémentation du stacking n'empêche donc pas les interactions tactiles classiques. En contrôlant la distance relative entre ces bandes, nous pouvons créer un motif unique pour chaque bord du smartphone, à l'image du dispositif Conté (Vogel et al., 2011). Ainsi, la tablette peut identifier le bord du smartphone réellement mis en contact et ainsi gérer 4 comportements ou modes distincts dans les interactions basées sur le stacking. Comme dans TouchTokens (Gonzalez et al., 2016), nous avons développé un algorithme de détection des trois points tactiles, leur écartement et orientation, mais pour un cas particulier dans lequel les trois marqueurs sont alignés. Par rapport à ACTUI (Li et al., 2015), CapStone (Chan et al., 2012) et Cap-TUI (Blagojevic et al., 2013) plusieurs patterns sont associés à un même smartphone de façon à identifier chaque arrête indépendamment. Enfin, par rapport à CapStones, les bandes de contact de notre prototype sont de taille largement inférieure (5 à 6 mm contre 8 à 9 mm). Nous avons également conçu une version métallique du boîtier avec les mêmes motifs de chaque côté (Fig. 4 – à droite).

Pour détecter ce modèle, nous avons implémenté un algorithme en Java sur la plateforme Android. Nous utilisons la distance et l'alignement spécifiques des trois bandes de cuivre détectées pour identifier le bord associé. Notre algorithme détecte la mise en contact du smartphone dès que les bandes de cuivre sont détectées sur l'écran de la tablette. Notre algorithme gère également les situations où le smartphone est partiellement hors de l'écran de la tablette : dans ces cas, nous estimons la position des points extérieurs à l'aide de la distance connue qui les sépare.

Fig. 4. : Deux versions de la coque conductive : une version imprimée en 3D avec des bandes de cuivre (à gauche) et une version métallique prête pour le marché avec des bandes déjà intégrées sur les bords (à droite). Celles-ci ont été conçues et réalisées en collaboration avec le collège technique Renée Bonnet à Ramonville (31).



5 ETUDE 1 : SELECTION D'UNE PLAGES DE CELLULES

La sélection des plages de cellules est une tâche fondamentale pour l'analyse des données, car elle est nécessaire pour créer un tableau croisé dynamique et constitue un prérequis pour la plupart des autres commandes offertes par un tableur. Une sélection de plage de cellules définit les données auxquelles une commande ou une fonction s'applique.

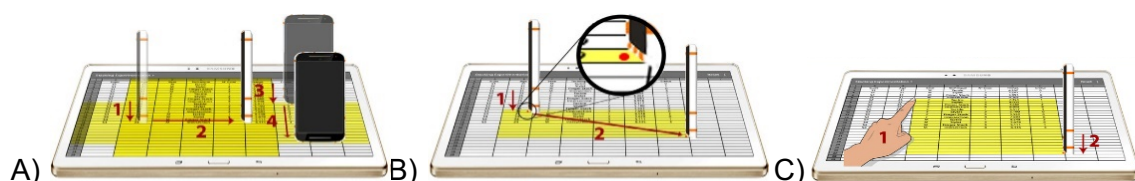
5.1 Conception de techniques d'interaction basées sur le stacking pour la sélection d'une plage de cellules

La sélection d'une plage de cellules nécessite deux actions : sélectionner le début et la fin de la plage de cellules. Sur la base d'un processus centré sur l'utilisateur, nous avons conçu trois techniques de stacking pour sélectionner une plage de cellules, illustrant la combinaison de deux considérations de conception : le nombre de mains impliquées (une ou deux mains) et le nombre de gestes de stacking (un ou deux gestes) :

- "Intersection" combine deux gestes de stacking successifs avec la main dominante. Pour sélectionner une plage de cellules en utilisant la technique Intersection (Fig. 5 - A), l'utilisateur sélectionne simplement une plage de lignes, puis une plage de colonnes : l'intersection entre l'ensemble des lignes sélectionnées et des colonnes définit la plage de cellules sélectionnée. Ces deux étapes sont indépendantes et peuvent être effectuées dans n'importe quel ordre. Pour sélectionner des colonnes ou des lignes, l'utilisateur réalise d'abord un geste de stack avec le smartphone avec une orientation verticale ($90^\circ \pm 25^\circ$) ou une orientation horizontale ($0^\circ \pm 25^\circ$, Fig. 5- A). Dans les deux cas, la translation du smartphone étend la plage de lignes / colonnes sélectionnée. Pour modifier une sélection de colonne / ligne, l'utilisateur peut réaliser de nouveau un geste de stack sur la première ou la dernière colonne / ligne sélectionnée et translater le smartphone pour ajuster le bord de la sélection.
- "Stack-and-Drag" utilise un seul geste de stacking et uniquement la main dominante. Il est basé sur une métaphore de stylet : lors du stacking d'un smartphone, le centre de l'arrête en contact avec la tablette fait office de pointeur sur la tablette. Ce pointeur est représenté par un point rouge affiché sur l'écran de la tablette à 1 cm devant le smartphone (au milieu du bord) pour éviter les problèmes d'occultation (Fig. 5 - B). Pour sélectionner la plage de cellules, l'utilisateur empile le smartphone sur l'écran de la tablette. La translation du smartphone étend la sélection de la plage de cellules actuelle (Fig. 5 - B). Pour ajuster la sélection, l'utilisateur peut de nouveau réaliser un geste de stack avec le smartphone sur la cellule supérieure gauche ou inférieure droite et le translater.
- "Finger Stack" combine un toucher du doigt avec la main non dominante et un geste de stack avec la main dominante. Finger-Stack consiste à définir le coin supérieur gauche de la plage de cellules avec le doigt et le coin inférieur droit avec un geste de stack du smartphones (Fig. 5 - C). Le coin inférieur droit est sélectionné à l'aide du centre de l'arrête du smartphone, associé à un retour d'informations identique à celui utilisé dans la technique Stack-and-Drag. La sélection des deux coins peut être ajustée avec un glisser-déposer du doigt et / ou un geste de translation du smartphone. Pour modifier la sélection, le doigt ou un geste de stack peuvent être respectivement appliqués sur le coin supérieur gauche ou inférieur droit, et ainsi faire glisser le coin sélectionné.

Une quatrième technique basée sur l'utilisation de deux mains et de deux gestes de stacking générerait plus de deux actions, ce qui n'est pas nécessaire ici. Pour les trois techniques proposées, si la plage de cellules souhaitée dépasse les limites de l'écran, il est possible de faire glisser le smartphone près du bord de l'écran de la tablette pour déclencher un défilement automatique des colonnes. Le centre de l'arrête du Smartphone en contact avec la tablette est utilisé pour déclencher le mécanisme de défilement.

Fig. 5. Techniques de sélection Intersection (A), Stack-and-Drag (B) et Finger-Stack (C).



Chacune des trois techniques offre des avantages différents pour la sélection d'une plage de cellules. Intersection est basée sur deux gestes simples qui ne nécessitent pas de pointage précis sur une simple cellule, généralement de petite taille. Stack-and-Drag est similaire à une sélection basée sur la souris dans des tableurs de bureau, mais évite le besoin de sélectionner avec précision la petite ancre au coin d'une cellule sélectionnée. Finger-Stack offre l'avantage

d'une sélection directe (un simple touch et un geste de stacking) sans aucune translation du smartphone. Nous avons décidé de concilier ces avantages dans le cadre d'une étude contrôlée et de les comparer à une interaction purement tactile.

Nous n'avons trouvé aucune application de tableur pour dispositif mobile fournissant l'API et les outils logiciels requis pour intégrer des techniques d'interaction personnalisées, dont notamment nos techniques basées sur le stacking. Par conséquent, nous avons développé une nouvelle application de tableur parfaitement conforme à l'application Google Spreadsheet (Google Spreadsheet, 2017) en termes de disposition d'interface, d'interaction tactile et de taille de cellule (284x53px). Nous avons également intégré nos trois techniques d'interaction et de détection de gestes de stacking.

Dans cette étude, nous comparons les performances des trois techniques basées sur le stacking à une technique de base, l'interaction tactile, pour une tâche de sélection de plage de cellules.

5.2 Protocole expérimental

5.2.1 Tâche

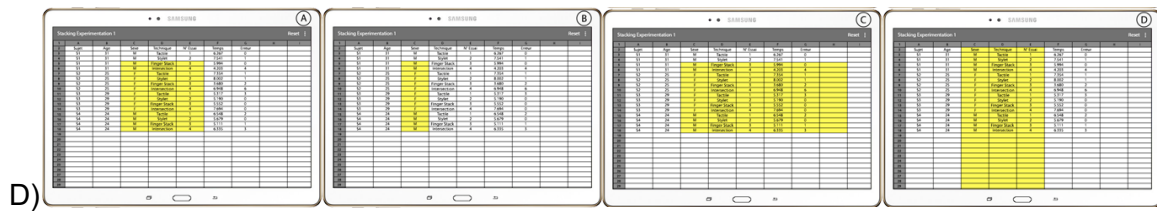
Les participants ont été invités à sélectionner le plus rapidement possible différentes plages de cellules avec chacune des quatre techniques d'interaction proposées. Pour limiter les biais expérimentaux, nous avons désactivé les actions de défilement et de zoom car elles auraient pu affecter la stratégie de sélection de la plage de cellules avec toutes les techniques. L'action de défilement était toutefois bien disponible lors de la phase de sélection.

Pour représenter la diversité des plages de cellules, nous avons considéré sept catégories : lignes complètes, colonnes complètes, 1xM (une colonne, M lignes), Nx1 (N colonnes, une ligne) et 3 formes de NxM (carré visuel, rectangle horizontal et vertical) - cf. Fig. 6-D. Les valeurs pour N étaient 1, 2, 4 ou 9 colonnes et 1, 7, 13 ou 33 lignes pour M. Ces valeurs ont été choisies en fonction de la différence entre la hauteur et la largeur des cellules. L'origine de la plage de cellules était toujours la cellule D6. Nous avons évalué deux conditions pour chaque plage : une où la plage était totalement dans l'écran (c'est-à-dire qu'aucun défilement n'était requis) et l'autre où la plage dépassait les limites de l'écran (c'est-à-dire, un défilement requis).

Chaque essai correspondait à la sélection d'une plage de cellules et se décomposait comme suit. Un premier panneau, affiché sur l'écran de la tablette, montrait les informations de la plage à sélectionner dans plusieurs formats (texte, en-têtes de cellules et image schématique Fig. 6 - A). Une fois prêt, l'utilisateur appuyait avec son doigt sur un bouton de la tablette pour lancer l'essai et afficher la feuille de calcul du tableur. Les en-têtes associés à la plage de cellules ciblée étaient de couleur rouge. Après la sélection des cellules, pour les cellules sélectionnées dans la plage ciblée, les en-têtes devenaient verts. Sinon, elles étaient colorées en jaune (Fig. 6 - B), soulignant ainsi une sélection incorrecte. Une fois la plage cible correctement sélectionnée, une validation automatique de l'essai était déclenchée après 500 ms.

Fig. 6. Écran principal de l'application (A), sélection incorrecte (B), sélection correcte (C) et différentes formes de plages de cellules sélectionnées (D : de gauche à droite : NxN, 1xM, NxM rectangle horizontal, NxM rectangle vertical).





5.2.2 Design expérimental

Notre étude a suivi un design intra-sujets de type $4 * 7 * 2$ avec comme facteurs la technique d'interaction (Tactile, Intersection, Stack-and-Drag and Finger-Stack), la plage de cellules (les sept types décrits précédemment) et le défilement (avec ou sans). L'étude a été divisée en quatre blocs, chaque bloc correspondant à une technique d'interaction (TI). L'ordre des blocs a été contrebalancé entre les participants au moyen d'un carré latin 4×4 .

Pour chaque bloc, les participants devaient effectuer 14 essais d'entraînement (dont la moitié avec défilement), puis 42 sélections de plages (14 conditions x 3 répétitions), avec randomisation de l'ordre des essais. Les participants pouvaient faire une pause entre chaque essai et chaque bloc.

Nous avons analysé un total de 4 techniques d'interaction x 42 plage de cellules (7 formes x 2 conditions de défilement x 3 répétitions) x 12 participants = 2016 sélections.

5.2.3 Equipement, participants et données collectées

Nous avons utilisé un Samsung Galaxy Tab S (Android 5.1, octa-core 1.9Ghz et 1.3Ghz) avec un écran 10.5" (2560x1600px), et un Samsung Galaxy S4 (Android 5.1, quad-core 1.9Ghz) avec un écran 5" (1920x1080px). Le smartphone était équipé de notre coque conductive et la tablette était dotée d'un écran de protection en plastique. Notre tableur a été installé sur la tablette. L'utilisateur était assis, tenant le smartphone de sa main dominante et la tablette posée sur la table devant lui.

Nous avons recruté 12 participants (5 femmes) âgés de 27,7 ans en moyenne (écart-type = 4,7). Six d'entre eux avaient participé à l'étude préliminaire. Ils étaient tous droitiers et connaissaient bien les appareils mobiles (7,5 sur une échelle de 0 à 9) et les tableurs en environnement de bureau (7,0). Un seul sujet était familier avec les tableurs sur tablettes (7,0, contre 2,1 pour les autres). L'expérience a duré une heure en moyenne.

Nous avons mesuré le temps nécessaire pour effectuer chaque essai, de la pression du bouton à la validation automatique. À la fin de chaque bloc, nous avons demandé aux participants de remplir un questionnaire d'utilisabilité SUS (Brooke, 1996) et nous avons recueilli des réactions informelles. Les participants ont également été invités à évaluer (aimer / ne pas aimer) les techniques d'interaction sur une échelle de Likert sur 7 points.

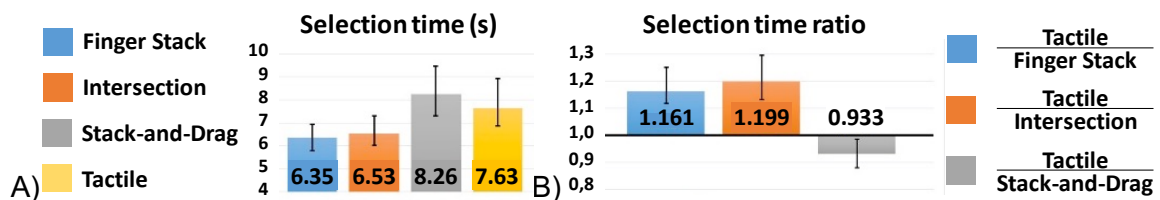
5.3 Résultats

Nous avons choisi de nous appuyer sur des techniques d'estimation avec des intervalles de confiance à 95% (IC) et une analyse du ratio, comme le recommande l'APA (VanDenBos, 2009). Le ratio est une mesure intra-sujet qui exprime la taille de l'effet (comparaison par paires) et est calculée entre chacune des moyennes géométriques. Tous les IC sont des "95% BCa bootstrap confidence interval". Pour le lecteur plus habitué à interpréter les valeurs de p, un parallèle peut être établi avec les résultats obtenus grâce à la technique d'estimation et aux rapports d'IC (voir la Fig. 3 dans (Krzywinski et al., 2013)). Les scripts utilisés pour calculer la moyenne géométrique et les IC ont été utilisés dans (Willett et al., 2015) et sont disponibles en ligne (INRIA web site).

5.3.1 Temps de sélection

Les résultats sur le temps de sélection montrent une nette différence entre les quatre techniques d'interaction. En effet, Finger-Stack et Intersection ont nécessité nettement moins de temps (resp. 6.35s, IC [5.79, 6.93] et 6.54s, IC [6.02, 7.3]) que Tactile (7.64s IC [6.87, 8.94]) et Stack-and-Translate (8.27s, IC [7.3, 9.46]) (Fig. 7 - A). L'analyse intra-sujet basée sur le rapport de temps (Fig. 7 - B) confirme cette constatation et établit que les essais avec Tactile ont pris 19,9% de temps de plus qu'avec Finger-Stack (ratio = 1.119 et aucune intersection de l'intervalle de confiance 95% avec la valeur 1,0) et 16,1% plus de temps qu'avec Intersection (ratio = 1.161, pas d'intersection avec 1,0).

Fig. 7. Temps de sélection moyen en s (A) et rapport (B) en ce qui concerne Tactile (IC à 95%).



Ce résultat est valable pour les différentes catégories de plages de cellules individuellement.

Lors de l'analyse de l'impact du facteur de défilement (catégories de plages de cellules impliquant $N = 9$ et / ou $M = 33$), les résultats montrent que, lorsque le défilement est nécessaire, les essais prennent en moyenne 64% d'IC [58.8, 69.5] plus de temps pour chaque technique, sans différence entre les techniques. Ainsi, notre mécanisme de défilement n'a pas eu d'impact négatif sur le temps d'exécution.

5.3.2 Facilité d'utilisation et préférence de l'utilisateur

L'analyse des questionnaires SUS établit clairement un meilleur score d'utilisabilité pour les techniques Tactiles et Intersection (respectivement 85.8, IC [78.3, 91.3] et 82.1, IC [73.5, 87.3]) que pour Finger-Stack (68.3, IC [58.1, 76.9]) et Stack-and-Drag (52.7, IC [36.7, 63.1]). L'évaluation générale des techniques confirme ces résultats avec 11 participants sur 12 qui ont aimé (5 et plus sur une échelle de Likert sur 7 points) Tactile, 10 qui ont aimé Intersection, 8 Finger Stack et 5 Stack-and-Drag.

Les commentaires informels rapportés par les participants vont dans le sens de ces analyses. En effet, l'interaction tactile a été décrite comme suit : «Intuitif, cohérent avec les gestes tactiles classiques» (8/12). Cependant, les utilisateurs ont trouvé qu'il était «difficile de viser la bonne cellule» (10/12). La technique Intersection a été qualifiée de «Simple à utiliser car les dimensions sont clairement séparées» (9/12). La technique Finger-Stack a quant à elle été décrite comme "pratique parce que la sélection est presque immédiate" (12/12). Enfin la technique Stack-and-Translate est considérée comme "difficile à manipuler car il est difficile de viser la bonne cellule avec le point rouge [pointeur du smartphone]" (9 / 12).

5.3.3 Conclusion

Les résultats montrent que l'interaction tactile prend en moyenne 19,9% de plus que Finger-Stack et 16,1% de plus que Intersection pour sélectionner correctement une plage de données. Ces résultats restent valables lorsqu'un défilement (scroll) est requis. En termes de facilité d'utilisation, la technique Intersection obtient un score SUS similaire à celui obtenu pour la technique de base Tactile, qui utilise uniquement l'interaction tactile, score qui s'avère plus élevé que pour les autres techniques. En outre, les participants ont émis des commentaires très enthousiastes sur la technique Intersection.

Compte tenu de ces résultats, nous ne considérons que les techniques Intersection et Tactiles (comme base) dans la suite de notre travail sur les techniques d'interaction basées stacking pour la création et la manipulation de tableaux croisés dynamiques.

6 ETUDE 2 : CREATION D'UN TABLEAU CROISE DYNAMIQUE

Après avoir validé l'étape initiale et nécessaire de sélection d'une plage de cellules, nous nous concentrons sur les actions restantes nécessaires pour créer et manipuler un tableau croisé dynamique afin de prendre en charge l'analyse ubiquitaire de données. Dans Excel, sur une tablette Microsoft Surface, après avoir sélectionné les données souhaitées (étape 1) et appuyé sur le menu / sous-menu de droite pour insérer le tableau croisé dynamique, l'application active un assistant. L'assistant est affiché à droite de l'écran, sur un onglet secondaire ou sur l'onglet contenant les données. L'assistant se compose d'une case contenant les en-têtes des lignes sélectionnées et de quatre autres cases, représentant les quatre composants d'un tableau croisé dynamique (Ligne, Colonne, Valeur et Filtre (Microsoft, 2019) - voir Fig. 8-C). Chaque en-tête de colonne peut ensuite être glissé et déposé (étape 2) sur l'une des quatre cases de l'assistant. Toucher l'un des éléments placés dans la case Valeur permet de modifier la fonction d'agrégation à l'aide d'une fenêtre contextuelle. Pour filtrer les éléments, un contact sur le tableau croisé dynamique ouvre une fenêtre contextuelle spécifique. Pour améliorer l'interaction avec le tableau croisé dynamique sur les tablettes, nous avons conçu un ensemble de techniques d'interaction basées sur le stacking.

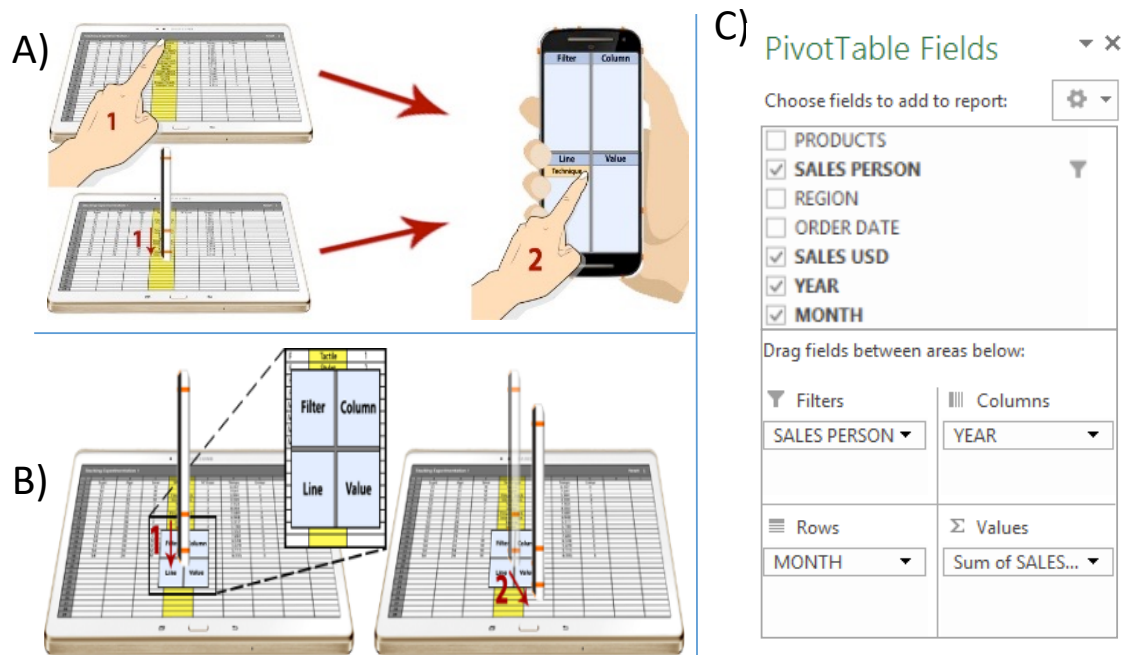
6.1 Conception de techniques d'interaction basées sur le stacking pour les tableaux croisés dynamiques

Nous avons adopté un processus centré utilisateur pour concevoir trois techniques d'interaction différentes, basées sur le stacking et permettant de contrôler la création et l'édition de tableaux croisés dynamiques. Ces trois conceptions diffèrent en termes de type de manipulation :

- "Dual-Screen Touch", repose uniquement sur l'utilisation de l'interaction tactile sur la tablette et le smartphone. Avec cette technique, un premier contact sur un en-tête de colonne affiché sur la tablette sélectionne la colonne. L'utilisateur peut ensuite insérer ces données dans l'assistant en touchant la case appropriée de l'assistant sur le smartphone (Fig. 8 - A-Top). Les données peuvent ensuite être glissées et déposées entre les différentes cases de l'assistant. Un contact sur les éléments placés dans une des cases de l'assistant permet de filtrer et de modifier la fonction de résumé. Un appui long sur un élément le retire de la case.
- "Stack-and-Touch" combine l'interaction tactile sur l'écran du smartphone avec un geste de stacking sur la tablette. Cette technique consiste à effectuer un geste de stack du smartphone sur la colonne souhaitée pour la sélectionner (comme dans la technique Intersection). Après avoir sélectionné la colonne, l'interaction est la même que pour la technique tactile à double écran, c'est-à-dire, toucher les cases cibles de l'assistant sur le smartphone (Fig. 8 - Partie inférieure).
- "Stack-and-Translate" est basé sur l'usage du stacking uniquement. Lors d'un geste de stack du smartphone sur la colonne souhaitée, colonne affichée sur la tablette, l'assistant est répliqué temporairement sur l'écran de la tablette (en plus de l'écran du smartphone) directement sous la position de stacking (Fig. 8 - B). Pour insérer une colonne de données dans l'assistant, l'utilisateur translate alors le smartphone en direction de la case de l'assistant souhaitée. Ensuite, l'assistant affiché sur l'écran de la tablette disparaît pour éviter les occultations.

Le smartphone affiche toujours l'assistant de tableau croisé dynamique, tandis que la tablette affiche les cellules de données. La sélection initiale de la plage de cellules (étape 1) est effectuée à l'aide de la technique Intersection avec le smartphone dans la main dominante (meilleure technique de l'étude 1).

Fig. 8. Sélection de cellules (étape 1) et affectation de celles-ci à une case de l'assistant de tableau croisé dynamique (étape 2) avec la technique Dual-Screen Touche (A-haut), Stack-and-Touch (A-bas), Stack-and-Translate (B). L'assistant de tableau croisé dynamique affiché est similaire à celui utilisé dans Excel sur la MS-Surface (C).



Nous avons modifié notre application de tableur fonctionnant sur la tablette tactile pour intégrer un assistant de tableau croisé dynamique affiché sur l'écran de la tablette (pour la technique de base) : notre application est strictement conforme à l'application Excel sur une Microsoft Surface (interaction tactile, structure et taille). En outre, nous avons étendu notre application pour que la partie inférieure du même assistant de tableau croisé dynamique puisse être affichée sur l'écran du smartphone (pour les techniques de stacking) et nous avons intégré nos trois techniques d'interaction.

Pour évaluer les performances de nos techniques d'interaction support à la création d'un tableau croisé dynamique, nous les avons comparées à l'interaction tactile normale.

6.2 Protocole expérimental

6.2.1 Tâche

La tâche expérimentale comportait deux étapes consécutives : la sélection d'une plage de cellules, puis la création d'un tableau croisé dynamique, toutes deux réalisées avec la même technique d'interaction (tactile ou basée stacking). Étant donné que les résultats de la première expérience étaient similaires pour les différentes catégories de plages de cellules, les participants devaient tout d'abord sélectionner une seule forme de plage de cellules composée de 50 lignes x 12 colonnes. Les mêmes instructions que dans la première étude ont été fournies au cours de cette étape. Une validation automatique s'est produite une fois que la plage de cellules appropriée était sélectionnée.

Après la sélection, les participants devaient ouvrir l'assistant de tableau croisé dynamique à l'aide d'un bouton de la barre de menus situé dans le coin supérieur gauche de la tablette pour la technique Tactile et sur le smartphone pour les techniques basées sur le stacking. Ensuite, ils devaient remplir les cases de l'assistant de tableau croisé dynamique conformément aux instructions données. Chaque essai consistait à remplir une case (la case Valeur), deux cases (les cases Valeur et Ligne), trois cases (les cases Valeur, Ligne et Colonne) ou quatre cases (les cases Valeur, Ligne, Colonne et Filtre, comme illustré dans la Figure 8-C) de l'assistant avec un seul élément chacune. Dans certains essais, les participants devaient également modifier la fonction d'agrégation (somme, nombre, moyenne).

Les participants ont été invités à accomplir la tâche aussi rapidement et avec autant de précision que possible. Les instructions de tâches étaient affichées sur l'écran de la tablette

avant chaque essai et sur un écran d'ordinateur secondaire pendant l'essai. Les instructions consistaient en un assistant de tableau croisé dynamique déjà rempli avec les éléments requis (cf. par exemple, Fig 8-C) et configuré avec une fonction d'agrégation spécifique. Un bouton tactile permettait à l'utilisateur de démarrer l'essai. Une fois l'assistant correctement rempli, une validation automatique était déclenchée après 500 ms.

Nous avons utilisé le même jeu de données que dans (Jo et al., 2017), consistant en un ensemble d'attributs de film (par exemple : genre, classement, budget, total brut et classement). Nous avons coupé le jeu de données à 200 lignes et 12 colonnes comme dans (Jo et al., 2017).

6.2.2 Design expérimental

Notre étude a suivi un design intra-sujets $4 * 4 * 2$ avec les techniques d'interaction (Tactile, Dual-Screen Touch, Stack-and-Touch, Stack-and-Translate), nombre de cases de l'assistant à modifier (un, deux, trois ou quatre) et fonction d'agrégation (oui ou non) comme facteurs. L'étude a été divisée en 4 blocs, chaque bloc correspondant à une technique. L'ordre des blocs a été contrebalancé entre les participants au moyen d'un carré latin 4×4 .

Pour chaque bloc, les participants pouvaient effectuer des essais d'entraînement jusqu'à ce qu'ils se sentent prêts. Ils ont ensuite effectué 24 créations de tableaux croisés dynamiques (8 conditions effectuées 3 fois), avec randomisation des essais. Les participants pouvaient faire une pause entre chaque essai et chaque bloc. Au total, nous avons collecté 4 techniques x 8 configurations x 3 répétitions x 12 participants = 1152 essais.

6.2.3 Equipement, participants et données collectées

Nous avons utilisé la même tablette et le même smartphone que dans l'étude précédente. Nous avons mis à niveau les deux appareils vers Android 7.1 pour exécuter notre implémentation de tableau croisé dynamique (qui nécessitait Java 8). Nous avons également utilisé un écran d'ordinateur (16", 1366x768 pixels) pour afficher en permanence les instructions au cours d'un essai.

Nous avons recruté 12 participants (7 femmes) âgés de 31,7 ans en moyenne (écart-type = 6,8). Les participants étaient tous des étudiants du département d'informatique de l'université locale. Deux d'entre eux ont participé à l'étude 1, limitée à la phase de sélection (étape 1). Ils étaient tous droitiers et connaissaient bien les appareils mobiles (7,8 sur une échelle de 0 à 9), les tableurs (6.5) et les tableaux croisés dynamiques (6.3). L'expérience a duré 78 minutes en moyenne.

Pour chaque essai, nous avons mesuré le temps total d'exécution ainsi que les temps de sélection et d'assistance. Nous avons consigné les erreurs de sélection (sélection d'une plage de cellules incorrecte) et les erreurs d'affectation (affectation d'un élément à la mauvaise case de l'assistant de création du tableau croisé dynamique ou attribution d'une fonction d'agrégation incorrecte). À la fin de chaque bloc, nous avons demandé aux participants de remplir un questionnaire SUS et nous avons recueilli des réactions informelles. Les participants ont également été invités à donner une appréciation générale de chaque technique d'interaction sur une échelle de Likert en 7 points.

6.3 Résultats

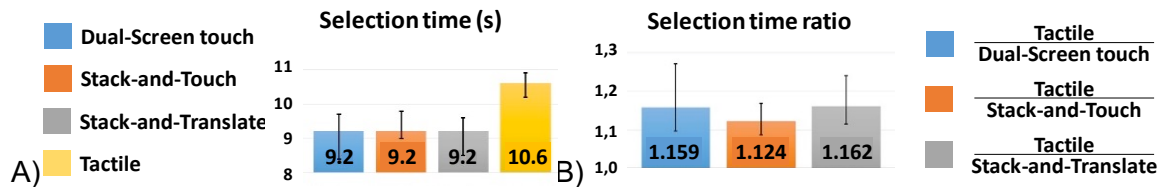
L'interaction globale est divisée en deux étapes : sélection et affectation. Par conséquent, nous rapportons les mesures quantitatives (temps, erreur) pour chaque étape séparément.

6.3.1 Durée de sélection (étape 1).

Alors qu'une seule forme de plage de cellules est à sélectionner dans cette seconde étude (plage de cellules de type $N \times M$ avec $N=50$ et $M=12$), par opposition aux sept formes de plage de cellules dans la première étude, les résultats sont en accord avec les mesures de la

première étude : en moyenne, la sélection d'une plage de cellules nécessite plus de temps avec la technique Tactile (10,6s IC [10.2, 10.9]) qu'avec nos techniques basées sur le stacking (9.2s IC [8.6, 9.7]) (Fig 9 - A). L'analyse intra-sujet basée sur le rapport de temps confirme ce résultat et établit qu'il a fallu en moyenne 14,8% de temps en plus (rapport = 1.148 sans intersection avec 1,0, Fig. 9 - B) avec Tactile qu'avec une de nos techniques basées sur le stacking.

Fig. 9. Temps moyen de sélection en s (à gauche) et rapport (à droite) en ce qui concerne le mode Tactile (IC à 95%).

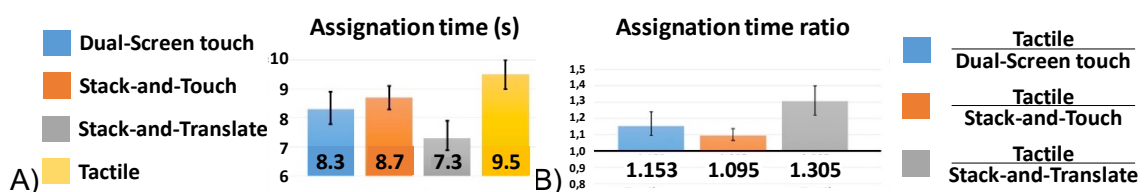


6.3.2 Durée d'affectation (étapes 2 et 3).

Les résultats établissent fermement que la phase d'affectation (c'est-à-dire remplir les cases de l'assistant de tableau croisé dynamique avec les éléments correspondants, Fig. 10-A) avec Stack-and-Translate prend moins de temps (7.3s, IC [6.9, 7.9]) qu'avec les trois autres techniques. Les résultats établissent également que Dual-Screen-Touch (8.3s, IC [7.8, 8.9]) et Stack-and-Touch (8.7s, IC [8.3, 9.1]) sont similaires en termes de temps d'affectation, alors que Tactile (9.5s, IC [9.0, 10.0]) nécessite clairement plus de temps que les trois autres. Ces résultats restent valables pour chaque nombre de cases testées (c'est-à-dire que les performances des techniques sont équivalentes quel que soit le nombre de cases à modifier). L'analyse intra-sujet basée sur le ratio de temps (Fig. 10 - B) confirme ce résultat et établit qu'il a fallu en moyenne 30,1% de temps supplémentaire (ratio = 1,301 sans intersection avec 1,0) avec Tactile qu'avec Stack-and-Translate.

Lors de la modification de la fonction d'agrégation de l'élément affecté à la case Valeur de l'assistant (par exemple, Somme au lieu de Moyenne), le temps d'affectation requis avec la technique Tactile augmente de 42,6% IC [32.7, 54.4] alors qu'il n'augmente que de 14,2% IC [8.6, 21.3] en moyenne pour nos 3 techniques (détails individuels sur la Fig. 11-A). Nous pouvons expliquer ces résultats par le fait qu'il est plus difficile d'accéder aux boutons de configuration de la tablette en utilisant la technique Tactile qu'à ceux affichés sur le smartphone lors de l'utilisation de techniques basées sur le stacking.

Fig. 10. Temps moyen d'affectation en s (A) et rapport (B) vis-à-vis de Tactile (IC à 95%).

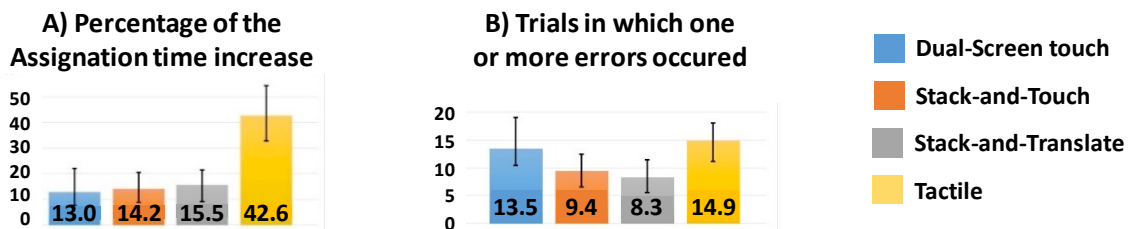


6.3.3 Erreurs

Compte tenu du protocole expérimental, aucune erreur n'était possible au cours de la phase de sélection. En ce qui concerne les erreurs d'affectation, c'est-à-dire une colonne affectée à une mauvaise case de l'assistant de tableau croisé dynamique (Fig. 11-B), il semble que moins d'erreurs se soient produites avec Stack-and-Translate (8,3% des essais contenaient au moins une erreur [5.6, 11.5]) et Stack-and-Touch (9,4% des essais [6.6, 12.5]) qu'avec Tactile (14,9% des essais [11.1, 18.1]) et Dual-Screen-Touch (13,5% des essais [10.4, 19.1]). Avec la technique Tactile, afin d'affecter une colonne à une case de l'assistant, l'utilisateur sélectionne un élément avec le doigt dans la liste des en-têtes de colonne affichés dans la partie supérieure de l'assistant, comme dans l'application Excel. Avec les autres

techniques, l'utilisateur sélectionne la colonne par un geste de stacking. Nous pensons qu'avec l'interaction tactile, la précision requise pour sélectionner l'élément dans la liste des colonnes est responsable de l'augmentation de l'erreur pendant la phase d'affectation.

Fig. 11. A) Pourcentage d'augmentation du temps d'affectation (IC 95%) lorsque la modification de la fonction de résumé est demandée (versus non). B) Pourcentage des essais dans lesquels au moins une erreur d'affectation s'est produite (IC à 95%).



6.3.4 Utilisabilité et préférences utilisateurs

Les questionnaires SUS conduisent à un meilleur score d'utilisation pour Stack-and-Translate (90.4, IC [76.9, 95.4]) et le Dual-Screen-Touch (80.8, IC [73.3, 87.9]), que pour la technique Tactile (70.2, IC [63.3, 75.0]) et Stack-and-Touch (73.1, IC [68.5, 76.0]). L'évaluation générale des techniques, obtenue à l'aide d'une échelle de Likert en 7 points, confirme ces résultats avec 11 participants sur 12 qui ont aimé (5 et plus) Stack-and-Translate, 10 qui ont aimé le Dual-Screen-Touch, 9 Stack-and-Touch et 7 seulement la technique Tactile.

Les commentaires informels des participants vont dans le sens de ces analyses. Stack-and-Translate a été décrit comme « très simple et très rapide » (9/12). La technique Dual-Screen-Touch a été qualifiée de « simple et facile à apprendre » (11/12) bien que « cliquer sur l'en-tête de colonne ne soit pas pratique ; J'aimerais cliquer sur l'une des cellules de la colonne » (9/12). La technique Stack-and-Touch a été décrite comme « plus simple car le menu du smartphone est plus clair que celui de la tablette » (7/12). La technique Tactile était considérée comme « vraiment dérangement : « [...] je peux la faire glisser mais souvent je ne parviens pas à placer correctement » (8/12).

6.3.5 Conclusion

Les résultats de cette étude confirment tout d'abord que, même lorsque combinée à une autre tâche, la sélection d'une plage de cellules nécessite en moyenne 15% de plus de temps avec la technique Tactile qu'avec les techniques basées sur le stacking, comme indiqué dans la première étude utilisateur. Les résultats établissent également que remplir un assistant de tableau croisé dynamique (étape 2) avec la technique Stack-and-Translate nécessite moins de temps que les autres techniques (7.3s contre 8.3s pour Dual-Screen-Touch, 8.7s pour Stack-and-Touch et 9.5s pour Tactile) : l'utilisation de la technique habituelle Tactile pour créer un tableau croisé dynamique nécessite 30% de temps supplémentaire par rapport à l'utilisation de la technique Stack-and-Translate. Ces résultats permettent aussi d'établir, sans surprise, que l'usage de deux écrans réduit le temps nécessaire pour remplir un assistant de tableau croisé dynamique : seule la technique la plus lente (Tactile) utilisait un seul écran. Au-delà de ce constat, les techniques basées sur le stacking induisent moins d'erreur que celle basée sur le tactile seul, pour un score d'utilisabilité similaire. Ces résultats permettent enfin d'établir que le stacking permet encore un gain de temps par rapport à une interaction tactile puisque la techniques Dual-Screen-Touch, entièrement tactile, requiert clairement plus de temps que la plus rapide des techniques basées sur le stacking (Stack-and-Translate). Ces trois aspects permettent donc d'établir clairement l'apport des techniques basées sur le stacking par rapport à des techniques purement tactiles ou mono-écran.

De plus, Stack-and-Translate et Dual-Screen-Touch obtiennent de meilleurs scores SUS que les autres techniques, y compris la technique Tactile. Les évaluations subjectives des techniques confirment largement l'opinion positive des participants à l'égard de la technique

Stack-and-Translate. Lorsque la tâche (sélection + affectation) devient plus complexe parce que la fonction d'agrégation doit être modifiée après l'affectation (c'est-à-dire ouvrir la "fonction" du menu et sélectionner une fonction de résumé différente - telle que Somme), les résultats établissent que les techniques basées sur le stacking résistent mieux à la complexité que la technique Tactile (cf. 6.3.2) : il semble donc que l'espace d'affichage ajouté sur le smartphone permet un accès facile à plus des fonctionnalités. Ces résultats démontrent ainsi les avantages des techniques de stacking par rapport aux interactions tactiles traditionnelles pour la création de tableaux croisés dynamiques.

7 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

7.1 Scénario d'utilisation : retours des élus

L'utilisation du smartphone comme dispositif complémentaire pourrait facilement être insérée dans une application existante pour répondre à des difficultés d'interaction courantes. Par exemple, considérons un analyste qui a effectué une analyse de données avant une réunion. La présentation de son analyse, au cours d'une réunion, génère d'autres hypothèses : il a besoin d'explorer plus avant les données au cours de la réunion, ce qui est fastidieux sur les tablettes. Les smartphones, omniprésents dans les milieux personnels et professionnels, peuvent alors être utilisés pour faciliter l'interaction. Cette situation d'interaction, commune à de nombreux métiers, sert de cadre à notre travail. Les smartphones peuvent servir d'interacteurs principaux avec la tablette, étendant à la fois les degrés de libertés d'entrée et l'espace d'affichage, en faisant un candidat unique pour générer une analyse plus approfondie des données.

Dans ce contexte, en plus de la création de tableaux croisés dynamiques, le smartphone permettrait de créer et d'afficher des représentations graphiques des données, libérant ainsi de l'espace d'affichage sur la tablette. L'utilisation du stacking permettrait alors de transférer les graphiques générés d'un dispositif à l'autre, afin que chaque utilisateur puisse les explorer.

Afin d'obtenir un premier retour informel sur notre approche pour répondre au scénario d'utilisation élaboré avec les élus interviewés, nous avons réalisé un second entretien avec eux. Au cours de cette session, nous avons présenté les différentes techniques d'interaction développées. Nous avons recueilli leurs remarques ainsi que leur appréciation de ces techniques et nous leur avons demandé si nos implémentations semblaient pertinentes pour leur contexte de travail.

Les résultats de cet entretien montrent que nos contributions s'intègrent parfaitement dans leur fonction d'élu : utilisation de dispositifs déjà à leur disposition, manipulation de données suffisamment complexes, exploitations avancées de tableurs. Enfin, après avoir manipulé le smartphone et généré quelques tableaux croisés dynamiques, les élus ont trouvé nos techniques pertinentes et faciles à prendre en main. Il a cependant été noté que l'ajout d'une représentation graphique permettant de visualiser les données, après avoir créé le tableau croisé dynamique, était nécessaire et devait être la prochaine étape de ce travail.

Dans le contexte de l'entreprise Berger-Levrault, l'utilisation du stacking pourrait donc être envisagée dans de nombreuses applications. La version mobile du logiciel Atal (outil de gestion du patrimoine de la collectivité) représente un cas d'application particulièrement pertinent pour ces travaux. Ce logiciel affiche une liste déroulante de l'ensemble des éléments de patrimoine de la collectivité regroupés par catégories (arbres, bancs publics, etc.). Chaque élément est représenté par de nombreuses caractéristiques (p. ex. 47 pour les arbres de la ville de Lyon). L'utilisation du stacking permettrait de faciliter la manipulation de l'ensemble de ces critères tout en permettant leur visualisation sur l'écran du smartphone, libérant ainsi de l'espace d'affichage pour montrer les données sur l'écran de la tablette. De plus, l'utilisation du smartphone permettrait l'affichage de représentations graphiques issues de l'analyse de ces données (p. ex. l'état de santé des arbres d'un quartier). D'autre part, le smartphone

pourrait aussi être utilisé comme une lentille magique (Bier et al., 2013) et ainsi permettre de filtrer les données de la tablette plus efficacement.

7.2 Avantages de l'interaction basée sur le stacking pour l'analyse des données

Nos deux études révèlent que l'utilisation de l'interaction basée sur le stacking pour manipuler des données sur des appareils mobiles est plus efficace que l'interaction tactile actuelle fournie par les tableurs sur tablette. Dans un premier temps, nous avons démontré que la sélection des cellules nécessite 15% plus de temps avec l'interaction tactile qu'avec une technique basée sur le stacking ; dans un deuxième temps, nous avons établi que la sélection des cellules et leur affectation dans l'assistant du tableau croisé dynamique nécessitaient plus de temps avec la technique Tactile qu'avec une technique basée sur stacking et jusqu'à 22% de temps en plus qu'avec la technique Stack-and-Translate. Enfin, parmi les techniques basées sur le stacking, celle reposant uniquement sur le stacking (Stack-and-Translate - 7.3s) nécessite moins de temps que celles utilisant uniquement le toucher (Dual-Screen Touch - 8.3s) ou une combinaison de toucher et stacking (Stack-and-Touch - 8.7s).

La manipulation physique du smartphone permet une manipulation directe de la base de données sans interférer avec les gestes tactiles habituels, et raccourcit le chemin d'interaction. De plus, l'utilisation de l'écran du smartphone pour afficher l'assistant de tableau croisé dynamique s'est avérée pratique et utile (voir les commentaires informels des utilisateurs). Globalement, l'interaction basée sur le stacking semble bien adaptée pour faciliter l'analyse ubiquitaire des données sur les tablettes.

7.3 Temps total d'interaction et choix du smartphone

Pour utiliser notre approche de stacking pour l'analyse de données, il faut d'abord prendre le smartphone et le configurer sur la tablette, ce qui se rajoute au temps total d'interaction. Cependant, au cours d'une longue analyse de données (les conseils municipaux durent en moyenne 2 heures), une fois le smartphone positionné, l'utilisateur ne fera que continuer à l'utiliser, avec les avantages démontrés par rapport à une interaction tactile normale. Cela justifie le choix d'utiliser le smartphone comme principal acteur de la main dominante : dans de telles conditions, nos techniques sont respectivement supérieures de 19,9% et 30,1% à celles tactiles pour la sélection de la plage de cellules et la configuration de l'assistant de tableau croisé dynamique.

7.4 Perspectives

À l'avenir, nous prévoyons d'intégrer à notre application d'autres fonctionnalités du tableau croisé dynamique telles que le classement ou le filtrage des éléments dans l'assistant et le changement de visualisations du tableau croisé (représentation graphique par rapport à un tableau). Ces deux visualisations peuvent être disponibles sur l'écran du smartphone en effectuant un geste de balayage gauche / droite. Une fois ces fonctionnalités intégrées à notre application, nous prévoyons de comparer notre solution à une technique tactile avancée (basée sur le toucher à trois doigts, par exemple). Nous mènerons ensuite une étude longitudinale avec nos utilisateurs ciblés, à savoir les élus, dans un contexte concret.

De plus, nous espérons exploiter tout le potentiel des gestes de stacking. Alors que dans notre exploration initiale, nous avons dévoilé un vocabulaire composé de différents types de gestes (physiques ou tactiles), nous n'avons utilisé qu'un sous-ensemble dans nos interactions. Nous prévoyons aussi d'étudier l'apport du stacking pour d'autres utilisations : une interaction basée sur le stacking pourrait être utile pour la configuration de graphiques de tableur, pourrait être utilisée dans des interfaces overview+detail (Saidi et al., 2016) ou pour transférer des données entre des périphériques dans un environnement multi-périphérique (Chen et al., 2013; Hamilton et al., 2014).

En ce qui concerne l'utilisation à long terme de techniques de stacking, étant donné que la tablette et le smartphone reposent le plus souvent sur la table, nous n'anticipons pas que la technique induise une fatigue particulière lors de son utilisation. Nous n'avons d'ailleurs reçu aucun commentaire sur la fatigue lors de nos tests qui ont duré une heure. Cependant, des études futures devraient valider ce point.

LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Intégrer à notre application d'autres fonctionnalités du tableau croisé dynamique, telles que le classement ou le filtrage
- ✓ Comparer notre solution à une technique tactile avancée
- ✓ Mener une étude longitudinale avec nos utilisateurs ciblés
- ✓ Etudier l'apport à d'autres applications, comme la configuration de graphiques de tableur ou les interfaces « overview+detail »

8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté différentes techniques de stacking pour faciliter l'analyse de données ubiquitaires sur des tablettes. Nous avons tout d'abord éliminé les gestes de stacking les plus inconfortables. Sur la base de ces résultats, nous avons conçu une coque conductive qui détecte la présence du smartphone sur l'écran de la tablette. Nous avons ensuite proposé des techniques d'interaction basées sur le stacking, l'objectif final étant de prendre en charge l'analyse de données à l'aide de tableaux croisés dynamiques selon une approche en deux étapes : premièrement, effectuer une sélection de plage de cellules, puis créer un tableau croisé dynamique à partir de la plage de cellules choisie. Nous avons montré que nos techniques de stacking sont plus rapides que les interactions tactiles classiques pour la sélection d'une plage de cellules. En outre, nous avons établi que l'utilisation du smartphone en tant qu'interacteur tangible avec un écran tactile complémentaire étend les capacités d'interaction d'un appareil mobile en termes d'entrée (interaction basée sur le stacking) et de sortie (écran complémentaire) : en particulier, il accélère la création et la manipulation de tableaux croisés dynamiques, et est plus utilisable que l'interaction tactile usuelle.

QUE RETENIR DE CETTE RECHERCHE ?

- ✓ Les techniques d'interaction basées sur le stacking sont plus rapides que les interactions tactiles classiques pour la sélection d'une plage de cellules.
- ✓ L'utilisation du smartphone en tant qu'interacteur tangible accélère la création et la manipulation de tableau croisé dynamique.

9 REFERENCES

- ▶ Banovic, N, Frank Chun Yat Li, David Dearman, Koji Yatani, and Khai N. Truong. 2011. Design of unimanual multi-finger pie menu interaction. In Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '11). ACM, New York, NY, USA, 120-129. DOI: <https://doi.org/10.1145/2076354.2076378>
- ▶ Baudisch, P., C. Holz, "My New PC Is a Mobile Phone," XRDS: Cross-roads, vol. 16, no. 4, 2010, pp. 36-41
- ▶ Bier, E., A., Maureen C. Stone, Ken Pier, William Buxton, and Tony D. DeRose. 1993. Toolglass and magic lenses: the see-through interface. In Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93). ACM, New York, NY, USA, 73-80.
- ▶ Blagojevic R., Plimmer B. (2013) CapTUI: Geometric Drawing with Tangibles on a Capacitive Multi-touch Display. In: Kotzé P., Marsden G., Lindgaard G., Wesson J., Winckler M. (eds) Human-Computer Interaction – INTERACT 2013. INTERACT 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 8117. Springer, Berlin, Heidelberg
- ▶ Brooke, J.. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry, 189(194), 4-7.

- ▶ Brudy, F., Steven Houben, Nicolai Marquardt, and Yvonne Rogers. 2016. Cura-tionSpace: Cross-Device Content Curation Using Instrumental Interaction. In Proceedings of the ACM Conference on Interactive Surfaces and Spaces. ACM, 159–168. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2992154.2992175>
- ▶ Chen, N., François Guimbretière, and Abigail Sellen. 2013. Graduate student use of a multi-slate reading system. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13). ACM, New York, NY, USA, 1799-1808. DOI: <https://doi.org/10.1145/2470654.2466237>
- ▶ Chan, L., Stefanie Müller, Anne Roudaut, and Patrick Baudisch. 2012. CapStones and ZebraWidgets: sensing stacks of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12). ACM, New York, NY, USA, 2189-2192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2207676.2208371>
- ▶ Chen, X.A., Tovi Grossman, Daniel J. Wigdor, and George Fitzmaurice. 2014. Duet: exploring joint interactions on a smart phone and a smart watch. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 159-168. DOI: <https://doi.org/10.1145/2556288.2556955>
- ▶ Elmqvist, N., & Irani, P. (2013). Ubiquitous analytics: Interacting with big data anywhere, anytime. *Computer*, 46(4), 86-89.
- ▶ Excel on Android: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.microsoft.office.excel&hl=fr> (Last visit 20/09/2018)
- ▶ Goguey, A., Géry Casiez, Thomas Pietrzak, Daniel Vogel, and Nicolas Roussel. 2014. Adoiraccourcix: multi-touch command selection using finger identification. In Proceedings of the 26th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '14). ACM, New York, NY, USA, 28-37. DOI: <https://doi.org/10.1145/2670444.2670446>
- ▶ González R.M., Caroline Appert, Gilles Bailly, and Emmanuel Pietriga. 2016. TouchTokens: Guiding Touch Patterns with Passive Tokens. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16). ACM, New York, NY, USA, 4189-4202.
- ▶ Google Spreadsheet on Android: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.docs.editors.sheets&hl=fr> (Last visit 18/09/2017)
- ▶ Hamilton, P. Daniel J. Wigdor. 2014. Conductor: enabling and understanding cross-device interaction. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 2773-2782. DOI: <https://doi.org/10.1145/2556288.2557170>
- ▶ INRIA - AVIZ Group. R Macros for data analysis. www.aviz.fr/reliefshearing.
- ▶ Hasan, K., David Ahlström, and Pourang Irani. 2013. Ad-binning: leveraging around device space for storing, browsing and retrieving mobile device content. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13). ACM, New York, NY, USA, 899-908. DOI: <https://doi.org/10.1145/2470654.2466115>
- ▶ Heo, S., Jiseong Gu, and Geehyuk Lee. 2014. Expanding touch input vocabulary by using consecutive distant taps. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 2597-2606. DOI: <https://doi.org/10.1145/2556288.2557234>
- ▶ Heo, S., Jingun Jung, and Geehyuk Lee. 2016. MelodicTap: fingering hotkey for touch tablets. In Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI '16). ACM, New York, NY, USA, 396-400. DOI: <https://doi.org/10.1145/3010915.3010993>
- ▶ Badam, H.T., S. K., Elmqvist, N., & Dachsel, R. (2018, April). When David Meets Goliath: Combining Smartwatches with a Large Vertical Display for Visual Data Exploration. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (p. 19). ACM.
- ▶ Hwang, S., Myungwook Ahn, and Kwang-yun Wohn. 2013. MagGetz: customizable passive tangible controllers on and around conventional mobile devices. In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13). ACM, New York, NY, USA, 411-416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2501988.2501991>

- ▶ Jelen, B., Michael Alexander. 2010. Pivot Table Data Crunching: Microsoft Excel 2010 (1st ed.). Que Publishing Company.
- ▶ Jo, J., Sehi L'Yi, Bongshin Lee, and Jinwook Seo. 2017. TouchPivot: Blending WIMP & Post-WIMP Interfaces for Data Exploration on Tablet Devices. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17). ACM, New York, NY, USA, 2660-2671. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025752>
- ▶ Krzywinski, M. and Altman, N. Points of Significance: Error bars. Nature Methods 10, 10 (2013), 921–922.
- ▶ Langner, R., Tom Horak, Raimund Dachsel (2018). VisTiles: Coordinating and Combining Co-located Mobile Devices for Visual Data Exploration. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 24(1), 626-636.
- ▶ Leigh, S., Philipp Schoessler, Felix Heibeck, Pattie Maes, and Hiroshi Ishii. 2015. THAW: Tangible Interaction with See-Through Augmentation for Smartphones on Computer Screens. In Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '15). ACM, New York, NY, USA, 89-96. DOI: <https://doi.org/10.1145/2677199.2680584>
- ▶ Microsoft Office support, "Créer un tableau croisé dynamique pour analyser des données de feuille de calcul", <https://support.office.com/fr-fr/article/cr%C3%A9er-un-tableau-crois%C3%A9-dynamique-pour-analyser-des-donn%C3%A9es-de-feuille-de-calcul-a9a84538-bfe9-40a9-a8e9-f99134456576>.
- ▶ Li, M., Leif Kobbelt. 2015. ACTUI: Using Commodity Mobile Devices to Build Active Tangible User Interfaces. In Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct (MobileHCI '15). ACM, New York, NY, USA, 592-597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2786567.2792895>
- ▶ Perelman, G., Marcos Serrano, Célia Picard, Mustapha Derras, and Emmanuel Dubois. 2017. Multi-device interaction for spreadsheet on tablets. In Proceedings of the 29th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '17). ACM, New York, NY, USA, 105-115.
- ▶ Perelman, G. Marcos Serrano, Célia Picard, Christophe Bortolaso, Mustapha Derras, and Emmanuel Dubois. 2018. Combination of tactile devices to interact with a spreadsheet on tablet. In Proceedings of the 30th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '18). ACM, New York, NY, USA, 20-29.
- ▶ Perelman, G., Conception, développement et évaluation de techniques d'interactions fluides pour des environnements multidimensionnels : application aux logiciels du service public. Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3, 2018. <http://thesesups.ups-tlse.fr/4189/>
- ▶ Perelman, G., Marcos Serrano, Christophe Bortolaso, Celia Picard, Mustapha Derras and Emmanuel Dubois. Combining Tablets with Smartphones for Data Analytics. I proceeding of Interact 2019, septembre 2019, 22 pages.
- ▶ Pfeuffer, K., Ken Hinckley, Michel Pahud, and Bill Buxton. 2017. Thumb + Pen Interaction on Tablets. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17). ACM, New York, NY, USA, 3254-3266. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025567>
- ▶ Piazza, T., Morten Fjeld, Gonzalo Ramos, AsimEvren Yantac, and Shengdong Zhao. 2013. Holy smartphones and tablets, Batman!: mobile interaction's dynamic duo. In Proceedings of the 11th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI '13). ACM, New York, NY, USA, 63-72. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2525194.2525205>
- ▶ QlikSense: <https://www.qlik.com/fr-fr/products/qlik-sense> (Last visit 20/09/2018)
- ▶ QlikView: <https://www.qlik.com/fr-fr/products/qlikview> (Last visit 20/09/2018)
- ▶ Rädle, R., Hans-Christian Jetter, Jens Müller, and Harald Reiterer. 2014. Bigger is not always better: display size, performance, and task load during peephole map navigation. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 4127-4136
- ▶ Saidi, H., Marcos Serrano, and Emmanuel Dubois. 2016. Investigating the effects of splitting detailed views in Overview+Detail interfaces. In Proceedings of the 18th International Conference

- on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '16). ACM, New York, NY, USA, 180-184. DOI: <https://doi.org/10.1145/2935334.2935341>
- ▶ Santosa, S , Daniel Wigdor, A field study of multi-device workflows in distributed workspaces, Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing, September 08-12, 2013, Zurich, Switzerland doi>10.1145/2493432.2493476
 - ▶ Schmidt, D., Fadi Chehimi, Enrico Rukzio, and Hans Gellersen. 2010. PhoneTouch: a technique for direct phone interaction on surfaces. In Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '10). ACM, New York, NY, USA, 13-16. DOI: <https://doi.org/10.1145/1866029.1866034>
 - ▶ Schmidt, D., Julian Seifert, Enrico Rukzio, and Hans Gellersen. 2012. A cross-device interaction style for mobiles and surfaces. In Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference (DIS '12). ACM, New York, NY, USA, 318-327. DOI: <https://doi.org/10.1145/2317956.2318005>
 - ▶ Srinivasan, A., Lee, B., Stasko, J. 2018. Facilitating Spreadsheet Manipulation on Mobile Devices Leveraging Speech. MobileVis '18 Workshop at CHI 2018, April 21, 2018, Montreal, QC, Canada. <https://mobilevis.github.io/>
 - ▶ Uddin Sami, Md., Carl Gutwin. 2016. Rapid Command Selection on Multi-Touch Tablets with Single-Handed HandMark Menus. In Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '16). ACM, New York, NY, USA, 205-214. DOI: <https://doi.org/10.1145/2992154.2992172>
 - ▶ Tableau software : <https://www.tableau.com/fr-fr> (Last visit 20/09/2018)
 - ▶ VandenBos Gary R. (Ed.). 2009. Publication Manual of the American Psychological Association (6th ed.). American Psychological Association, Washington, DC. <http://www.apastyle.org/manual/>
 - ▶ Vogel, D. and Géry Casiez. 2011. Conté: multimodal input inspired by an artist's crayon. In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '11). ACM, New York, NY, USA, 357-366. DOI: <https://doi.org/10.1145/2047196.2047242>
 - ▶ Wagner, J., Eric Lecolinet, and Ted Selker. 2014. Multi-finger chords for hand-held tablets: recognizable and memorable. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 2883-2892. DOI: <https://doi.org/10.1145/2556288.2556958>
 - ▶ Willett, W., Jenny, B., Isenberg, T., et al. Lightweight Relief Shearing for Enhanced Terrain Perception on Interactive Maps. Proceedings of the 33rd ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2015), (2015).
 - ▶ Wongsuphasawat, K., Dominik Moritz, Anushka Anand, Jock Mackinlay, Bill Howe, and Jeffrey Heer. 2016. Voyager: exploratory analysis via faceted browsing of visualization recommendations. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG) 22, 12: 649-658.
 - ▶ Woźniak, P., Lars Lischke, Benjamin Schmidt, Shengdong Zhao, and Morten Fjeld. 2014. Thaddeus: a dual device interaction space for exploring information visualisation. In Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational (NordCHI '14). ACM, New York, NY, USA, 41-50. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2639189.2639237>
 - ▶ Wozniak, P., Nitesh Goyal, Przemysław Kucharski, Lars Lischke, Sven Mayer, and Morten Fjeld. 2016. RAMPARTS: Supporting Sensemaking with Spatially-Aware Mobile Interactions. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16). ACM, New York, NY, USA, 2447-2460. DOI: <https://doi.org/10.1145/2858036.2858491>

10 BIOGRAPHIE



Gary PERELMAN

a soutenu son doctorat en Informatique en 2018. Ses travaux de cette thèse s'inscrivent dans une collaboration avec l'entreprise Berger-Levrault. L'objectif de ses travaux de thèse est de contribuer à la fluidification de l'interaction avec des données multidimensionnelles, contenues dans les logiciels du service public, au travers de l'augmentation des degrés de libertés en entrée proposés par les dispositifs. Ses travaux de thèse ont présenté trois contributions majeures : un dispositif à multiples degrés de libertés, la Roly-Poly Mouse ; un espace de conception, DECO ; ainsi qu'un ensemble de techniques d'interaction avec dispositifs mobiles basées sur le principe du stacking.



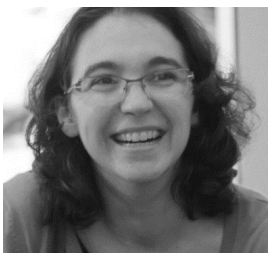
Marcos SERRANO

est maître de conférence à l'Université Paul Sabatier-Toulouse 3. Il a obtenu son Doctorat en Informatique en 2010 à Grenoble, et son Habilitation à Diriger des Recherches en 2018 à Toulouse. Ses recherches sont consacrées à la conception de nouvelles techniques d'interaction dans le domaine de l'informatique mobile et ubiquitaire. Ses travaux s'intéressent en particulier aux interactions avec des interfaces non rectangulaires, des environnements multi-écrans et des dispositifs mobiles.



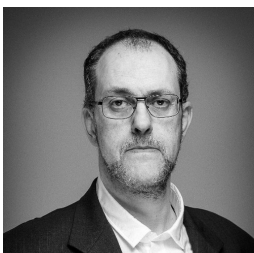
Christophe BORTOLASO

est Docteur en Informatique, spécialiste en interaction homme-machine. Depuis maintenant plus de 10 ans, il a travaillé en France et à l'étranger sur de nombreux projets de recherche et de développement logiciel dans des secteurs divers tel que la défense, la culture, l'énergie, le public et la santé. Aujourd'hui en charge des projets R&D chez Berger-Levrault, il coordonne une équipe de chercheurs dans de multiples thématiques allant du génie logiciel, à la réalité augmentée jusqu'à l'intelligence artificielle et le traitement naturel du langage.



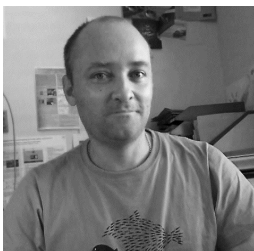
Célia PICARD

est enseignante-chercheuse à l'École Nationale d'Aviation Civile à Toulouse depuis 2017. Son Doctorat en Informatique, obtenu en 2012 à Toulouse, se situait à la frontière de la théorie des types et de l'ingénierie dirigée par les modèles. Après un passage de par l'industrie au cours duquel elle s'est intéressée notamment à des problématiques d'IHM, ses recherches sont désormais consacrées à la formalisation et à la certification de propriétés interactives en particulier pour les systèmes critiques et embarqués.



Mustapha DERRAS

est docteur en informatique et systèmes (URA 830 CNRS – 1993). Il est aujourd'hui Directeur de la Recherche et de l'Innovation du groupe Berger-Levrault. Auparavant il a occupé de nombreux postes ayant pour objectif de créer des produits innovants auprès de grands acteurs nationaux et internationaux (Dassault Systèmes, Timeg, Cadence Design Systems, General Electric) ainsi que chez CLAAS où il a effectué ses études doctorales dans le domaine de la robotique mobile et du traitement d'image.



Emmanuel DUBOIS

est Professeur à l'Université Paul Sabatier - Toulouse 3 depuis 2012. Il a obtenu son Doctorat en Informatique en 2001 à Grenoble et son Habilitation à Diriger des Recherches en 2009 à Toulouse. Après avoir développé des approches à base de modèles pour concevoir et développer des Systèmes Interactifs Mixtes, ses travaux se concentrent aujourd'hui sur la conception et l'expérimentation de techniques permettant d'interagir avec de grands volumes de données. Il s'agit notamment d'explorer comment combiner plusieurs espaces d'interaction au moyen de multiples dispositifs, de dispositifs immersifs, d'interaction spatiale ou tangible.

Amélioration du Raycasting par utilisation de la sélection par proximité et du filtrage

Marc Baloup, Thomas Pietrzak, Géry Casiez

► **To cite this version:**

Marc Baloup, Thomas Pietrzak, Géry Casiez. Amélioration du Raycasting par utilisation de la sélection par proximité et du filtrage. Journal d'Interaction Personne-Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM), 2019, 8 (1), pp.61 - 83. hal-02158113v2

HAL Id: hal-02158113

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02158113v2>

Submitted on 3 Dec 2019

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.

Amélioration du Raycasting par utilisation de la sélection par proximité et du filtrage

Marc BALOUP

Inria, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 - CRISTAL - Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille, F-59000 Lille, France

marc.baloup@inria.fr

Thomas PIETRZAK

Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Inria, UMR 9189 - CRISTAL - Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille, F-59000 Lille, France

thomas.pietrzak@univ-lille.fr

Géry CASIEZ

Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Inria, UMR 9189 - CRISTAL - Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille, F-59000 Lille, France

gery.casiez@univ-lille.fr

Improving Raycasting using Proximity Selection and Filtering

Abstract. *Raycasting* is the most common target pointing technique in virtual reality environments. However, performance on small and distant targets is impacted by the accuracy of the pointing device and the user's motor skills. Current pointing facilitation techniques are currently only applied in the context of the virtual hand, *i.e.* for targets within reach. We propose enhancements to *Raycasting* : filtering the ray, and adding a controllable cursor on the ray to select the nearest target. We describe a series of studies for the design of the visual feedforward, filtering technique, as well as a comparative study between different 3D pointing techniques. Our results show that highlighting the nearest target is one of the most efficient visual feedforward technique. We also show that filtering the ray reduces error rate in a drastic way. Finally we show the benefits of *RayCursor* compared to *Raycasting* and another technique from the literature.

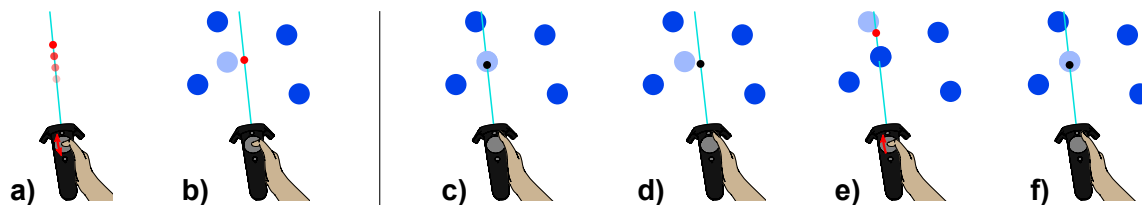
Key words : Virtual reality, pointing technique, visual feedforward

Résumé. *Raycasting* est la technique de pointage de cible la plus courante dans les environnements de réalité virtuelle. Cependant, sa performance sur des cibles à la fois petites et distantes est affectée par la précision du dispositif de pointage et les capacités motrices de l'utilisateur. Les techniques actuelles de facilitation du pointage ne sont actuellement appliquées que dans le contexte de la main virtuelle, c'est-à-dire pour les cibles à portée de main. Nous proposons des améliorations au *Raycasting* : le filtrage du rayon, et l'ajout d'un curseur contrôlable sur celui-ci pour sélectionner la cible la plus proche. Nous décrivons une série d'études pour la conception d'aides visuelles, la technique de filtrage, ainsi qu'une étude comparative entre différentes techniques de pointage 3D. Nos résultats montrent que la mise en évidence de la cible la plus proche est l'une des techniques les plus efficaces de rétroaction visuelle. Nous montrons également que le filtrage du rayon réduit le taux d'erreur de manière drastique. Enfin, nous montrons les avantages de *RayCursor* par rapport à *Raycasting* et à une autre technique de la littérature.

Mots-clés : Réalité virtuelle, technique de pointage, retours visuels

Édité par Joëlle Coutaz, Université de Grenoble et Patrick Girard, Université de Poitiers
Soumis le 17 juin 2019 – Accepté le 30 septembre 2019

Figure 1. Illustration du RayCursor manuel : a) l'utilisateur contrôle un curseur le long du rayon grâce au déplacement relatif de son pouce sur le pavé tactile; b) la cible la plus proche du curseur est mise en surbrillance. Illustration du RayCursor semi-auto : c) par défaut, il s'utilise comme Raycasting. Le curseur (en noir) se positionne automatiquement à l'intersection du rayon avec une cible; d) la cible reste mise en surbrillance même lorsque le curseur s'éloigne, jusqu'à ce qu'il soit plus proche d'une autre cible; e) l'utilisateur peut reprendre le contrôle du curseur en utilisant le pavé tactile, pour sélectionner une cible occultée (le curseur devient rouge pour indiquer le mode manuel); f) si l'utilisateur n'utilise plus le pavé tactile pendant 1s, le curseur retrouve le comportement décrit en c).



1 INTRODUCTION

Le pointage est une tâche fondamentale dans tout système interactif comportant un espace d'interaction 2D ou 3D. De nombreuses techniques ont été proposées et améliorées au fil des décennies pour les environnements 2D, afin d'exploiter les degrés de liberté offerts par les nouveaux périphériques d'entrée (souris d'ordinateur, interfaces tactiles ou oculomètres) ou les caractéristiques des objets affichés, en essayant par exemple de réduire artificiellement la distance aux objets (Grossman & Balakrishnan, 2005; Guiard, Blanch, & Beaudouin-Lafon, 2004) ou en augmentant leur largeur (Blanch, Guiard, & Beaudouin-Lafon, 2004). Les environnements 3D offrent également de multiples techniques pour accomplir cette tâche. Ces techniques peuvent être divisées en deux grandes catégories : les mains virtuelles et les techniques basées sur le *Raycasting* (Bowman, Kruijff, LaViola, & Poupayrev, 2004; Mine, 1995). Les techniques de mains virtuelles offrent un isomorphisme entre la main réelle et la main virtuelle (Argelaguet & Andujar, 2013). Malgré de nombreuses techniques destinées à améliorer *Raycasting* (Cashion, Wingrave, & LaViola Jr, 2012; de Haan, Koutek, & Post, 2005; Grossman & Balakrishnan, 2006; Kopper, Bacim, & Bowman, 2011; Liang & Green, 1994; Ren & O'Neill, 2013; Ro et al., 2017; Schmidt, Baillot, Brown, Tomlin, & Swan, 2006; Steinicke, Ropinski, & Hinrichs, 2004) (voir (Argelaguet & Andujar, 2013) pour un aperçu plus exhaustif), le *Raycasting* standard et la main virtuelle restent les deux techniques par défaut disponibles avec des systèmes tels que le HTC Vive et leurs environnements de programmation.

Avec la technique de *Raycasting*, l'utilisateur manipule un rayon dont l'origine et l'orientation sont définies par celles d'un périphérique d'entrée à 6 degrés de liberté, d'une manière similaire à celle d'un pointeur laser. Lorsque le rayon intersecte plusieurs objets, celui qui est le plus proche de l'utilisateur peut être sélectionné. Cette technique permet de sélectionner des cibles avec une difficulté croissante lorsque les cibles sont plus éloignées ou plus petites, en raison des limites du suivi du mouvement et des capacités motrices humaines. Cette technique est également affectée par l'occultation et les cibles distrayantes, car seule la cible la plus proche peut être sélectionnée. Ainsi, pour sélectionner des cibles cachées il faut changer la position et l'orientation du rayon.

De nombreuses techniques ont déjà été conçues et améliorées pour surmonter ces limites. De nouveaux périphériques d'entrée et de nouveaux contextes d'interaction offrent de nouvelles possibilités d'améliorer les techniques de pointage. Les nouveaux contrôleurs, disponibles sur le HTC Vive, offrent des degrés de liberté supplémentaires tels que des pavés tactiles qui n'étaient pas disponibles auparavant.

Nous proposons une technique de *Raycasting* améliorée, appelée *RayCursor*¹, qui utilise un curseur sur le rayon. Cette technique a été conçue principalement pour les environnements immersifs utilisant le HTC Vive, mais elle pourrait également être utilisée dans d'autres

1. Ressources additionnelles disponibles à l'adresse ns.inria.fr/loki/raycursor

contextes 3D comportant un contrôleur 6 degrés de liberté avec un pavé tactile et des boutons. L'utilisateur peut contrôler le curseur le long du rayon en utilisant les déplacements relatifs de son pouce sur le pavé tactile. Comme pour le *Bubble Cursor* (Grossman & Balakrishnan, 2005 ; Vanacken, Grossman, & Coninx, 2007), la cible la plus proche du curseur peut être sélectionnée lorsque l'utilisateur appuie sur un bouton.

Après avoir présenté les travaux relatifs aux techniques de sélection 3D basées sur *Raycasting* et les techniques de facilitation du pointage, nous décrivons la conception de *RayCursor* et ses caractéristiques : retour visuel, fonction de transfert du curseur et filtrage du rayon. Nous expliquons la mise en place générale de nos études expérimentales, et une série d'expériences examinant chacune des caractéristiques de la technique. Enfin, nous détaillons une expérience utilisateur, comparant notre technique au *Raycasting* standard et la technique de la littérature la plus proche (Ro et al., 2017).

2 ÉTAT DE L'ART

La section état de l'art porte sur les techniques de sélection basées sur *Raycasting*. Nous commençons par présenter les différents mécanismes de désambiguïsation qui ont été proposés pour ces techniques. Nous présentons ensuite des techniques qui ajoutent des degrés de liberté supplémentaires au rayon avant de couvrir les techniques de facilitation du pointage qui reposent sur la sélection par proximité.

2.1 Techniques de désambiguïsation

Argelaguet et Andujar fournissent une taxonomie des différentes techniques conçues pour améliorer le *Raycasting* (Argelaguet & Andujar, 2013). La plupart de ces techniques sont basées sur l'utilisation d'un volume au lieu d'un rayon, ce qui nécessite l'utilisation de techniques de désambiguïsation pour la sélection. Ils distinguent trois groupes de mécanismes de désambiguïsation : manuel, heuristique et comportemental.

L'approche manuelle nécessite des étapes supplémentaires pour sélectionner manuellement une cible parmi celles qui sont mises en évidence. Par exemple, dans *Flower Ray*, Grossman *et al.* affichent dans un menu circulaire les objets traversés par le rayon (Grossman & Balakrishnan, 2006). La technique *Menu Cone* affiche également les cibles à désambiguïser dans un menu et l'utilisateur fait un geste pour sélectionner la cible désirée (Ren & O'Neill, 2013). De la même manière, la technique *SQUAD*, proposée par Kopper *et al.*, adapte le *Raycasting* pour projeter une sphère sur la surface en intersection la plus proche du rayon, afin de déterminer quels objets sont susceptibles d'être sélectionnés (Kopper et al., 2011). Les objets sélectionnables sont ensuite répartis sur quatre quadrants et l'utilisateur affine la sélection jusqu'à ce que l'objet souhaité puisse être sélectionné. *SQUAD* a montré des performances nettement meilleures que *Raycasting* pour les cibles de petites tailles et les faibles densités de cibles, mais elle présente également une dégradation significative des performances pour les cibles de grandes tailles et les densités importantes, en raison du nombre accru d'étapes pour sélectionner une cible. Cashion *et al.* proposent une variante de *SQUAD*, appelée *Expand*, qui ajoute la possibilité de zoomer (Cashion et al., 2012). Ils montrent qu'*Expand* est plus rapide que *SQUAD* pour des densités d'objets élevées. Sans recourir aux menus, le *Depth Ray* (Grossman & Balakrishnan, 2006) utilise un curseur fixe au milieu d'un rayon dont la longueur est également fixe. Lorsque le rayon intersecte plusieurs objets, celui qui est le plus proche du curseur peut être sélectionné. L'utilisateur peut alors ajuster la position du *Depth Ray* en changeant la position et l'orientation de sa main. Les auteurs l'ont utilisé avec un écran volumétrique, autour duquel l'utilisateur peut se déplacer. En réalité virtuelle (RV), l'espace est grand, potentiellement infini, et ce curseur fixe n'est ni plus ni moins qu'une main virtuelle distante. Grossman et Balakrishnan ont également proposé la technique du *Lock Ray* qui consiste à verrouiller tous les objets en intersection, avant d'en sélectionner un à l'aide du curseur (Grossman & Balakrishnan, 2006), en bouclant entre les objets sélectionnés (Hinckley, Pausch, Goble, & Kassell, 1994). Cependant, cela n'améliore pas le temps de mouvement. En utilisant un smartphone pour sélectionner des objets dans le monde physique, Delamare *et al.* ont proposé deux tech-

niques pour désambigüiser les cibles sélectionnées dans un cône (Delamare, Coutrix, & Nigay, 2013). Avec le P2Roll, l'utilisateur effectue un geste de roulement pour sélectionner la cible souhaitée. Avec le P2Slide, il réalise un geste de glissement sur la surface tactile. Leurs techniques n'ont été évaluées qu'avec un maximum de 16 cibles.

L'approche heuristique permet de déterminer la cible que l'utilisateur souhaite sélectionner selon des choix prédéterminés. La technique Flashlight, par exemple, met en évidence l'objet qui est le plus proche de l'axe central du cône de sélection (Liang & Green, 1994). Le Skicky-Ray, basé sur *Raycasting* (Steinicke et al., 2004), laisse quant à lui sélectionnable le dernier objet intersecté, jusqu'à ce qu'un autre soit touché. Le rayon virtuel est dévié vers les objets qui peuvent être sélectionnés, n'ayant plus ainsi de retour visuel pour sélectionner un autre objet. Cette technique n'a pas été évaluée. Schimdt *et al.* ont proposé différents algorithmes probabilistes basés sur le pointage pour déduire la cible que l'utilisateur veut sélectionner, mais cela nécessite un réglage complexe de schémas de pondérations selon l'application (Schmidt et al., 2006).

Enfin, les approches comportementales prennent en compte les actions de l'utilisateur avant la confirmation de la sélection pour déterminer l'objet à sélectionner. Par exemple, IntenSelect utilise une fonction de notation basée sur le temps pour déterminer le score des objets qui se situent dans un volume de sélection conique. L'objet avec le score le plus élevé peut être sélectionné (de Haan et al., 2005). De la même manière, le Smart Ray pondère continuellement les cibles en fonction de leur proximité au curseur du rayon (Grossman & Balakrishnan, 2006). Cependant, cette dernière technique est moins performante que les techniques telles que Flower Ray ou Depth Ray (Grossman & Balakrishnan, 2006).

En résumé, les techniques d'interaction actuelles qui améliorent le *Raycasting* nécessitent un mécanisme de désambigüisation qui ajoute des étapes supplémentaires pour faire la sélection. Lorsqu'elles sont évaluées, ces techniques sont plus performantes pour la sélection de petits objets dans des environnements denses, mais elles sont également moins performantes que le *Raycasting* pour la sélection de cibles de tailles importantes. Grossman et Balakrishnan ont montré que le Depth Ray est plus performant que le Lock Ray, Flower Ray ou Smart Ray en raison du temps plus court nécessaire pour la phase de désambigüisation (Grossman & Balakrishnan, 2006). Au lieu d'avoir à désambigüiser entre différentes cibles en plusieurs étapes, une autre approche consiste à ajouter des degrés de liberté supplémentaires au *Raycasting* pour aider à ajuster la sélection de la cible tout en manipulant le rayon.

2.2 Ajout de degrés de liberté supplémentaires

Grossman et Balakrishnan ont simplement ajouté un degré de liberté supplémentaire (ddl) en ajoutant un curseur fixe au milieu d'un rayon (Grossman & Balakrishnan, 2006), ce qui s'est avéré être la technique la plus efficace pour sélectionner des cibles sur un petit écran volumétrique. Cependant, dans le contexte d'environnements immersifs tels que les casques RV, l'utilisation de cette technique nécessiterait des déplacements importants de l'utilisateur pour désambigüiser les cibles. Au lieu d'avoir un curseur fixé sur un rayon, Ro *et al.* ont introduit la possibilité d'ajuster la profondeur du rayon en utilisant les déplacements relatifs d'un doigt sur l'écran tactile d'un smartphone (Ro et al., 2017). Cependant, leur technique n'a pas été comparée à d'autres techniques et la fonction de transfert utilisée pour contrôler la longueur du rayon n'est pas détaillée. Des études récentes combinent les mouvements des mains avec le suivi de la tête et des yeux pour le pointage en réalité augmentée, comme le Pinpointing (Kytö, Ens, Piumsomboon, Lee, & Billinghamurst, 2018). Cette technique est beaucoup plus précise que les techniques basées uniquement sur le regard. Cependant, elle présente des inconvénients communs avec le *Raycasting* : sensibilité à l'occultation, tremblement des mains et précision des périphériques d'entrée.

2.3 Techniques de facilitation du pointage

Diverses stratégies ont été étudiées pour faciliter le pointage. Par exemple, le pointage sémantique élargit les cibles dans l'espace moteur (Blanch et al., 2004) Cette technique a été

conçue pour le pointage 2D, mais une autre étude l'a étendue à la 3D en utilisant une souris d'ordinateur sur écran standard (Elmqvist & Fekete, 2008). Cette technique améliore les performances de pointage dans des environnements qui présentent une faible densité de cibles mais est affectée par des cibles qui se trouvent sur le chemin du curseur (cibles distractives) (Casiez, Roussel, Vanbelleghem, & Giraud, 2011). Une autre stratégie consiste à remplacer le pointage par des gestes symboliques (Gupta, Pietrzak, Yau, Roussel, & Balakrishnan, 2017). Elle permet d'atténuer les problèmes dus aux gestes de pointage, mais elle n'est pas adaptée à des cibles arbitraires. À l'inverse, des études proposent des gestes 3D pour pointer des cibles sur des écrans 2D mais ces résultats sont difficilement applicables dans le cadre de la sélection de cibles 3D (Nancel et al., 2013; Vogel & Balakrishnan, 2005).

L'une des techniques de facilitation du pointage les plus efficaces en 2D consiste à sélectionner la cible la plus proche du curseur. Par exemple, le Bubble Cursor affiche un disque (une bulle) centré sur un curseur de souris dont le rayon est ajusté en fonction de la distance à la cible la plus proche (Grossman & Balakrishnan, 2005). Cette technique est particulièrement efficace lorsque la densité des cibles est faible, quelle que soit leur taille. Le principal inconvénient reste le retour visuel introduit par la bulle qui change constamment de rayon. Guillon *et al.* ont évalué l'impact de plusieurs retours visuels sur la performance du Bubble Cursor et ont constaté qu'une simple mise en surbrillance de la cible la plus proche est efficace (Guillon, Leitner, & Nigay, 2015).

Vanacken *et al.* ont développé une version 3D du Bubble Cursor, appelée 3D Bubble, en utilisant une technique de main virtuelle pour contrôler un pointeur 3D (Vanacken et al., 2007). Leur technique utilise une sphère semi-transparente en 3D englobant la cible la plus proche. Ils montrent que le Depth Ray est plus efficace que la 3D Bubble, elle-même plus efficace que *Raycasting*. De même, Vickers a défini un cube sensible autour d'un curseur 3D manipulé par une manette (Vickers, 1972). Lorsqu'un objet se trouve dans le cube sensible, le curseur saute sur l'objet.

En résumé, les techniques de désambiguïsation semblent efficaces pour sélectionner de petites cibles dans des environnements denses, mais elles augmentent globalement le temps de sélection en raison des étapes supplémentaires qu'elles introduisent. Les techniques de sélection utilisant la proximité des cibles semblent efficaces mais elles nécessitent l'utilisation d'un retour d'information approprié, notamment en 3D. Inspiré par la 3D Bubble, le Depth Ray et le rayon de longueur ajustable introduit par Ro *et al.*, nous proposons *RayCursor*, une technique combinant plusieurs des avantages que ces techniques offrent, sans introduire d'étapes de désambiguïsation supplémentaires que de nombreuses techniques requièrent.

3 RAYCURSOR

Nous décrivons la conception de *RayCursor*, une amélioration de *Raycasting*. Tout d'abord, nous ajoutons un curseur sur le rayon, que l'utilisateur peut manipuler. Ensuite, nous ajoutons une stratégie consistant à sélectionner la cible la plus proche du curseur, de la même manière que Bubble Cursor (Grossman & Balakrishnan, 2005; Vanacken et al., 2007). Nous évoquons différentes variantes de retours visuels, inspirés des travaux de Guillon *et al.* pour la 2D (Guillon et al., 2015). Ensuite, nous décrivons différentes fonctions de transfert possibles pour le contrôle du curseur. Enfin, nous détaillons les techniques de filtrage que nous avons utilisées pour réduire les effets des tremblements du rayon, en utilisant le *1€ Filter* (Casiez, Roussel, & Vogel, 2012).

3.1 Ajout d'un curseur sur le rayon

L'idée d'un curseur contrôlable a été introduite par Ro *et al.* pour sélectionner des cibles dans des environnements de réalité augmentée en utilisant un téléphone mobile (Ro et al., 2017). Cependant, cette technique n'a pas été conçue pour faciliter le choix de petites cibles. Au lieu d'utiliser un téléphone portable, l'utilisateur de *RayCursor* effectue des déplacements vers l'avant ou vers l'arrière sur le pavé tactile d'un contrôleur Vive situé sous son pouce. Il serait possible d'implémenter cette technique sur n'importe quel autre contrôleur à 6 ddl ayant

au moins un degré de liberté supplémentaire tel qu'une molette.

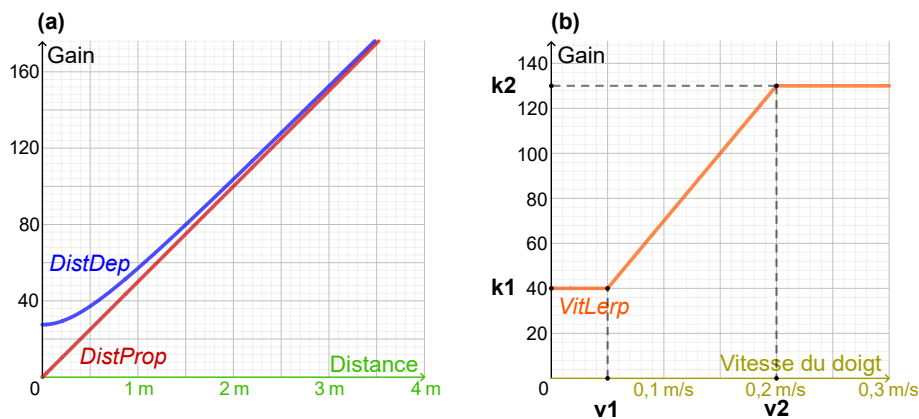
3.2 Fonction de transfert pour le contrôle du curseur

La fonction de transfert, qui calcule les déplacements du curseur, est un aspect essentiel de la technique d'interaction. En effet, des recherches antérieures ont montré que la fonction de transfert influence les performances de pointage (Casiez & Roussel, 2011). Nous considérons deux variables pour la conception de la fonction de transfert :

- v_{pad} la vitesse du point de contact sur le pavé tactile en m/s . Il s'agit d'une variable habituelle pour des fonctions de transfert non linéaires.
- d_{cur} la distance entre la manette et le curseur en m . Il s'agit de la distance dans l'espace virtuel, c'est-à-dire la distance entre la représentation virtuelle de la manette et le curseur. Nous utilisons cette variable car la vitesse du curseur projetée à l'écran paraît d'autant plus importante que celui-ci est proche de l'utilisateur. Nous émettons l'hypothèse que des fonctions de transfert exploitant d_{cur} influencent le temps de sélection.

La vitesse du curseur est donc $v_{cur} = g(v_{pad}, d_{cur}) \times v_{pad}$. Nous proposons plusieurs fonctions de transfert, que nous évaluons dans le cadre d'une expérience dédiée.

Figure 2. Courbes des fonctions de gain en fonction de (a) la distance manette-curseur et de (b) la vitesse du doigt sur le pad.



3.2.1 Fonction de transfert dépendant de la vitesse du doigt

Les fonctions de transfert non linéaires usuelles adaptent la vitesse du curseur à celle du périphérique d'entrée (Casiez & Roussel, 2011), de manière à tirer parti des phases balistique et corrective d'une tâche de pointage. Pendant la phase balistique, l'utilisateur cherche à se déplacer aussi vite que possible pour se rapprocher de la cible alors que dans la phase corrective, l'utilisateur a généralement besoin d'être précis pour sélectionner la cible. Pour ce faire, les fonctions de transfert non linéaires utilisent un gain plus faible à basse vitesse et un gain plus élevé à haute vitesse. Nous avons conçu cette fonction de transfert comme une interpolation linéaire bornée (voir Figure 2 (b)) :

$$VitLerp(v_{pad}) = \begin{cases} k_1 & \text{si } x \leq v_1 \\ k_2 & \text{si } x \geq v_2 \\ k_1 + \frac{k_2 - k_1}{v_2 - v_1}(v_{pad} - v_1) & \text{sinon} \end{cases}$$

3.2.2 Fonction de transfert dépendant de la position du curseur

Avec une fonction de transfert qui utilise un gain constant, la vitesse du curseur affiché à l'écran semble dépendre de sa distance à l'utilisateur dans l'espace virtuel : plus rapide quand il est proche, et plus lente quand il est éloigné. Nous avons d'abord conçu une fonction de transfert

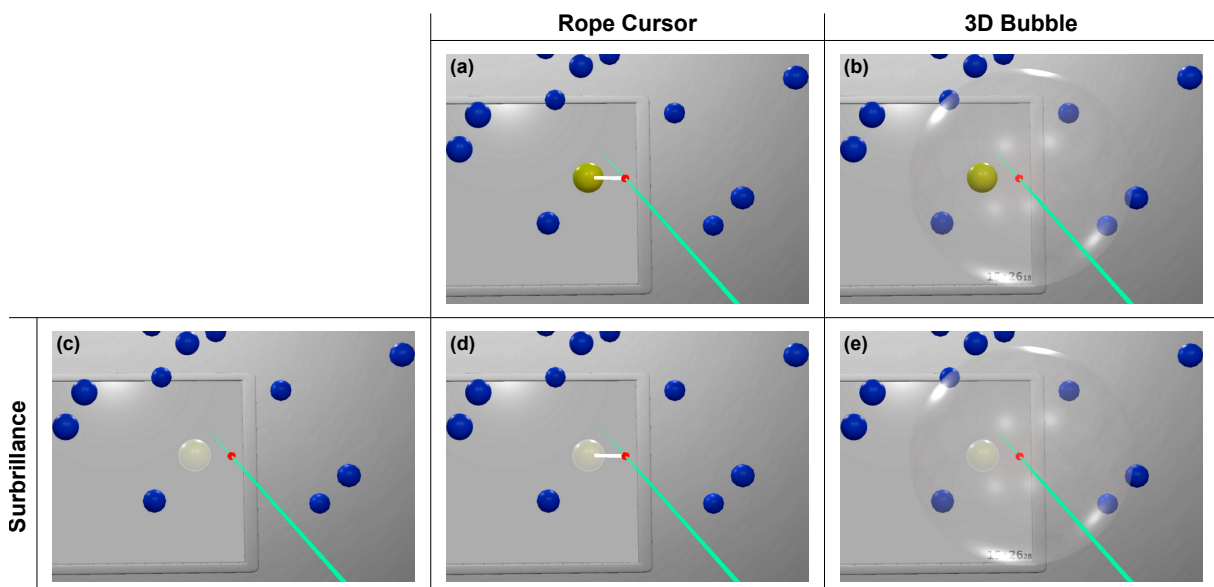
basée sur un gain qui est proportionnel à la distance du curseur par rapport au contrôleur dans l'espace virtuel, pour atténuer ce problème (voir *DistProp* dans la Figure 2 (a)). Bien que cette fonction permette de rendre visuellement cohérente la vitesse de déplacement du curseur à des positions moyennes et éloignées, elle provoque des déplacements trop lents lorsque le curseur est très proche du contrôleur. Nous avons donc développé une deuxième version de cette fonction appelée *DistDep* (voir Figure 2 (a)), qui garantit un gain minimum pour des distances plus proches. La formule de cette fonction est la suivante, avec k un facteur de proportionnalité, d_{cur} la distance entre le contrôleur et le curseur, et d une constante correspondant à une distance estimée entre l'œil de l'utilisateur et la manette :

$$DistDep(d_{cur}) = k \times \sqrt{d_{cur}^2 + d^2}$$

3.3 Retours visuels

Les travaux de Guillon *et al.* ont montré une influence du retour visuel rétroactif sur l'efficacité du pointage avec la technique *Bubble Cursor* pour le pointage 2D (Guillon *et al.*, 2015). L'étude de Vanacken *et al.* sur le 3D Bubble ne prenait en compte que le retour visuel de la bulle (Vanacken *et al.*, 2007). Nous adaptons à la 3D les retours visuels conçus par Guillon *et al.* pour l'interaction 2D. Nous décrivons ci-dessous ces retours visuels selon deux dimensions : la mise en évidence de la cible et la représentation de la distance entre le curseur et la cible la plus proche.

Figure 3. RayCursor avec différents retours visuels. Le curseur est rouge et le rayon est cyan. (c,d,e) Surbrillance : la cible la plus proche est mise en surbrillance. (a,d) Rope Cursor (Guillon *et al.*, 2015) : une ligne blanche relie le curseur à la cible la plus proche. (b,e) 3D Bubble (Vanacken *et al.*, 2007) : une bulle 3D centrée sur le curseur, adapte son rayon pour englober la cible la plus proche.



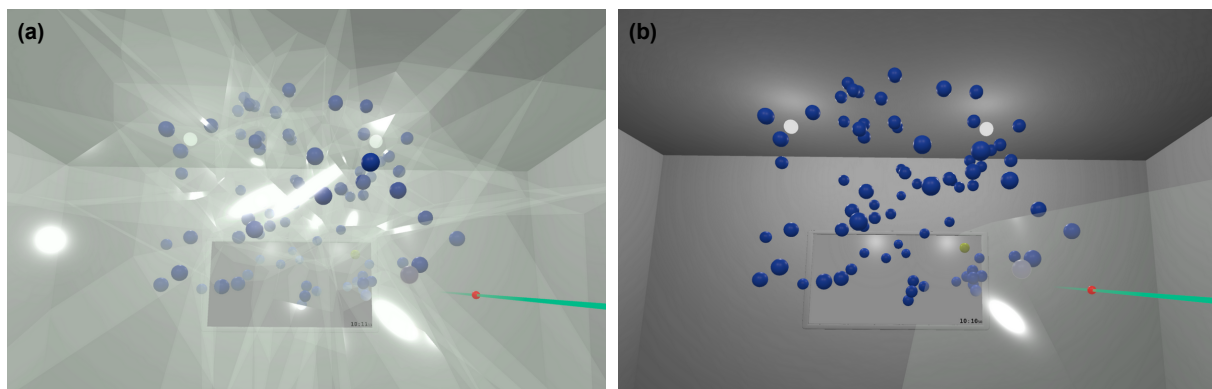
3.3.1 Surbrillance de la cible

Dans notre implémentation, la mise en évidence de la cible la plus proche consiste à appliquer une couleur plus claire que les autres cibles (Figure 3 (c,d,e)). L'avantage de ce retour visuel par rapport aux suivants est que l'encombrement visuel est minimal. Nous pouvons également le combiner avec d'autres retours visuels.

3.3.2 Représentation de la distance cible-curseur

Représenter la distance entre le curseur et la cible la plus proche est susceptible d'aider à déterminer la cible qui peut être sélectionnée à l'aide du curseur. Il existe plusieurs manières de représenter cette distance. Dessiner une sphère semi-transparente, centrée sur le curseur et dont le rayon est la distance *cible-curseur*, est une adaptation 3D du *Bubble Cursor* (Figure 3 (b,e)). Guillon *et al.* ont également proposé le *Rope Cursor*, que nous adaptons à la 3D en affichant un segment blanc entre le curseur et la cible la plus proche (Figure 3 (a,d)). Ce retour visuel provoque moins d'encombrement visuel que la bulle. Une autre proposition de Guillon *et al.* est la région de Voronoï de chaque cible. Ces régions représentent les zones d'influence de chaque cible, en prenant en compte les distances entre elles. Bien que nous ayons implémenté cette rétroaction visuelle sous forme de volumes semi-transparentes, nous l'avons rejetée parce que l'encombrement visuel créé la rend difficile à utiliser (Figure 4).

Figure 4. RayCursor avec le retour visuel représentant les régions de Voronoï. (a) Affichage simultané de toutes les régions de Voronoï. (b) Affichage de la région de Voronoï de la cible la plus proche.



Dans la section 5.1, nous présentons une étude comparative entre les retours visuels suivants ainsi que des combinaisons entre eux (Figure 3) : *3D Bubble*, *Rope Cursor* et *Surbrillance*.

3.4 Filtrage du rayon

La précision de la sélection des petites cibles est un problème courant avec *Raycasting*. Elle est due à la fois à des tremblements de la main et à des entrées bruitées. Bowman *et al.* (Bowman, Wingrave, Campbell, Ly, & Rhoton, 2002) décrivent aussi un autre problème, qu'ils ont nommé « l'effet Heisenberg de l'interaction spatiale », qui correspond au décalage accidentel du rayon lors de l'action de sélection (appui sur un bouton). Nous proposons de réduire ces problèmes en filtrant le rayon. Nous appliquons le filtrage, à la fois pour *Raycasting* et notre technique, en utilisant le *1€ Filter* car il est rapide, simple à régler, et offre un bon compromis entre réduction du bruit et introduction de latence. Nous avons conçu deux modes de filtrage. Dans le premier mode, nous filtrons l'orientation du rayon mais uniquement pour calculer l'intersection avec des objets virtuels. Le rayon affiché n'est pas filtré. Nous appelons ce mode $1\epsilon_M$, car le rayon est seulement filtré dans l'espace moteur. Dans le second mode, nous filtrons l'orientation du rayon dans les espaces moteur et visuel ($1\epsilon_{VM}$). L'avantage de $1\epsilon_M$ par rapport à $1\epsilon_{VM}$ est que l'utilisateur ne subit absolument aucun temps de latence supplémentaire mais bénéficie quand même du filtrage pour le point d'intersection du rayon avec des objets. En revanche, avec $1\epsilon_{VM}$, l'utilisateur dispose d'un retour visuel plus cohérent sur les résultats de ses actions.

Nous décrivons une étude comparative de ces deux modes de filtrage et un *Raycasting* non filtré dans la section 5.3.

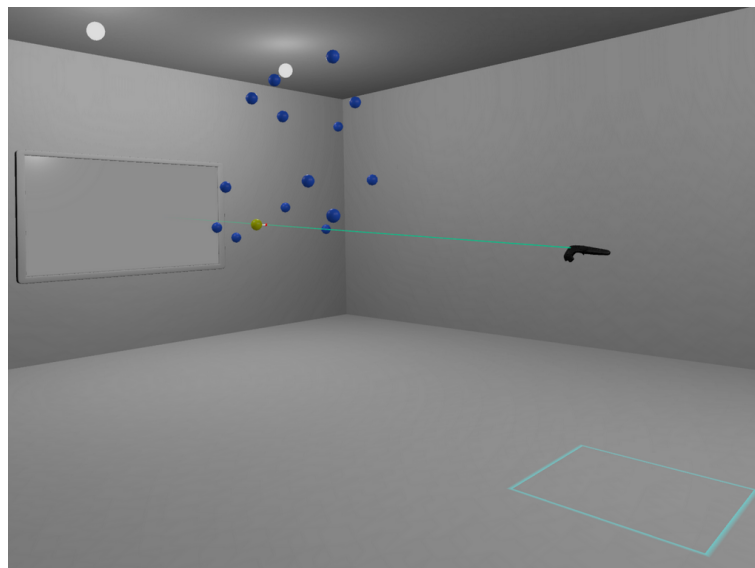
4 CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE GÉNÉRALE

Toutes les expériences de cet article se basent sur la même configuration telle que décrite dans cette section.

4.1 Matériel

Pour nos expériences, nous avons utilisé un ordinateur équipé d'un casque de réalité virtuelle *HTC Vive* (Vive, 2019). Les participants manipulaient le contrôleur HTC Vive avec leur main dominante, et n'avaient pas le droit d'utiliser l'autre. Le rayon était contrôlé par les 6 degrés de liberté de mouvement du contrôleur, et le curseur était manipulé par le pouce sur le pavé tactile (Figure 1). La sélection était effectuée au moment de l'appui sur la gâchette du contrôleur, en utilisant l'index. L'application de l'expérience a été développée en *C#* avec *Unity 3D* et la librairie *SteamVR*.

Figure 5. Scène 3D utilisée pour les expériences. Le participant était debout dans le carré cyan tracé au sol. Les instructions étaient affichées sur l'écran virtuel en face de lui. Les cibles étaient positionnées entre l'utilisateur et l'écran virtuel.



4.2 Tâches

Sauf indication contraire, les participants devaient se conformer aux instructions suivantes dans toutes les expériences. Ils devaient se tenir au milieu d'une pièce carrée de 7 m de côté. La position exacte était indiquée par un carré sur le sol de 70 cm de côté. Les instructions de l'expérience étaient affichées sur un écran virtuel devant l'utilisateur (Figure 5). Nous avons demandé aux participants de sélectionner des cibles à différentes positions, tailles et densités, en fonction des conditions expérimentales. Toutes les cibles étaient visibles lorsque l'utilisateur regardait le mur virtuel avec l'écran virtuel. Afin de permettre une comparaison équitable des temps d'exécution et des taux d'erreur entre les conditions, nous avons généré, avant les expériences, une séquence unique de cibles pour chaque condition, utilisée pour tous les participants, toutes les techniques et tous les blocs. L'ordre des techniques était contrebalancé entre les participants en utilisant un carré latin.

Toutes les cibles étaient bleues sauf celle qui devait être sélectionnée, qui était jaune. Le participant pouvait sélectionner une cible en appuyant sur la gâchette. Une vibration de 10 ms du contrôleur informait le participant lorsque la bonne cible est sélectionnée. Lorsqu'un participant ne sélectionnait pas la bonne cible, le contrôleur vibrait pendant 200 ms, la cible correcte clignotait en vert, la mauvaise cible sélectionnée clignotait en rouge (sauf lorsque l'utilisateur ne sélectionnait aucune cible avec *Raycasting*), et l'essai était marqué comme une erreur. Les par-

participants ne pouvaient pas passer à la cible suivante avant d'avoir correctement sélectionné la cible en cours. Le taux d'erreur a été calculé comme étant le rapport entre le nombre total d'essais pour lesquels la bonne cible n'a pas été sélectionnée à la première tentative et le nombre total d'essais. Nous avons demandé aux participants de maintenir un taux d'erreur d'environ 4% afin d'équilibrer leur compromis vitesse/précision. Le taux d'erreur était affiché sur l'écran virtuel pendant les pauses.

Les participants répondaient à un questionnaire NASA-TLX pour chaque technique ou fonction testée. Nous utilisons ce questionnaire comme indicateur de la charge de travail de l'utilisateur. À la fin de l'expérience, l'utilisateur devait aussi choisir sa technique préférée.

5 ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DE RAYCURSOR

Nous présentons une série d'expériences pour évaluer chacune des caractéristiques de *RayCursor*. Nous commençons par l'étude de différents retours visuels pour indiquer la cible à sélectionner, car elle nous a semblé être la caractéristique la plus susceptible d'affecter les performances. Nous évaluons ensuite les différentes fonctions de transfert que nous avons conçues et évaluons l'effet du filtrage du rayon.

5.1 Retours visuels

Nous avons proposé plusieurs retours visuels, basés sur les travaux existants sur des techniques similaires d'interaction 2D et 3D (Grossman & Balakrishnan, 2005 ; Guillon et al., 2015 ; Vanacken et al., 2007). L'étude de Guillon *et al.* sur le cas 2D a conclu que la mise en surbrillance de la cible la plus proche est le retour le plus efficace, tout en limitant l'encombrement visuel. Nous décrivons une étude similaire qui compare des versions 3D de ces retours visuels, avec *Raycasting* comme condition témoin. Étant donné les travaux existants en 2D, notre hypothèse est que la mise en surbrillance de la cible la plus proche est le retour le plus efficace en 3D (H1). Nous avons utilisé la fonction de transfert *DistDep* pour contrôler le curseur, et le rayon n'a été filtré dans aucune des conditions.

5.1.1 Méthodologie

Douze participants (tous droitiers, âge moyen=26, $\sigma = 4,3$) ont pris part à cette expérience. Pour deux d'entre eux il s'agissait de leur première expérience de réalité virtuelle.

Nous avons utilisé un protocole expérimental intra-sujet, avec les facteurs : TECHNIQUE, DENSITÉ de cibles, TAILLE des cibles et BLOC. Les 6 techniques sont *Raycasting* (RC) en tant que référence, ainsi que *RayCursor* avec les 5 retours visuels décrits Figure 3 : *RopeCursor* (Rope), *Surbrillance* (HL), *3DBubble* (Bub), *3DBubble+Surbrillance* (Bub+HL), *RopeCursor+Surbrillance* (Rope+HL). L'ordre des techniques a été équilibré entre les participants à l'aide d'un carré latin. Les 2 tailles de cibles étaient $S_{Grande} = 8$ cm et $S_{Petite} = 4$ cm. Les deux densités de cibles étaient de 15 cibles (D_{Faible}) et 40 cibles ($D_{Elevée}$). Toutes les cibles étaient positionnées de manière pseudo-aléatoire dans une sphère de 2m de diamètre, dont le centre était positionné à 2m devant le participant.

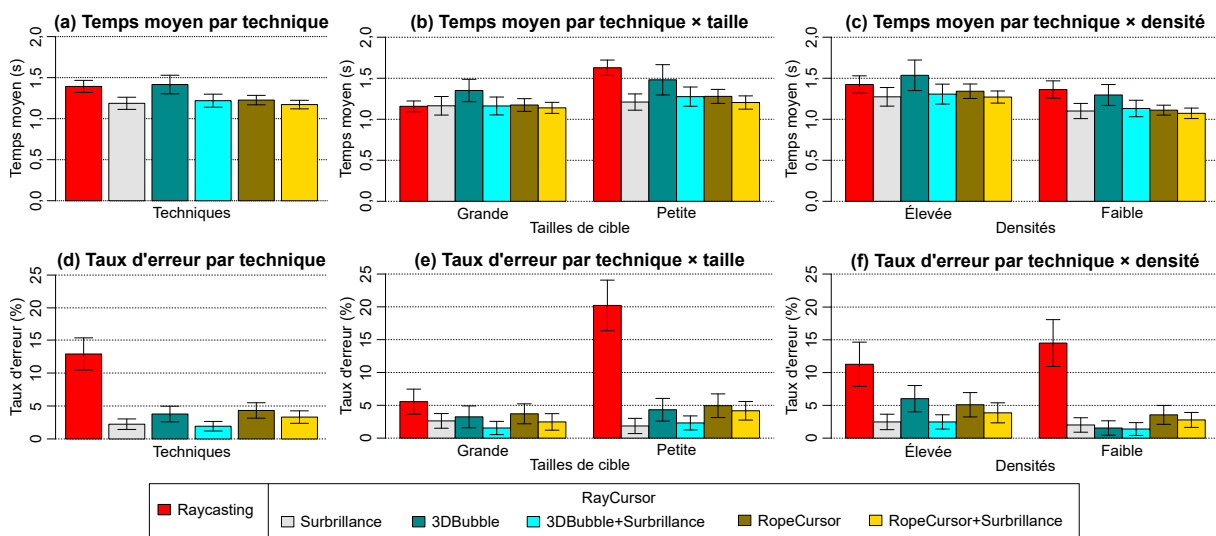
Les participants pouvaient prendre des pauses entre chaque bloc. Le protocole expérimental de l'expérience était donc : 12 participants \times 6 TECHNIQUES \times 3 BLOCS \times 2 DENSITÉS \times 2 TAILLES \times 10 cibles = 8640 essais au total. L'expérience durait environ 30 minutes par participant.

5.1.2 Résultats

Nos deux variables dépendantes sont le temps de sélection et le taux d'erreur.

Temps de sélection Dans cette analyse, le temps de sélection correspond au temps écoulé entre deux sélections. Par conséquent, le premier essai de chaque séquence de 10 cibles est écarté, de même que les essais entraînant une erreur. Nous avons appliqué une transformation

Figure 6. Temps moyen et taux d'erreur relevés lors de l'expérience sur les retours visuels, avec représentation des intervalles de confiance à 95 %.



de Box-Cox avec $\lambda = -1,2$ pour corriger les problème de normalité des résidus des temps de sélection (Box & Cox, 1964).

Une ANOVA² révèle un effet significatif de BLOC ($F_{1,2,12,7} = 21,2, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,04$). Les comparaisons par paires montrent des différences significatives entre le bloc 1 et les deux suivants ($p < 0,003$, Bloc 1 : 1,45s, 2 : 1,29s, 3 : 1,25s). Nous supposons que cette différence est due à un effet d'apprentissage. Nous supprimons donc le premier bloc du reste de l'analyse.

Les analyses suivantes révèlent un effet significatif de TECHNIQUE ($F_{5,55} = 5,4, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,1$). Les comparaisons par paires montrent un effet significatif entre *Raycasting* et toutes les autres techniques sauf *3DBubble* (RC : 1,39s, HL : 1,19s, Bub : 1,42s, Bub+HL : 1,22s, Rope : 1,23s, Rope+HL : 1,17s, $p < 0,027$).

Les analyses montrent un effet significatif de TAILLE ($F_{1,11} = 108,3, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,07$) et une interaction TECHNIQUE × TAILLE ($F_{5,55} = 28,1, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,05$). Les comparaisons par paires ne montrent un effet significatif entre les techniques que pour les *petites* cibles. *Raycasting* est significativement plus lent ($p < 0,0004$) que toutes les autres techniques, à part *3DBubble* (RC : 1,63s, Bub : 1,48s, HL : 1,21s, Rope : 1,28s, Rope+HL : 1,20s).

Nous observons également un effet significatif de DENSITÉ ($F_{1,11} = 176,3, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,11$) et une interaction TECHNIQUE × DENSITÉ ($F_{5,55} = 5,2, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,01$). Pour la *faible* densité, nous observons une différences significative ($p < 0,01$) entre *Raycasting* et toutes les autres techniques, excepté *3DBubble* (RC : 1,36s, Bub : 1,30s, Bub+HL : 1,13s, HL : 1,10s, Rope : 1,11s, Rope+HL : 1,07s).

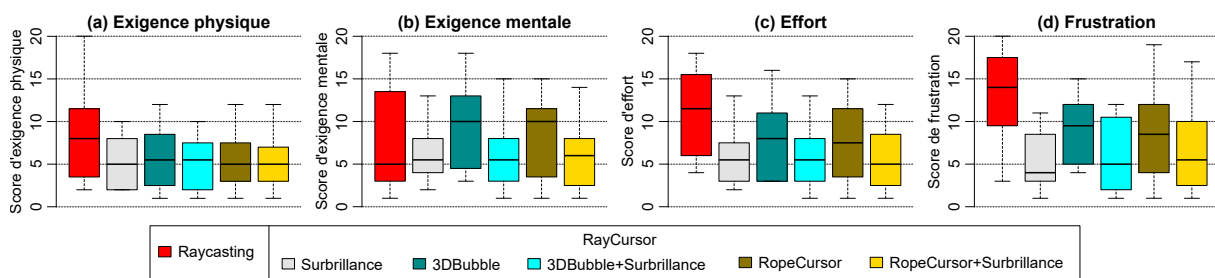
Taux d'erreur Le taux d'erreur global est de 4,7%, sachant que les participants avaient pour instruction de rester autour de 4%. Les données ont été pré-traitées à l'aide d'une Aligned Rank Transform (ART) pour tenir compte de leur distribution non normale (Wobbrock, Findlater, Gergle, & Higgins, 2011). L'ANOVA à mesures répétées révèle un effet significatif de TECHNIQUE ($F_{5,829} = 30,3, p < 0,001$). Les comparaisons par paires montrent un effet significatif entre *Raycasting* (12,9%) et toutes les autres techniques. (HL : 2,2%, Bub : 3,8%, Bub+HL : 1,9%, Rope : 4,3%,

2. Toutes les analyses statistiques des 4 expériences ont été effectuées avec R, avec $\alpha = 0,05$ et la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée aux degrés de liberté quand la sphéricité était violée. Nous avons utilisé la correction de Bonferroni, dans laquelle la p -value était multipliée par le nombre de comparaisons. Les analyses statistiques détaillées sont disponibles à l'adresse ns.inria.fr/loki/raycastor.

Rope+HL : 3,3%, $p < 0,006$). Nous observons aussi un effet significatif de TAILLE ($F_{1,829} = 140,7$, $p < 0,0001$) et une interaction TECHNIQUE \times TAILLE ($F_{5,829} = 26,4$, $p < 0,0001$). Les comparaisons par paires montrent que le taux d'erreur de *Raycasting* est significativement plus élevé pour des *petites* cibles (20,2%) que pour des *grandes* cibles (5,6%). Pour les *petites* cibles, *Raycasting* a un taux d'erreur plus élevée que pour toutes les autres techniques ($< 5\%$, $p < 0,0001$). Les analyses montrent aussi une interaction TECHNIQUE \times DENSITÉ ($F_{5,829} = 5,8$, $p < 0,0001$). Les comparaisons par paires montrent que *Raycasting* a un taux d'erreur plus élevé pour une *faible* densité que les autres techniques ($< 3,6\%$, $p < 0,0001$).

Questionnaire NASA-TLX L'analyse de Friedman sur les réponses au questionnaire NASA-TLX indique qu'il y a un effet significatif pour l'exigence physique ($\chi^2(5) = 18,7$, $p = 0,002$), l'exigence mentale ($\chi^2(5) = 12,1$, $p = 0,03$), l'effort ($\chi^2(5) = 23,8$, $p = 0,0002$) et la frustration ($\chi^2(5) = 25,6$, $p = 0,0001$). L'analyse post-hoc de Wilcoxon révèle que le niveau de frustration est significativement plus élevé pour la technique *Raycasting* (médiane=14) que pour la technique *Surbrillance* (médiane=4, $p = 0,03$). Il n'y a pas d'autre différence significative observée pour les tests post-hocs.

Figure 7. Diagrammes en boîte des réponses aux critères « Exigence physique », « Exigence mentale », « Effort » et « Frustration » au questionnaire NASA-TLX de la première expérience, pour chaque technique.



Préférences des participants Chaque participant a pu choisir sa technique préférée parmi les 6 testées. Les résultats montrent que les participants ont préféré les techniques avec la mise en surbrillance activée (3 à 4 votes pour chaque) tandis que les autres, *Raycasting* inclus, n'ont reçu qu'un seul vote ou aucun.

5.1.3 Discussion

Les résultats montrent que tous les retours visuels utilisés avec *RayCursor* sont globalement plus efficaces que *Raycasting*. En particulier, *RayCursor* est globalement plus rapide pour les petites cibles tout en gardant un faible taux d'erreur. La mise en surbrillance de la cible la plus proche est l'un des effets visuels les plus efficaces (H1). Appliqué à *RayCursor*, il est aussi jugé moins frustrant que *Raycasting* par les utilisateurs. L'affichage d'une bulle ne permet pas d'améliorer les performances de *RayCursor* par rapport au *Raycasting*, en particulier pour les petites cibles ou les environnements denses, certainement en raison de l'encombrement visuel plus élevé qu'elle introduit. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Guillon *et al.* concernant les retours visuels en 2D.

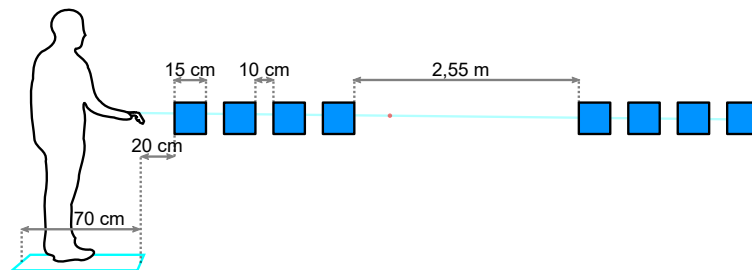
5.2 Fonction de transfert du curseur

Notre hypothèse est que le choix de la fonction de transfert utilisée influence les performances de *RayCursor* (H2). Pour vérifier H2, nous avons comparé la performance de *VitLerp*, *DistProp*, et *VitLerp* \times *DistDep* (une combinaison entre *VitLerp* et *DistDep*) avec 9 participants (tous droitiers, âge moyen=27,7, $\sigma = 6,5$). Les paramètres de chaque fonction de transfert ont été ajustés empiriquement pour maximiser les performances. Pour *VitLerp*, les paramètres étaient $k_1 = 30$, $k_2 = 150$, $v_1 = 0,05$ et $v_2 = 0,15$. Pour *DistProp*, le paramètre était $k = 50$. La

combinaison de *VitLerp* et *DistDep* (*VLDD*) consiste à multiplier les deux gains. Pour *VLDD*, les paramètres étaient $k_1 = 20$, $k_2 = 100$, $v_1 = 0,05$, $v_2 = 0,15$, $k = 1$ et $d = 0,55$.

Les variables indépendantes étaient FONCTIONS de transfert (*VitLerp*, *DistProp*, *VLDD*), POSITION de la cible (*Proche*, *Loin*), DISTANCE avec la cible précédente (*Courte*, *Longue*), et BLOC (3).

Figure 8. Positionnement des cibles dans l'espace virtuel pour l'expérience sur les fonctions de transfert.

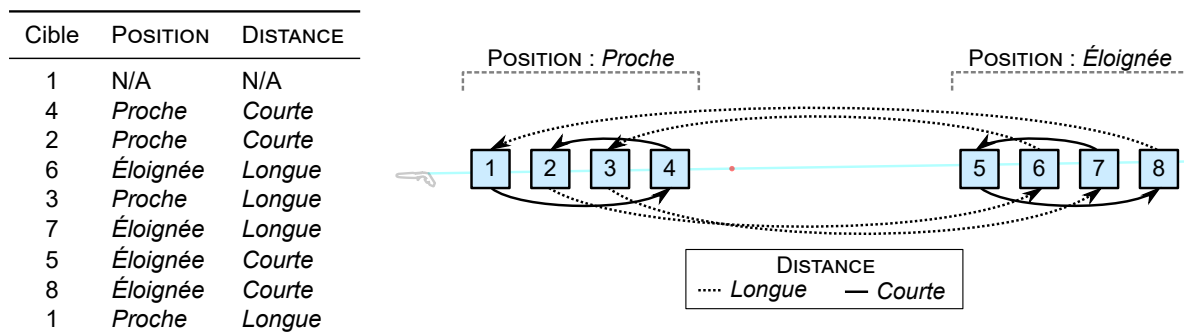


Huit cibles sous forme de cubes étaient positionnées tel que décrit Figure 8. L'utilisateur devait placer son contrôleur de manière à être aligné aux cibles, tout en restant dans le carré au sol.

Pour chaque technique, les participants enchaînaient 3 BLOCS, dans lesquels ils devaient effectuer 4 enchaînements de 9 essais. Après chaque enchaînement, les cibles disparaissaient et le taux d'erreur depuis le début de la technique courante était affiché à l'écran virtuel. L'utilisateur devait appuyer sur la gâchette pour passer à la suite.

L'ordre des cibles pour les 4 enchaînements était défini de manière à ce qu'il y ait le même nombre d'essais pour chaque condition de POSITION×DISTANCE, tel que montré en exemple Figure 9. Les 4 enchaînements étaient identiques pour tous les blocs, toutes les fonctions de transfert et tous les participants. L'ordre des fonctions de transfert était contrebalancé entre les participants en utilisant un carré latin.

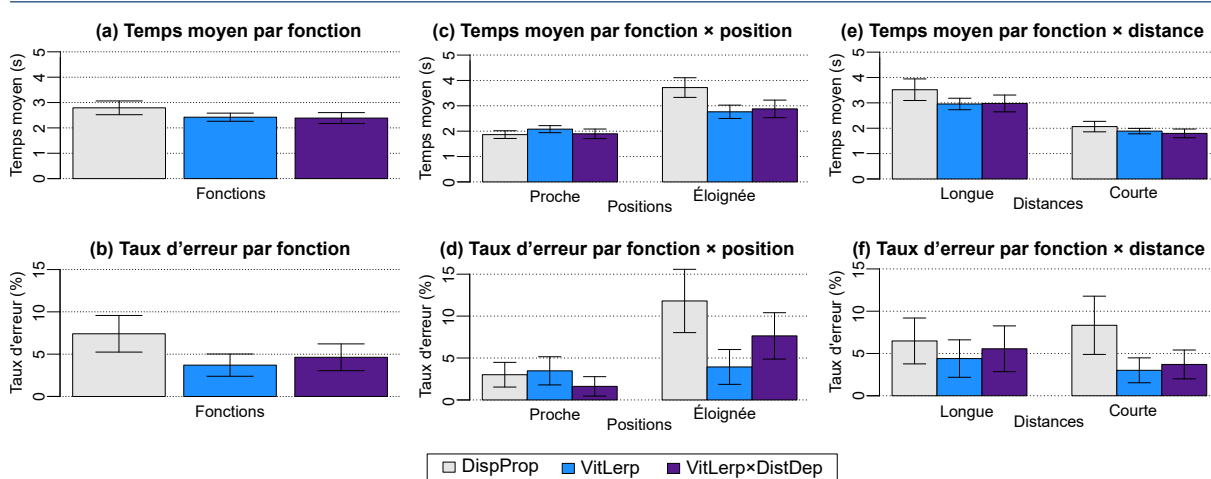
Figure 9. Exemple d'enchaînement de cibles pour parcourir les niveaux des variables indépendantes Position et Distance.



Nous avons en résumé un plan expérimental de 9 participants × 3 FONCTIONS × 3 BLOCS × 2 POSITIONS × 2 DISTANCES × 9 essais = 2 916 essais au total. L'expérience durait environ 20 minutes par participant.

Temps de sélection Nous avons utilisé une transformation Box-Cox ($\lambda = -0,4$) pour corriger les problèmes de normalité des résidus des temps de sélection. Une ANOVA à mesures répétées montre un effet significatif de FONCTION ($F_{2,16} = 3,8$, $p = 0,046$, $\eta_G^2 = 0,07$). Les comparaisons par paires montrent une différence significative marginale entre *DistProp* et *VLDD* (*DP* : 2,79s; *VLDD* : 2,39s; $p = 0,05$). *DistProp* est légèrement plus lente en moyenne que *VLDD*. Nous observons aussi un effet significatif de POSITION ($F_{1,8} = 223$, $p < 0,001$, $\eta_G^2 = 0,55$) et une interaction

Figure 10. Temps moyen et taux d'erreur pour l'expérience sur les fonctions de transfert, avec représentation des intervalles de confiance à 95 %.



de FONCTION×POSITION ($F_{2,16}=25,1, p<0,001, \eta_G^2=0,16$). Aucune différence significative n'a été observée pour une position *Proche*. Cependant, pour la position *Loin*, les comparaisons par paires montrent une différence significative entre *DistProp* (3,72s) et les deux autres fonctions (VL : 2,76s ; VLDD : 2,88s ; $p<0,002$).

Taux d'erreur Nous avons pré-traité les données à l'aide d'une ART pour prendre en compte leur distribution non-normale. Une ANOVA à mesures répétées montre un effet significatif de FONCTION ($F_{2,304} = 4,55, p < 0,0004$). Les comparaisons par paires montrent un effet significatif entre *DistProp* et *VitLerp* (DP : 7,4% ; VL : 3,7% ; $p < 0,002$). Les participants font généralement moins d'erreurs avec *VitLerp* qu'avec *DistProp*. Nous observons aussi un effet significatif de POSITION ($F_{1,304} = 29,6, p < 0,001$), et une interaction de FONCTION×POSITION ($F_{2,304} = 12,9, p < 0,0001$). Les comparaisons par paires ne montrent pas de différence significative entre les fonctions de transfert pour des cibles *Proches*. Cependant, nous observons une différence significative pour des cibles éloignées de l'utilisateur entre *DistProp* et *VitLerp* (DP : 11,8% ; VL : 3,9% ; $p < 0,008$).

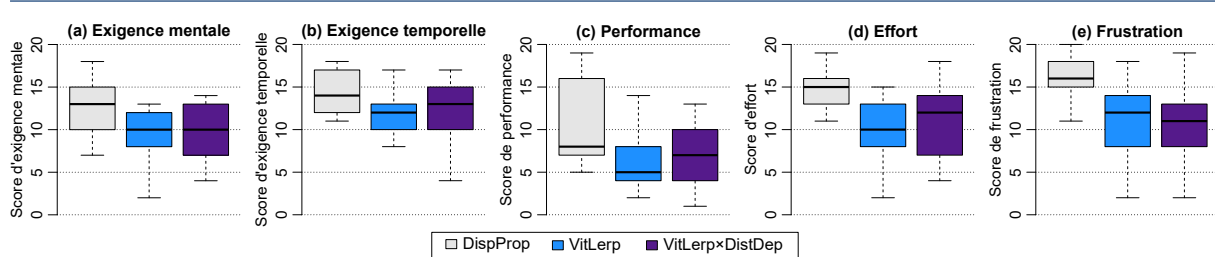
Questionnaire NASA-TLX L'analyse de Friedman sur les réponses au questionnaire NASA-TLX indique qu'il y a un effet significatif pour l'exigence mentale ($\chi^2(2)=8,24, p=0,01$), l'exigence temporelle ($\chi^2(2) = 7,93, p = 0,02$), la performance ($\chi^2(2) = 8,63, p = 0,01$), l'effort ($\chi^2(2) = 11,0, p = 0,004$) et la frustration ($\chi^2(5) = 12, p = 0,002$). L'analyse post-hoc de Wilcoxon révèle que le niveau de frustration est significativement plus élevé pour *DistProp* (médiane= 16) que pour *VitLerp×DistDep* (médiane= 11, $p = 0,045$). Il n'y a pas d'autre différence significative observée pour les tests post-hocs.

Préférences des participants Chaque participant a pu choisir sa technique préférée parmi les 3 testées. Les résultats montrent que les participants ont préféré les fonctions de gain *VitLerp* et *VitLerp×DistDep* (4 à 5 votes pour chaque) tandis que la fonction *DistProp* n'a reçu aucun vote.

5.2.1 Discussion

En conclusion, la fonction de transfert influence les performances de *RayCursor* (H2 confirmée) : *VitLerp* est plus rapide et plus efficace que *DistProp* pour les cibles éloignées de l'utilisateur et est globalement la fonction la plus efficace.

Figure 11. Diagrammes en boîte des réponses aux critères « Exigence mentale », « Exigence temporelle », « Performance », « Effort » et « Frustration » au questionnaire NASA-TLX de la dernière expérience, pour chaque fonction.



5.3 Filtrage du rayon

Dans les expériences précédentes, les petites cibles étaient difficiles à sélectionner à cause des tremblements de la main et des entrées bruitées. Dans cette expérience, nous voulons vérifier l'hypothèse que filtrer le rayon réduit les erreurs de sélection pour *Raycasting* (H3). Bien que le filtrage a déjà été utilisé dans la littérature pour filtrer un rayon (Kopper et al., 2011 ; Vogel & Balakrishnan, 2005), il était utilisé dans un contexte où ce rayon intersecte un écran physique. Nous n'avons pas trouvé de travaux évaluant formellement les effets du filtrage sur le taux d'erreur et le temps de sélection de *Raycasting*. Vogel et al. et Kopper et al. ont tous les deux utilisé ce qui correspond à une version primitive du *1€ Filter* (Casiez et al., 2012). Nous l'avons aussi utilisé car il semble fournir un bon compromis entre un bon filtrage et une faible latence. Dans cette expérience, nous considérons uniquement des cibles éloignées, ce qui est la situation la plus difficile.

5.3.1 Méthodologie

Neuf participants (tous droitiers, age moyen=26,9, $\sigma = 6,25$) ont pris part à cette expérience. Tous avaient déjà eu une expérience en réalité virtuelle.

Nous avons utilisé un protocole expérimental intra-sujet. Les variables indépendantes sont : TECHNIQUE et BLOC. Les trois techniques sont décrites section 3.4 : *Raycasting* non filtré (RC), *Raycasting* filtré dans l'espace moteur ($1€_M$) et *Raycasting* filtré dans l'espace visuel et moteur ($1€_{VM}$). L'ordre des 3 techniques a été contre-balancé entre les participants en utilisant un carré latin. Nous avons fixé les paramètres du *1€ Filter* à $min_{cutoff} = 0,1$ et $\beta = 50$ suite à des évaluations empiriques, de manière à réduire les tremblements tout en minimisant la latence. La cible sélectionnable était mise en surbrillance, en accord avec l'expérience sur le retour visuel. Pour chaque technique, les participants devaient réaliser 5 BLOCS de 20 cibles.

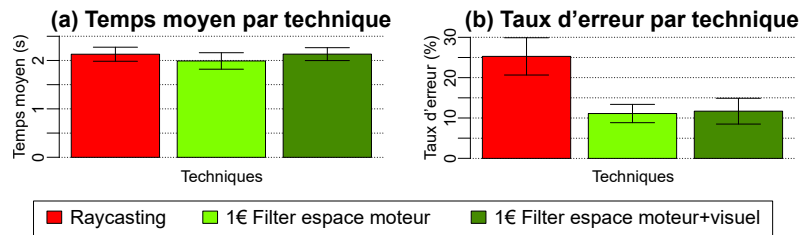
En résumé, le protocole expérimental était : 9 participants \times 3 TECHNIQUES \times 5 BLOCS \times 20 essais = 2700 essais au total. L'expérience durait environ 15 minutes par participant.

5.3.2 Résultats

Nous analysons le temps de sélection et le taux d'erreur pour étudier les effets du filtrage. Il y avait une interruption entre les blocs, nous avons donc retiré le premier essai de chaque bloc de l'analyse. Pour le temps de sélection, nous avons également écarté les essais ayant donné lieu à une erreur.

Temps de sélection Nous avons appliqué une transformation de Box-Cox ($\lambda = -0.2$) pour corriger les problèmes de normalité des résidus des temps de sélection. Une ANOVA à mesures répétées² ne montre aucun effet de BLOC ($F_{4,32} = 2,2, p = 0,09$) ni d'effet de TECHNIQUE ($F_{1,2,9,8} = 2,0, p = 0,18$).

Figure 12. Temps moyen et taux d'erreur résultants de l'expérience sur le 1€ Filter, avec représentation des intervalles de confiance à 95 %.

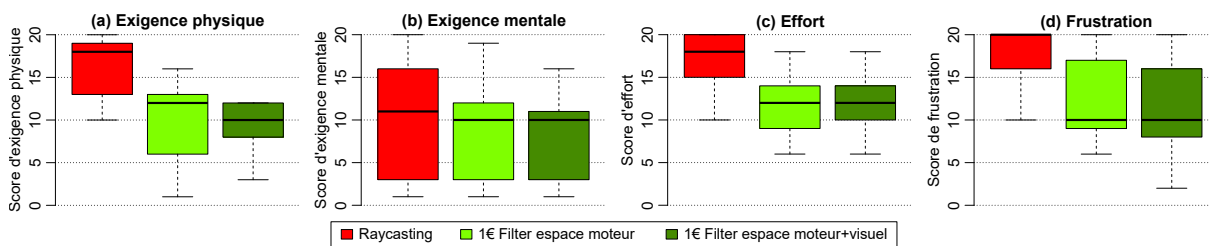


Taux d'erreur Le taux d'erreur global est de 16,02%, alors que les participants devaient rester autour de 4%. Nous avons appliqué une transformation logarithmique pour corriger les résidus de taux d'erreur non normaux. Les analyses ne montrent pas d'effet significatif de BLOC ($F_{4,32} = 0,94, p > 0,05$). Cependant, nous observons un effet significatif de TECHNIQUE ($F_{2,16} = 12,2, p < 0,001, \eta_G^2 = 0,21$). Les comparaisons par paires montrent un effet significatif entre le *Raycasting* sans filtre (25,2%) et les autres techniques (1€_{VM} : 11,7%, 1€_M : 11,1%, $p < 0,0001$).

Questionnaire NASA-TLX L'analyse de Friedman sur les réponses au questionnaire NASA-TLX ne révèle pas d'effet significatif pour l'exigence physique ($\chi^2(2) = 15,8, p = 0,0003$), l'exigence mentale ($\chi^2(2) = 11,1, p = 0,003$), l'effort ($\chi^2(2) = 13,7, p = 0,001$) et la frustration ($\chi^2(2) = 11,0, p = 0,004$).

L'analyse post-hoc de Wilcoxon révèle que le niveau d'exigence physique est significativement plus élevé pour *Raycasting* (médiane=18) que pour 1€_{VM} (médiane=10; $p = 0,015$), et que le niveau d'effort est significativement plus élevé pour *Raycasting* (médiane=18) que pour 1€_M (médiane=12; $p = 0,049$). Les tests post-hocs ne montrent pas d'autre différence significative.

Figure 13. Diagrammes en boîte des réponses aux critères « Exigence physique », « Exigence mentale », « Effort » et « Frustration » au questionnaire NASA-TLX de la deuxième expérience pour chaque technique.



Préférences des participants Chaque participant a pu choisir sa technique préférée parmi les 3 testées. Les résultats montrent que les participants ont largement préféré la technique avec le rayon filtré par 1€ Filter dans l'espace visuel et moteur (7 votes) suivi par le rayon filtré par 1€ Filter dans l'espace moteur seulement (2 votes) et aucun vote pour le *Raycasting*.

5.3.3 Discussion

Les résultats montrent que filtrer le rayon avec le 1€ Filter réduit les erreurs de sélection de plus de 50% (H3 confirmée). Lorsque le rayon est filtré dans l'espace moteur, le fait que le rayon soit aussi filtré dans l'espace visuel ou non n'influence pas le taux d'erreur. Cependant, nos discussions avec les participants révèlent que 7/9 préfèrent que l'espace visuel et l'espace moteur soient tous les deux filtrés. Qualitativement, nous avons observé que le filtrage réduit l'exigence physique, ainsi que l'effort nécessaire pour réaliser la tâche.

5.4 Discussion

Parmi les retours visuels que nous avons proposés pour *RayCursor*, les plus efficaces d'entre eux montrent la cible qui sera sélectionnée sans ambiguïté. C'est le cas notamment pour toutes celles qui utilisent la mise en surbrillance et le Rope Cursor. Bien que plusieurs des retours visuels aient des performances similaires, nous suggérons de simplement mettre en surbrillance la cible la plus proche, puisqu'il s'agit du retour visuel avec le moins d'encombrement visuel. Ceci suggère également que la technique 3DBubble (Vanacken et al., 2007) bénéficierait certainement aussi de ce type de retour visuel.

Nos études sur la fonction de transfert pour contrôler le curseur ont montré qu'une fonction non linéaire de la vitesse du curseur était la plus efficace. Ceci est en accord avec la littérature et les fonctions de transfert courantes pour les souris d'ordinateur et les pavés tactiles de bureau (Casiez & Roussel, 2011). Nous avons proposé une fonction simplifiée, paramétrée avec deux seuils de vitesse d'entrée et deux gains extrêmes. Le développeur de l'application peut adapter ces paramètres en fonction de la taille du pavé tactile et des distances que l'utilisateur doit parcourir. Nous avons observé de manière informelle que les fréquents mouvements vers l'avant et vers l'arrière du curseur sur de longues distances ralentissent la technique. Cela nous a amené l'idée de combiner *Raycasting* et *RayCursor*, avec un mécanisme pour téléporter le curseur près d'un point d'intérêt, réduisant ainsi le temps de déplacement.

Enfin, nous avons montré que le filtrage du rayon diminue les erreurs de sélection. C'est à la fois bénéfique pour *Raycasting* et *RayCursor*. Bien que nos expériences aient montré que la présence ou non du filtrage dans l'espace visuel n'influence pas les performances lorsque le rayon était filtré dans l'espace moteur, la préférence des utilisateurs tend à suggérer qu'il est préférable de filtrer les deux espaces.

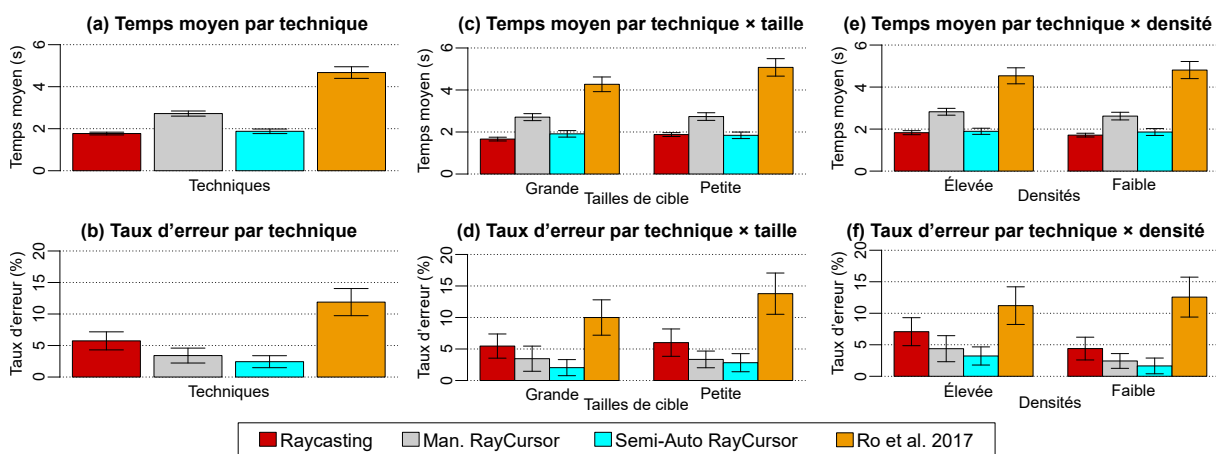
Dans ce qui suit, nous présentons une dernière expérience comparant 1) *RayCursor* utilisant la mise en surbrillance, la fonction de transfert non-linéaire qui utilise la vitesse et le rayon filtré ; 2) la même version de *RayCursor* mais utilisant un positionnement semi-automatique du curseur le long du rayon ; 3) *Raycasting* utilisant un filtrage ; et 4) une technique récente de la littérature, qui utilise un rayon de longueur ajustable (Ro et al., 2017).

6 ÉTUDE COMPARATIVE

Nous avons évalué toutes les caractéristiques de *RayCursor* et proposé des paramètres optimaux. Dans cette section, nous comparons deux variantes de la technique avec *Raycasting* et la technique la plus proche de la nôtre dans la littérature (Ro et al., 2017). Une version préliminaire de cette étude est disponible dans (Baloup, Pietrzak, & Casiez, 2019). Les deux variantes sont un contrôle manuel du curseur et un contrôle semi-automatique du curseur. La version semi-automatique (Figure 1, c-f) est un hybride entre *Raycasting* et *RayCursor*. Le contrôle automatique du curseur est activé lorsque l'utilisateur ne touche pas le pavé tactile. Dans ce mode, lorsque le rayon intersecte une cible, le curseur se déplace automatiquement sur le rayon au point d'intersection. Si le rayon sort de la cible, la cible reste sélectionnable à l'aide du mécanisme de sélection par proximité. Si une autre cible est plus proche du curseur ou intersecte le rayon, cette nouvelle cible est sélectionnée. Si l'utilisateur pose son doigt sur le pavé tactile, il peut contrôler la position du curseur comme dans la version manuelle de *RayCursor* (le contrôle automatique est désactivé). Si l'utilisateur relâche le pavé tactile plus d'une seconde, la technique revient au comportement automatique du curseur. Le délai d'une seconde laisse le temps à l'utilisateur de relever et reposer son doigt pour déplacer le curseur sur une longue distance.

Raycasting et les deux variantes de *RayCursor* sont filtrées en utilisant le *1€ Filter* avec les réglages précédemment définis. En effet, lorsque *Raycasting* n'est pas filtré, son taux d'erreur est beaucoup plus élevé que pour les autres techniques selon notre étude dans la section 5.3. Cette expérience nous permettra de mieux comprendre les améliorations de la performance du *Raycasting* lorsqu'il est filtré. Nous avons aussi implémenté la technique de Ro et al. car c'est la technique la plus proche de la nôtre (Ro et al., 2017). Cela nous permet également de

Figure 14. Temps moyen et taux d'erreur résultants de l'étude comparatif, avec représentation des intervalles de confiance à 95 %.



mesurer l'avantage direct de l'utilisation du mécanisme de sélection par proximité. Comme Ro *et al.* n'ont pas détaillé la fonction de transfert utilisée pour contrôler la longueur de leur rayon, nous avons utilisé pour leur technique la même fonction de transfert utilisée pour *RayCursor*. Notre hypothèse est que *RayCursor* avec contrôle semi-automatique du curseur est plus rapide et moins sujette aux erreurs que les autres techniques testées (H4).

6.1 Méthodologie

Douze participants (1 gaucher, age moyen=27,6, $\sigma = 5,8$) ont pris part à l'expérience. Deux d'entre eux n'ont jamais utilisé de système de réalité virtuelle avant l'expérience. Six d'entre eux ont participé à une des expériences précédentes. Le temps entre chaque expérience était d'au moins 4 semaines, ce qui nous permet de supposer que l'effet d'apprentissage était négligeable. Le plan expérimental intra-sujet a par ailleurs l'avantage de réduire les différences individuelles.

Nous avons utilisé un protocole expérimental intra-sujet, avec comme facteur : TECHNIQUE, DENSITÉ de cibles, TAILLE des cibles et BLOC. Les 4 techniques utilisées sont : *Raycasting* filtré avec 1ϵ Filter (RC_f), *RayCursor* avec le contrôle manuel du curseur ($ManRCur$), *RayCursor* avec le contrôle semi-automatique du curseur ($AutoRCur$) et la technique de Ro *et al.* (Ro *et al.*, 2017) (Ro). L'ordre des techniques a été contrebalancé entre les participants grâce à un carré latin. Les 2 tailles de cible étaient $S_{Grande} = 8cm$ et $S_{Petite} = 4cm$ de diamètre. Les 2 densités étaient de 30 cibles (D_{Faible}) et 60 cibles ($D_{Elevée}$). Les cibles étaient réparties équitablement dans 2 sphères de 60 cm de diamètre, en face de l'utilisateur, et centrées à 80 cm du sol. La première sphère était à 1m en face de l'utilisateur et la deuxième à 4m. Toutes les cibles étaient dans le champ de vision du participant lorsqu'il regardait en direction de l'écran virtuel. Le participant devait sélectionner alternativement une cible dans la sphère proche et une autre dans la sphère éloignée. Cette condition correspond à la situation la plus défavorable pour $ManRCur$ car le participant devait constamment déplacer le curseur sur de longues distances. Ceci a pour but de mettre en avant les limites de *RayCursor*.

Les participants avaient la possibilité de faire une pause entre les techniques. Le design de l'expérience était donc : 12 participants \times 4 TECHNIQUES \times 3 BLOCS \times 2 DENSITÉS \times 2 TAILLES \times 9 cibles = 5184 essais au total. L'expérience durait environ 30 min par participant.

6.2 Résultats

La figure 14 montre les taux d'erreur et les temps de sélection. Nous discutons aussi des préférences des participants.

6.2.1 Temps de sélection

Dans cette analyse, le temps de sélection correspond au temps entre deux sélections. De ce fait, le premier essai de chaque séquence de 10 cibles est ignoré, ainsi que les essais erronés. Nous avons aussi supprimé les valeurs extrêmes, lorsque les temps de sélection étaient au dessus de $mean + 3 \times sd$ pour chaque technique.

Nous avons appliqué une transformation de Box-Cox avec $\lambda = -0,3$ pour corriger les résidus de temps de sélection non normaux. Une ANOVA à mesures répétées montre un effet significatif de BLOC ($F_{2,22} = 21,3$, $p = 0,001$, $\eta_G^2 = 0,05$), avec les comparaisons par paires révélant une différence significative entre les blocs 1 et 3 ($p < 0,016$, Bloc 1 : 2,96s, 2 : 2,72s, 3 : 2,59s). Ces résultats ne suggérant pas clairement d'effet d'apprentissage ou de fatigue, nous avons gardé tous les blocs pour les analyses suivantes.

Nous observons aussi un effet significatif de TECHNIQUE ($F_{1,4,15,9} = 120,0$, $p < 0,0001$, $\eta_G^2 = 0,71$). Des comparaisons par paires montrent un effet significatif entre *Ro* et les autres techniques (RC_f : 1,77s, *ManRCur* : 2,72s, *AutoRCur* : 1,88s, *Ro* : 4,67s, $p < 0,0001$), et aussi entre *ManRCur* et les autres techniques ($p < 0,0001$). La technique de *Ro et al.* est significativement plus lente que *ManRCur*, qui est elle-même, significativement plus lente que les deux autres techniques. Avec le *RayCursor* semi-automatique, l'utilisateur a, dans la plupart des cas, juste à viser la bonne cible avec le rayon. Ces techniques sont donc plus rapides que les autres qui obligent l'utilisateur à déplacer le curseur le long du rayon pour atteindre la cible.

L'analyse montre un effet significatif de TAILLE ($F_{1,11} = 11,0$, $p < 0,007$, $\eta_G^2 = 0,02$) et une interaction de TECHNIQUE \times TAILLE ($F_{3,33} = 11,8$, $p < 0,0001$, $\eta_G^2 = 0,03$). Des comparaisons par paires montrent seulement une différence significative pour la technique de *Ro*, entre les *Petites* et les *Grandes* cibles ($Ro_{Petites}$: 5,08s, $Ro_{Grandes}$: 4,27s, $p = 0,05$). Nous observons que notre implémentation de la technique de *Ro et al.* est plus lente pour les *Petites* cibles. Nous trouvons aussi un effet significatif de DENSITÉ ($F_{1,11} = 5,8$, $p < 0,035$, $\eta_G^2 = 0,01$) et une interaction de TECHNIQUE \times DENSITÉ ($F_{3,33} = 3,4$, $p < 0,03$, $\eta_G^2 = 0,01$). Une analyse post-hoc révèle que le temps de sélection augmente pour *Raycasting* avec des densités *Élevée* ($p < 0,001$, *Élevée* : 1,82s, *Faible* : 1,71s).

6.2.2 Taux d'erreur

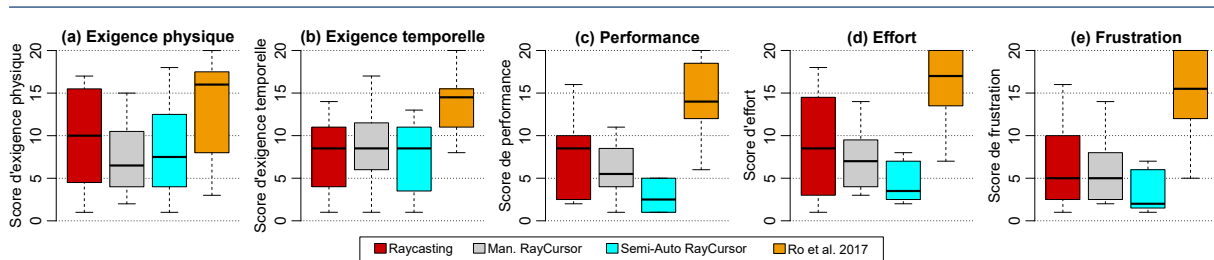
Le taux d'erreur global est de 5,9%, sachant que les participants avaient pour instruction de rester autour de 4% d'erreur. Les données ont été pré-traitées avec une ART pour prendre en compte leur distribution non normale. Une ANOVA à mesures répétées ne montre pas d'effet de BLOC ($F_{2,562} = 2,9$, $p > 0,05$). Cependant, elle montre un effet significatif de TECHNIQUE ($F_{3,549} = 25,5$, $p < 0,0001$). Des comparaisons par paires montrent des différences entre la technique de *Ro et al.* (11,9%) et toutes les autres techniques (RC_f : 5,7%, *ManRCur* : 3,8%, *AutoRCur* : 2,4%, $p < 0,0001$), aussi bien qu'entre RC_f et *AutoRCur* ($p = 0,013$). Le taux d'erreur élevé de la technique de *Ro et al.* est probablement dû au manque de sélection par proximité, comparé au *RayCursor* manuel. Aussi, le *RayCursor* semi-automatique a un plus faible taux d'erreur que *Raycasting*. Nous expliquons cet effet par l'utilisation du principe de sélection par proximité lorsque le rayon dévie de la cible visée lorsque qu'on essaye de le sélectionner. Nous relevons aussi un effet significatif de TAILLE ($F_{1,549} = 11,9$, $p < 0,001$) montrant un taux d'erreur plus élevé pour des petites cibles (*Petite* : 6,5%, *Grande* : 5,2%). Aucun effet de DENSITÉ ($F_{1,549} = 0,01$, $p > 0,05$) n'a été trouvé.

6.2.3 Questionnaire NASA-TLX

L'analyse de Friedman sur les réponses au questionnaire NASA-TLX indique qu'il y a un effet significatif pour l'exigence physique ($\chi^2(3) = 10,7$, $p = 0,01$), l'exigence temporelle ($\chi^2(3) = 12,6$, $p = 0,006$), la performance ($\chi^2(3) = 18,9$, $p = 0,0003$), l'effort ($\chi^2(3) = 15,9$, $p = 0,001$) et la frustration ($\chi^2(3) = 23,2$, $p < 0,0001$). L'analyse post-hoc de Wilcoxon révèle que le score d'exigence temporelle est significativement plus élevé pour *Ro* (médiane = 14,5) que pour les autres techniques (médianes = 8,5 $p < 0,04$). Elle montre aussi que l'estimation des participants de leur performance est significativement plus basse pour *Ro* (médiane = 14) que pour les autres techniques

(médianes $\leq 8,5$ $p < 0,02$). Enfin elle montre que le score d'effort est significativement plus élevé pour *Ro* (médiane = 17) que pour les autres techniques (médianes $\leq 8,5$ $p < 0,03$) et que le score de frustration est également significativement plus élevé pour *Ro* (médiane = 15,5) que pour les autres techniques (médianes ≤ 5 $p < 0,02$). Il n'y a pas d'autre différence significative observée pour les tests post-hocs.

Figure 15. Diagrammes en boîte des réponses aux critères « Exigence physique », « Exigence temporelle », « Performance », « Effort » et « Frustration » au questionnaire NASA-TLX de la dernière expérience, pour chaque technique. L'échelle de performance du NASA-TLX est inversée afin que les valeurs élevées représentent des contre-performances sur toutes les échelles.



6.2.4 Préférence des participants

À la fin de l'expérience, les participants devaient classer les techniques selon leurs préférences. Un test de Friedman révèle un effet significatif de TECHNIQUE pour les préférences utilisateurs ($\chi^2(3) = 25,3$, $p < 0,0001$). Une analyse post-hoc de Wilcoxon montre une différence significative entre la technique de *Ro et al.* (rang médian = 4) et toutes les autres techniques (rangs médians : *RC_f* : 2, *ManRCur* : 2, *AutoRCur* : 1, $p < 0,0001$) et entre le *RayCursor* semi-automatique et manuel ($p = 0,041$). Ces résultats subjectifs sont en accord avec nos analyses de taux d'erreur et de temps de sélection. Une majorité de participant ont placé le *RayCursor* semi-automatique en premier (9/12 participants).

6.3 Discussion

Cette expérience montre que *RayCursor* semi-automatique obtient des temps de sélection similaires à ceux du *Raycasting* filtré, pour différentes tailles et densités de cibles. Cependant, le *RayCursor* semi-automatique réduit significativement les taux d'erreur sur le *Raycasting* filtré dans les différentes conditions. Ceci montre l'efficacité 1) du *1€ Filter* pour réduire les mouvements bruités ; 2) de la sélection par proximité pour les cibles en 3D ; et 3) du placement semi-automatique du curseur le long du rayon. Lors de la sélection de cibles distantes, le *RayCursor* semi-automatique aurait pu être affecté négativement par le rayon qui intersectait des cibles proches et faisait soudainement sauter le curseur, mais ce ne fut pas le cas. Si des sauts se produisaient pour des cibles d'éloignement similaire, l'utilisation d'une fonction d'hystérésis aiderait à résoudre le problème. Notre *RayCursor* manuel a obtenu des performances de temps inférieures par rapport aux techniques mentionnées précédemment, certainement en raison du déplacement incessant du curseur nécessaire pour déplacer le curseur en avant et en arrière d'un essai à l'autre. Cependant, en comparant le *RayCursor* manuel à la technique de *Ro et al.*, elle montre clairement les avantages de la sélection par proximité.

7 CONCLUSION

Nous avons présenté *RayCursor*, une nouvelle technique d'interaction pour la sélection de cibles 3D dans des environnements immersifs. Cette technique est une amélioration de *Raycasting* qui utilise un curseur sur le rayon pour sélectionner la cible la plus proche. L'affichage d'une bulle est le retour visuel typique d'une telle technique (Grossman & Balakrishnan, 2005 ; Vanacken et al., 2007). Cependant Guillon et al. ont montré que, dans un contexte 2D, mettre en surbrillance la cible la plus proche est plus efficace, et produit moins d'encombrement vi-

suel (Guillon, Leitner, & Nigay, 2014 ; Guillon et al., 2015). Nous avons étendu leurs résultats à l'interaction 3D, avec des conclusions similaires.

Malgré l'existence de travaux antérieurs sur le filtrage du rayon, nous avons décrit la première étude d'un *Raycasting* filtré en évaluant formellement ses avantages. Nous avons montré que le filtrage du rayon réduit fortement les erreurs de sélection. Ceci est à la fois bénéfique pour *Raycasting* et *RayCursor*.

Nos résultats démontrent également que les fonctions de transfert comme celles utilisées sur les interfaces de bureau sont efficaces pour le contrôle d'un curseur sur un rayon. Nous recommandons d'utiliser une fonction sigmoïde qui dépend de la vitesse du curseur. Cependant, d'autres contrôleurs VR n'ont pas de touchpad mais un joystick. Des études plus approfondies sont nécessaires afin d'appliquer *RayCursor* à ce type de contrôleur. En particulier il faudrait dans ce cas déterminer la fonction de transfert adéquate.

Nous montrons aussi qu'une technique hybride entre *Raycasting* et *RayCursor* a le plus faible taux d'erreur, tout en étant aussi rapide que *Raycasting*. Néanmoins, nous n'avons pas évalué l'efficacité de notre technique sur des cibles de formes non sphériques. En effet, avec des formes non sphériques, la manière dont est calculée la distance entre le curseur et chaque cible pourrait affecter les performances de la technique.

En 3D, la sélection précède souvent la manipulation d'un objet 3D. Un avantage secondaire et important de notre technique est sa capacité à manipuler l'objet le long du rayon une fois qu'il est sélectionné, par exemple pour le rapprocher de l'utilisateur, ce que le *Raycasting* standard ne permet pas de faire. Les travaux futurs se concentreront sur l'utilisation de *RayCursor* pour permettre à la fois la sélection et la manipulation d'objets 3D dans des environnements immersifs.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été partiellement financé par le projet Inria IPL Avatar.

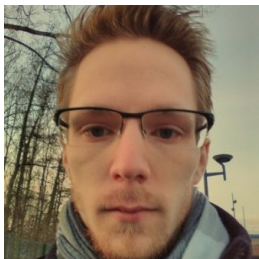
RÉFÉRENCES

- ▶ Argelaguet, F., & Andujar, C. (2013). A survey of 3d object selection techniques for virtual environments. *Computers and Graphics*, 37(3), 121 - 136. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849312001793> doi : 10.1016/j.cag.2012.12.003
- ▶ Baloup, M., Pietrzak, T., & Casiez, G. (2019). Raycursor : A 3d pointing facilitation technique based on raycasting. In *Proceedings of the 2019 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 101:1–101:12). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/3290605.3300331
- ▶ Blanch, R., Guiard, Y., & Beaudouin-Lafon, M. (2004). Semantic pointing : Improving target acquisition with control-display ratio adaptation. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 519–526). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/985692.985758
- ▶ Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). *3d user interfaces : Theory and practice*. Redwood City, CA, USA : Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- ▶ Bowman, D. A., Wingrave, C. A., Campbell, J., Ly, V., & Rhoton, C. (2002). Novel uses of pinch gloves(tm) for virtual environment interaction techniques. *Virtual Reality*, 6(3), 122–129.
- ▶ Box, G. E., & Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 211–252.
- ▶ Cashion, J., Wingrave, C., & LaViola Jr, J. J. (2012). Dense and dynamic 3d selection for game-based virtual environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 18(4), 634–642. doi : 10.1109/TVCG.2012.40
- ▶ Casiez, G., & Roussel, N. (2011). No more bricolage !: Methods and tools to characterize, replicate and compare pointing transfer functions. In *Proceedings of the 24th annual acm symposium on user interface software and technology* (pp. 603–614). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/2047196.2047276
- ▶ Casiez, G., Roussel, N., Vanbelleghem, R., & Giraud, F. (2011). Surfpad : Riding towards targets on a squeeze film effect. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing*

- systems (pp. 2491–2500). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/1978942.1979307
- ▶ Casiez, G., Roussel, N., & Vogel, D. (2012). 1€ filter : A simple speed-based low-pass filter for noisy input in interactive systems. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 2527–2530). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/2207676.2208639
 - ▶ de Haan, G., Koutek, M., & Post, F. H. (2005). Intenselect : Using dynamic object rating for assisting 3d object selection. In *Proceedings of the 11th eurographics conference on virtual environments* (pp. 201–209). Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland : Eurographics Association. doi : 10.2312/EGVE/IPT_EGVE2005/201-209
 - ▶ Delamare, W., Coutrix, C., & Nigay, L. (2013). Mobile pointing task in the physical world : Balancing focus and performance while disambiguating. In *Proceedings of the 15th international conference on human-computer interaction with mobile devices and services* (pp. 89–98). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/2493190.2493232
 - ▶ Elmqvist, N., & Fekete, J.-D. (2008, mai). Semantic pointing for object picking in complex 3d environments. In *Proceedings of graphics interface 2008* (pp. 243–250). Toronto, Ont., Canada : Canadian Information Processing Society. Consulté sur <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1375714.1375755>
 - ▶ Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2005). The bubble cursor : Enhancing target acquisition by dynamic resizing of the cursor's activation area. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 281–290). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/1054972.1055012
 - ▶ Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2006). The design and evaluation of selection techniques for 3d volumetric displays. In *Proceedings of the 19th annual acm symposium on user interface software and technology* (pp. 3–12). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/1166253.1166257
 - ▶ Guiard, Y., Blanch, R., & Beaudouin-Lafon, M. (2004). Object pointing : A complement to bitmap pointing in guis. In *Proceedings of graphics interface 2004* (pp. 9–16). School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada : Canadian Human-Computer Communications Society. Consulté sur <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1006058.1006060>
 - ▶ Guillon, M., Leitner, F., & Nigay, L. (2014). Static Voronoi-Based Target Expansion Technique for Distant Pointing. In F. Garzotto et al. (Eds.), *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI 2014)* (p. 41-48). Como, Italy : ACM. Consulté sur <https://hal.inria.fr/hal-01006840> doi : 10.1145/2598153.2598178
 - ▶ Guillon, M., Leitner, F., & Nigay, L. (2015). Investigating visual feedforward for target expansion techniques. In *Proceedings of the 33rd annual acm conference on human factors in computing systems* (pp. 2777–2786). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/2702123.2702375
 - ▶ Gupta, A., Pietrzak, T., Yau, C., Roussel, N., & Balakrishnan, R. (2017). Summon and select : Rapid interaction with interface controls in mid-air. In *Proceedings of the 2017 acm international conference on interactive surfaces and spaces* (pp. 52–61). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/3132272.3134120
 - ▶ Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C., & Kassell, N. F. (1994). A survey of design issues in spatial input. In *Proceedings of the 7th annual acm symposium on user interface software and technology* (pp. 213–222). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/192426.192501
 - ▶ Kopper, R., Bacim, F., & Bowman, D. A. (2011, March). Rapid and accurate 3d selection by progressive refinement. In *2011 ieee symposium on 3d user interfaces (3dUI)* (pp. 67–74). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society. doi : 10.1109/3DUI.2011.5759219
 - ▶ Kytö, M., Ens, B., Piumsomboon, T., Lee, G. A., & Billinghamurst, M. (2018). Pinpointing : Precise head-and eye-based target selection for augmented reality. In *Proceedings of the 2018 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 81:1–81:14). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/3173574.3173655
 - ▶ Liang, J., & Green, M. (1994). Jdcad : A highly interactive 3d modeling system. *Computers & Graphics*, 18(4), 499 - 506. doi : 10.1016/0097-8493(94)90062-0
 - ▶ Mine, M. R. (1995). *Virtual environment interaction techniques* (Rapport technique). Chapel Hill, NC, USA : University of North Carolina.
 - ▶ Nancel, M., Chapuis, O., Pietriga, E., Yang, X.-D., Irani, P. P., & Beaudouin-Lafon, M. (2013). High-precision pointing on large wall displays using small handheld devices. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 831–840). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/2470654.2470773

- ▶ Ren, G., & O'Neill, E. (2013, mai). 3d selection with freehand gesture. *Computers & Graphics*, 37(3), 101–120. doi : 10.1016/j.cag.2012.12.006
- ▶ Ro, H., Chae, S., Kim, I., Byun, J., Yang, Y., Park, Y., & Han, T. (2017, Oct). A dynamic depth-variable ray-casting interface for object manipulation in ar environments. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (p. 2873-2878). IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. doi : 10.1109/SMC.2017.8123063
- ▶ Schmidt, G., Baillot, Y., Brown, D. G., Tomlin, E. B., & Swan, J. E. I. (2006, March). Toward disambiguating multiple selections for frustum-based pointing. In *Proceedings of the 3d user interfaces* (pp. 87–94). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society. doi : 10.1109/VR.2006.133
- ▶ Steinicke, F., Ropinski, T., & Hinrichs, K. (2004). Object selection in virtual environments with an improved virtual pointer metaphor. In *Computer vision and graphics : International conference, ICCVG 2004* (pp. 320–326). Warsaw, Poland : Springer Netherlands. doi : 10.1007/1-4020-4179-9_46
- ▶ Vanacken, L., Grossman, T., & Coninx, K. (2007, March). Exploring the effects of environment density and target visibility on object selection in 3d virtual environments. In *2007 IEEE Symposium on 3d user interfaces*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society. doi : 10.1109/3DUI.2007.340783
- ▶ Vickers, D. L. (1972). *Sorcerer's apprentice : Head-mounted display and wand* (Thèse de doctorat non publiée).
- ▶ Vive. (2019, 7 January). *Htc vive vr headset*. (<https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>, retrieved January 7th, 2019)
- ▶ Vogel, D., & Balakrishnan, R. (2005). Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on user interface software and technology* (pp. 33–42). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/1095034.1095041
- ▶ Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 143–146). New York, NY, USA : ACM. doi : 10.1145/1978942.1978963

BIOGRAPHIE



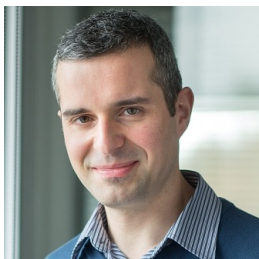
Marc BALOUP

Marc Baloup est doctorant dans l'équipe de recherche Loki, commune entre Inria et l'Université de Lille au sein de l'UMR 9189 CRISTAL. Ses travaux de recherche entrent dans le cadre de l'IPL Avatar, avec pour objectifs d'améliorer l'interaction d'un avatar avec son environnement et aussi d'améliorer le contrôle de l'avatar incarné par l'utilisateur.



Thomas PIETRZAK

Thomas Pietrzak est Maître de Conférences à l'Université de Lille, et membre de l'équipe de recherche Loki du laboratoire CRISTAL (UMR CNRS 9189) et du centre Inria Lille – Nord Europe. Son domaine de recherche est l'Interaction Homme-Machine. Il s'intéresse particulièrement à la conception, l'implémentation et l'évaluation de techniques d'interaction et de dispositifs interactifs, en particulier haptiques. Il publie régulièrement dans des conférences telles qu'ACM CHI, ACM UIST, et IHM, la conférence organisée par l'AFIHM. Il a été membre du conseil d'administration de l'AFIHM pendant 8 ans.



Géry CASIEZ

Géry Casiez est Professeur des Universités en Informatique à l'Université de Lille, membre de l'équipe de recherche Loki et directeur adjoint de l'UMR 9189 CRISTAL. Ses intérêts de recherche en Interaction Homme-Machine portent principalement sur le développement de nouveaux périphériques et techniques d'interaction, l'étude des facteurs humains et le développement de métriques et modèles prédictifs de performance. Il publie et participe régulièrement aux comités de programmes de conférences comme ACM CHI, ACM UIST et IHM. Il a été président de l'AFIHM pendant 4 ans. En 2018 il a été nommé membre junior de l'Institut Universitaire de France pour 5 ans.