



Handicap 2022

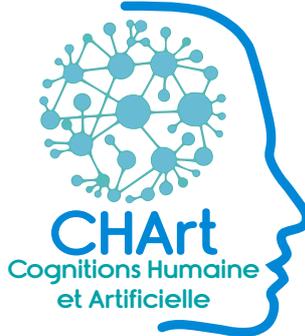
*12^e conférence de l'IFRATH sur
les technologies d'assistance*

Paris, 8-10 juin 2022

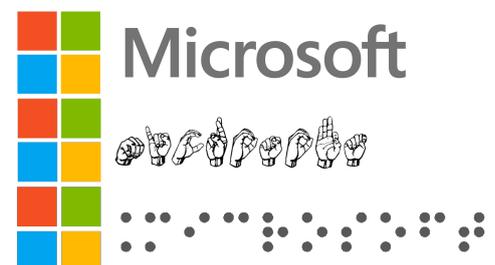
**Humaines et artificielles,
les intelligences au service du handicap**

**G. Thomann
Y. Morère
Eds.**

Partenaires de l'organisation



Sponsors de la conférence





Handicap 2022
Humaines et artificielles, les intelligences au service du handicap
Copyright IFRATH juin 2022, Paris

www.ifrath.fr

ISBN 978-2-9571218-2-3



9 782957 121823

Le mot du président

L'IFRATH est une société savante qui célèbre en 2022 sa vingt-quatrième année d'existence et qui reste très active. La dynamique de l'IFRATH ne s'est jamais démentie depuis sa création, notamment au travers de l'engagement de ses présidents successifs – *Alain Pruski, Philippe Gorce, Christian Berger-Vachon, Jaime Lopez-Krahe, Mohamed Slimane* – des membres des instances de l'IFRATH, mais aussi grâce aux adhérents et partenaires qui nous ont accompagnés jusqu'à ce jour.

En rassemblant des chercheurs, des utilisateurs et des industriels, qui abondent tous dans le même sens pour mettre en commun leurs compétences et leur savoir-faire, elle permet de promouvoir l'apport de solutions technologiques pour l'aide aux personnes en situation de handicap.

L'IFRATH organise également des réunions thématiques trimestrielles qui permettent à de nombreuses personnes concernées de se retrouver, échanger, faire avancer la recherche et favoriser le transfert des technologies afin d'améliorer la qualité de vie et d'accroître l'autonomie des personnes en situation de handicap et des personnes vieillissantes.

Les années impaires, elle soutient et participe à la mise en place du colloque JCJC (Jeunes Chercheuses, Jeunes Chercheurs), sans oublier de promouvoir les travaux de jeunes chercheurs, chaque année, par l'attribution d'un prix de thèse accompagné d'une récompense.

Le travail mené lors de ces rencontres et nombreux échanges permet à l'IFRATH d'organiser, les années paires, la conférence Handicap au cours de laquelle s'expriment des intervenants issus d'horizons disciplinaires variés (STIC, Sciences Humaines et Sociales, Ingénierie...).

Compte tenu du contexte sanitaire, l'édition 2020 avait été singulière parce qu'exclusivement en distanciel. Nous avons craint pour son niveau de participation et son déroulement et ce fut un immense succès sur ces deux aspects. Nous avons le grand plaisir avec la conférence 2022 de nous rassembler à nouveau. Nous retrouvons l'esprit d'une volonté commune au service de la personne en situation de handicap.

Je remercie notre président du Comité d'Organisation Guillaume Thomann, maître de conférences HDR, qui a géré avec attention et bonne humeur la préparation de la conférence. Je remercie également notre président du Comité Scientifique Yann Morère, maître de conférences HDR, pour son enthousiasme et sa rigueur. Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du Comité Scientifique et du Comité d'Organisation qui ont été fortement sollicités. Et nous remercions également les conférenciers qui ont répondu à nos invitations.

Nous remercions aussi l'ensemble des structures qui nous soutiennent et nous motivent pour aller plus loin dans nos actions.

Bienvenue à l'ensemble des participants. Que cette édition de la conférence Handicap 2022 vous permette de profiter pleinement de moments d'échanges agréables et fructueux.

Gérard Uzan
Président de l'IFRATH

Préface du Comité Scientifique

La conférence Handicap, organisée par l'IFRATH tous les deux ans depuis 2000 en parallèle avec le salon Autonomic, est devenue un rendez-vous incontournable pour les chercheurs français travaillant dans le domaine des technologies d'assistance. Elle se veut en effet un lieu d'échange permettant d'aborder la compensation des situations de handicap sous tous ses aspects, technologiques mais également humains et sociologiques. De façon plus générale, son ambition est de se positionner comme la référence des conférences francophones de ce secteur et de conforter ainsi son rôle fédérateur.

La conférence Handicap, avec le soutien de la communauté scientifique qui l'anime, a le souci constant de faire converger toutes les recherches dans l'intérêt des utilisateurs finaux, de leurs proches et des professionnels du secteur. Cette année le thème est le suivant : «Humaines et artificielles, les intelligences au service du handicap».

Cette 12^{ème} édition marque le retour à une conférence en présentiel, après une précédente édition réalisée entièrement en visioconférence. Nous allons donc pouvoir nous retrouver et échanger de vive voix pendant les sessions thématiques mais aussi lors des repas et pauses café qui sont autant de moments privilégiés où naissent de nouvelles collaborations scientifiques.

Handicap 2022 s'ouvrira dans la continuité des éditions précédentes avec 23 présentations orales ou Posters couvrant des champs de recherche très diversifiés regroupés en 6 sessions : Méthode et Outils pour l'évaluation, Technologies d'Assistance Intelligentes, Interfaces Humain-Machine, Méthodologies Inclusives, Intelligence Artificielle et Outils pour la détection et Accès aux objets atypiques. Nous aurons aussi l'honneur et le plaisir d'accueillir 5 conférenciers invités.

Je remercie l'ensemble des auteurs pour leurs implications dans notre communauté. Je tiens aussi à remercier chaleureusement le comité scientifique pour la qualité de son travail lors de la phase d'évaluation et sélection des communications. Je remercie également Guillaume Thomann, notre président de CO, pour la coordination de tous les acteurs qui ont participé à la préparation de la conférence.

Pour conclure je souhaite à tous les participants à Handicap 2022 des échanges scientifiques riches et passionnants qui mèneront sans aucun doute à de nouvelles collaborations. Bonne conférence à toutes et tous !

Yann Morère
Président du Comité Scientifique de Handicap 2022

Préface du Comité d'Organisation

Handicap 2022 est placée sous le signe du renouveau et des retrouvailles. Contrairement aux discussions qui avaient animé le début de l'organisation de cette conférence en septembre dernier, il n'y a plus de doute, nous pourrons nous retrouver physiquement pour présenter et débattre autour de travaux scientifiques et techniques.

La conférence Handicap est un lieu d'échange, d'amitié, de convivialité, de rencontre ; un lieu où les différences se voient, où les différences se mêlent et se côtoient, où les différences nous enrichissent. C'est pour cela que le Conseil d'Administration de l'IFRATH et le Comité d'Organisation de la conférence ont tout mis en œuvre pour prévoir, dès le début, cette conférence en présentiel.

Même si les restrictions sanitaires, même légères, sont toujours d'actualité, nous souhaitons remercier nos sponsors, qui ont cru en la réalisation de cet événement en présentiel. Ils croient en nous et en nos convictions, ils agissent comme nous en faveur des personnes en situation de handicap et nous leur donnons la parole dans ces actes. Ainsi, nous remercions chaleureusement (dans l'ordre alphabétique) : l'IReSP/INSERM, Microsoft France SAS et Thalès ; et bien sûr nos partenaires institutionnels : le Laboratoire CHArt, l'Université de Lorraine, l'Université Lyon 1, l'Université Paris 8, Grenoble INP – Université Grenoble Alpes et la Chaire «Handicap, Emploi et Santé au Travail». Leur soutien, de longue durée pour nombre d'entre eux, nous est totalement indispensable. Merci !

Nous remercions également l'hôtel Mercure Vaugirard, Porte de Versailles et le restaurant l'Île qui ont tout mis en œuvre pour nous permettre de réaliser cette conférence dans les meilleures conditions possibles. Soyons ravis de nos retrouvailles en ces lieux, nous pouvons cette année en profiter pour admirer les paysages qui entourent le restaurant !

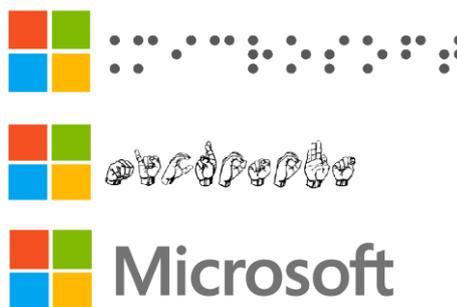
Nous remercions également, très chaleureusement, nos 5 conférenciers invités qui nous promettent des présentations de très belles qualités : Stéphanie BUISINE et Andréa BOISADAN qui réaliseront une intervention autour de «conception universelle, lead users et intelligence émotionnelle» ; Xavier RETAUX et Clara TOUSSAINT, qui nous parleront d'«Accessibilité et Jeux Vidéo» ; Nicolas BALTENNECK, qui proposera de s'interroger sur «différence, handicap et corps hybrides» ; Laurent MAURY abordera le sujet «handicap et technologies : quel futur imaginer ?» ; et enfin Bruno VILAIN, qui nous développera les activités pour «un poste de travail intelligent pour tous».

Enfin, je tiens à remercier personnellement l'ensemble des membres du Comité d'Organisation qui ont tous été très actifs, motivants et motivés, et grâce à qui cette conférence se passera très bien, sans aucun doute. Je remercie également toutes les autres personnes qui ont œuvré pour que cette conférence puisse se dérouler : membres du Conseil Scientifique, qui nous assurent des communications de qualité, et membres du Conseil d'Administration de l'IFRATH.

Je vous souhaite à tous, au nom du Comité d'Organisation de Handicap 2022 et au nom de l'IFRATH, une très belle conférence !

Guillaume Thomann
Président du Comité d'Organisation de Handicap 2022

Le mot des sponsors

The logo for Thales, featuring the word "THALES" in a bold, blue, sans-serif font. A small blue dot is positioned above the letter 'A'.

Thales est un leader mondial de hautes technologies qui façonne aujourd'hui le monde de demain. Le Groupe propose des solutions, services et produits à ses clients dans les domaines de l'aéronautique, de l'espace, du transport, de l'identité et sécurité numériques, et de la défense. Avec 83 000 collaborateurs dans 68 pays, Thales a réalisé un chiffre d'affaires de 19 milliards d'euros en 2019 (sur une base intégrant Gemalto sur 12 mois).

Thales investit notamment dans les innovations numériques - connectivité, big data, intelligence artificielle et cybersécurité – technologies au cœur des moments décisifs des entreprises, des organisations et des Etats.

En tant qu'employeur responsable, Thales s'engage depuis plus de 28 ans pour l'emploi et l'insertion des personnes en situation de handicap avec une double ambition : accueillir tous les talents et accompagner ses collaborateurs concernés par le handicap.

Afin de favoriser l'emploi, dans un axe territorialité, Thales acteur responsable sur ses bassins d'emploi poursuit les partenariats avec les écosystèmes existants. Des conventions ont été signées avec les rectorats et les universités en vue d'accompagner les jeunes en situation de handicap dans leurs études et leur insertion professionnelle au travers des conventions régionales « Atouts pour tous » dont Thales est à l'origine.

Par ailleurs un axe important de l'accord handicap Thales concerne l'utilisation des technologies de Thales au service de projets d'aides techniques pour les personnes en situation de handicap afin de leur permettre de mieux s'intégrer dans la société. Ces projets sont menés en partenariat avec des laboratoires universitaires en France et dans le monde.

La mission actuelle de Microsoft est de donner à chaque individu et à chaque organisation les moyens de réaliser leurs ambitions.

Afin d'offrir un environnement digital accessible à tous et toutes, l'entreprise investit beaucoup d'énergie dans la création de solutions adaptées, notamment dans les applications Windows et Office 365. De nombreuses fonctionnalités ont été rendus possible grâce aux progrès récents des technologies d'Intelligence Artificielle. Des solutions comme la dictée vocale ou encore le sous-titrage automatique permettent chaque jour d'accompagner les personnes dans leur quotidien que cela soit en télétravail, dans l'entreprise ou dans leur vie quotidienne.

Dans ce contexte, Microsoft est très content de soutenir la 12ème édition de la conférence « Handicap 2022 » organisée par l'IFRATH à Paris. Permettre à des acteurs mobilisés de réfléchir aux solutions de demain pour faire progresser les solutions améliorant l'autonomie ou la qualité de vie des personnes en situation de handicap est une priorité à laquelle Microsoft souscrit totalement.

J'espère que nous verrons émerger de ces échanges des innovations à la hauteur des enjeux d'inclusion qui permettront demain de créer une Société où chacun et chacune d'entre nous pourra s'épanouir.

Philippe Trotin
Directeur mission Handicap et Accessibilité
Microsoft France, Issy Les Moulineaux, France
ptrotin@microsoft.com



La Chaire « Handicap, Emploi et Santé au Travail », dirigée à l'Université Paris-Est Créteil (UPEC) par Karine Gros, Maître de Conférences HDR, Personne qualifiée au CNCPH, développe des projets de recherche et de formation pour concevoir et mettre en œuvre des solutions nouvelles favorisant l'insertion socio-professionnelle des personnes en situation de handicap.

Fédérant un large réseau associant pouvoirs publics, professionnels de l'insertion et du maintien en emploi, acteurs de soins et de réadaptation, universités, entreprises et associations, la Chaire a pour objectifs de concevoir et de déployer des nouvelles formations à destination des personnes en situation de handicap et du collectif de travail, de créer des outils de veille et d'anticipation des situations de désinsertion professionnelle s'appuyant sur l'Intelligence Artificielle pour favoriser le maintien en emploi et la sécurisation des parcours, et de conduire des programmes de recherche innovants pour améliorer la santé au travail et le retour à l'emploi.

Présidée par la Fondation Malakoff Humanis Handicap, Mécène Premium de la Chaire, ayant pour marraine Marie-Anne Montchamp, directrice générale de l'OCIRP, la Chaire est soutenue par Onepoint, Thales, 5Discovery, HandiPRINT, l'Agefiph et le FIPHFP.

Parce que l'IFRATH s'attache à rapprocher, lors de ses conférences, les innovations technologiques, pédagogiques et en sciences de la rééducation et de la réadaptation pour en faire des leviers pluriels et conjoints d'une société toujours plus inclusive, parce que l'IFRATH rassemble des scientifiques nationaux et internationaux de renom en ayant le souci de diffuser les résultats de leurs recherches par une publication accessible des Actes, la Chaire Handicap, Emploi et Santé au travail a tenu à s'associer à l'IFRATH pour l'organisation de Handicap 2022 et en est fort honorée.

L'Institut de Recherche en Santé Publique (IReSP) est un groupement d'intérêt scientifique (GIS) créé en 2007. Il rassemble différents acteurs de la recherche en santé publique (agence de Santé Publique, opérateur de recherche, ministère, organisme de protection sociale).

L'objectif général de l'IReSP est de développer, structurer et promouvoir la recherche en santé publique, en lien avec les divers acteurs concernés et la société dans son ensemble, afin de renforcer les interventions et politiques visant à l'amélioration de l'état de santé et de bien-être de la population.

A cette fin, l'IReSP joue un rôle d'interface et anime les échanges entre les communautés de chercheurs et les acteurs de la décision publique, dans une perspective d'amélioration des politiques publiques. L'Institut est aussi un espace de dialogue entre les communautés de recherche et les parties prenantes (professionnels, associations, usagers, patients...). Il recourt à différentes modalités d'action et promeut notamment l'interdisciplinarité, la recherche interventionnelle en santé et la recherche participative.

Cet objectif se décline notamment au travers des missions suivantes :

- Élaborer et gérer des Appels à Projets ;
- Contribuer à l'animation et la coordination des communautés de recherche en santé publique ;
- Accroître la visibilité et faciliter l'accès aux résultats de la recherche en santé publique à un large public

Les 3 axes thématiques principaux soutenus par l'IReSP concernent la prévention et la promotion de la santé ; les addictions et la perte d'autonomie (personnes âgées et personnes en situation de handicap).

Comités

Comité scientifique

Président :

Yann Morère [CE] (LCOMS, Université de Lorraine)

Membres :

Dominique Archambault [CE] (EA 4004 – CHArt Université Paris 8)

Guy Bourhis [CE] (LCOMS Université de Lorraine)

Frédéric Bousefsaf (LCOMS Université de Lorraine)

Francois Cabestaing (Université Lille 1)

Benoît Encelle (Université de Lyon CNRS Université Lyon 1 LIRIS UMR5205 F-69622 France)

Jan Engelen (Katholieke Universiteit Leuven)

Céline Jost (Université Paris 8 – Laboratoire CHArt)

Christophe Jouffrais (CNRS & Univ Toulouse – IRIT)

Jacqueline Leybaert (Université libre de Bruxelles)

Jaime Lopez-Krahe (Université Paris 8)

Vincent Meyer (Université Nice Sophia Antipolis)

Nicolas Monmarché (Université de Tours)

Pierre Pino (LCOMS Université de Lorraine)

Edwige Pissaloux (Sorbonne University /U. Rouen)

Mathieu Raynal (IRIT – University of Toulouse)

Anis Rojbi (Université Paris 8 – Laboratoire CHArt EA 4004)

Jack Sagot (Laboratoire CHArt 4004)

Karim Sehaba (LIRIS – Université Lumière Lyon 2)

Mohamed Slimane (Université de Tours)

Guillaume Thomann (Grenoble INP – UGA)

Gérard Uzan [CE] (Université Paris 8 – Laboratoire CHArt EA 4004)

Comité d'organisation

Président :

Guillaume Thomann [CE] (Grenoble INP – UGA)

Membres :

Antonio Pinti (Université Polytechnique Hauts-de-France) – Vice-Président du Comité d'Organisation

Dominique Archambault [CE] (Université Paris 8 -Vincennes-Saint-Denis)

Gérard Uzan [CE] (Université Paris 8 -Vincennes-Saint-Denis)

Gaëtan Bourmaud (Université Paris 8 -Vincennes-Saint-Denis)

Frédéric Bousefsaf (Université de Lorraine)

Yann Morère [CE] (Université de Lorraine) – Président du Comité Scientifique

Guy Bourhis [CE] (Université de Lorraine)

Karine Gros (Université Paris-Est Créteil)

Sarah Digout (Université Paris-Est Créteil)

Julie Golliot (Smart Macadam & Université de Toulon)

Marie-Hélène Bekaert (Université de Lille)

François Cabestaing (Université de Lille)

Philippe Pudlo (Université Polytechnique Hauts-de-France)

Christian Berger-Vachon (Université de Lyon)

[CE] : Comité éditorial

Table des matières

Le mot du président	5
Préface du Comité Scientifique	7
Préface du Comité d'Organisation	9
Le mot des sponsors	11
Comités	15
Table des matières	17
Conférences Invitées	21
Conception universelle, lead users et intelligence émotionnelle, <i>Stéphanie Buisine, Andréa Boisadan (CESI)</i>	22
Accessibilité et jeux vidéo, <i>Xavier Retaux, Clara Toussaint (AXErgonomie)</i>	23
Différence, handicap et corps hybrides, <i>Nicolas Baltenneck (Univ. Lyon 2)</i>	24
Handicap et technologies : quel futur imaginer ?, <i>Laurent Maury (01net.com)</i>	25
Un poste de travail intelligent pour tous, <i>Bruno Vilain (ADTP, ESAT Annecy)</i>	26
Session 1 : Méthodes et Outils pour l'Évaluation	
<i>Présidente de session : Céline Jost</i>	27
Estimation des Paramètres du Contrôle en Position Assise chez la Personne atteinte d'une Lésion Médullaire, <i>Hajer Srihi, Thierry-Marie Guerra, Philippe Pudlo, Anh-Tu Nguyen</i>	29
Évaluation de l'influence du professionnel de santé dans l'application du jeu sérieux RehaBEElitation pour les patients atteints de la maladie de Parkinson, <i>Isabela Alves Marques, Luanne Cardoso Mendes, Camille Marques Alves, Luiza Maire David Luiz, Rodrigo Rosa, Kennedy Lima, Angela Abreu, Edgard Lamounier Junior, Fabio Henrique Oliveira, Marcus Vieira, Guy Bourhis, Pierre Pino, Adriano Alves Pereira, Eduardo Lázaro Martins Naves, Yann Morère, Adriano de Oliveira Andrade</i>	35

Évaluation de l'utilisabilité d'un jeu sérieux pour la rééducation des personnes atteintes de la maladie de Parkinson, <i>Luanne Cardoso Mendes, Isabela Alves Marques, Camille Marques Alves, Angela Abreu Rosa de Sá, Rodrigo Ramos Rosa, Kennedy Rodrigues Lima, Luiza Maire David Luiz, Marcus Vieira Fraga, Eduardo Lázaro Martins Naves, Edgard Afonso Lamounier Júnior, Fábio Henrique Monteiro Oliveira, Adriano Alves Pereira, Guy Bourhis, Pierre Pino, Yann Morère, Adriano de Oliveira Andrade</i>	40
BabelDr, un système de traduction du discours médical vers l'animation virtuelle signée <i>Bastien David, Jonathan Mutal, Irene Strasly, Pierrette Bouillon, Herve Spechbach</i>	46
Session 2 : Technologies d'Assistance Intelligentes	
Président de session : Guy Bourhis	53
Orthèse à rigidité variable pour la réduction des tremblements de la main, <i>Jhedmar Callupe Luna, Eric Monacelli, Vincent Chalvet, Dante Elias</i>	55
Une neuroprothèse visuelle interactive pour mieux percevoir l'environnement, <i>Julien Desvergues, Axel Carlier, Vincent Charvillat, Christophe Jouffrais</i>	61
Système d'alerte sur obstacles pour améliorer l'autonomie des personnes utilisant un fauteuil roulant, <i>Gilles Tagne, Anne-Marie Kokosy, Phillipe Saey, Steve Mbakop, Maxime Cheramy, Ali Oukhrif, Thomas Degallaix, Foucauld Bergerault, Alexandre Gorgol, Ikram Ahanou</i>	67
Session 3 : Interactions Humain-Machine	
Président de session : Pierre Pino	73
Le Leap Motion Controller : de la souris gestuelle à la commande gestuelle. Deux études de faisabilité, <i>Jean-Marc Vannobel, Marie-Hélène Bekaert, Jean Baumann</i>	75
Une nouvelle interface homme-machine pour la rééducation des personnes atteintes de la maladie de Parkinson, <i>Camille Marques Alves, Luanne Cardoso Mendes, Isabela Alves Marques, Luiza Luiz, Rodrigo Ramos Rosa, Julia Tannus, Edgard Lamounier Junior, Fábio Henrique Monteiro Oliveira, Marcus Vieira Fraga, Adriano Alves Pereira, Guy Bourhis, Pierre Pino, Adriano de Oliveira Andrade, Eduardo Lázaro Martins Naves, Yann Morère</i>	81
Vers des représentations multimodales de peintures pour leur accessibilité inclusive, <i>Lilia Djoussouf, Edwige Pissaloux, Ngoc Tan Truong, Katerine Romeo, Simon Gay, Son Duy Dao</i>	87
Session 4 : Méthodologies Inclusives	
Présidentes de session : Edwige Pissaloux & Katerine Romeo	93
Conception participative d'une maquette 3D interactive avec les Instructrices de Locomotion pour des utilisateurs avec déficiences visuelles. Etude de cas., <i>Elen Sargsyan, Marc Macé, Bernard Oriola, Marcos Serrano, Christophe Jouffrais</i>	95
Préserver le self et l'autonomie des personnes atteintes par une maladie neuro-évolutive à travers le construit socio-technique de médiation Mementop, <i>Julie Golliot, Laurent Maury</i>	104
Intérêt d'une démarche pluridisciplinaire en matière d'accessibilité : exemple de l'étude pilote du campus de la Garde, <i>Opale Vigié, Arnaud Faupin, Didier Pradon, Eric Watelain, Mai-Anh Ngo</i>	110
La téléconsultation : un instrument pour mieux prendre en charge les enfants en situation de poyhandicap ?, <i>Amélie Sandoval, Marc-Eric Bobillier-Chaumon, Marie Hully, Isabelle Barbet</i>	116
Vers une approche inclusive de découverte des oeuvres d'art, <i>Katerine Romeo, Marion Chottin, Hannah Thompson</i>	121

Session 5 : IA et Outils pour la Détection

Président de session : Frédéric Bousefsaf

	127
Estimation sans contact de la tension artérielle par intelligence artificielle, <i>Frédéric Bousefsaf, Théo Desquins, Djamaleddine Djeldjli, Yassine Ouzar, Choubeila Maaoui, Alain Pruski</i>	129
Détection des risques de perte d'autonomie liés à la présence d'une maladie neuro-évolutive à travers l'analyse des activités des séniors, <i>Daphné Bard Krupa, Julie Golliot, Laurent Maury</i>	135
Étude préliminaire au développement d'un outil de dépistage automatisé de la scoliose idiopathique à l'aide d'un nuage de points en 3 dimensions obtenu par une caméra de profondeur, <i>Soline Calla, Paul Henry, Jean Tomaszewski, Hugo Villi, Nicolas Pinsault, Guillaume Thomann</i>	140

Session 6 : Accès aux Objets Atypiques

Président de session : Dominique Archambault

	147
Perspectives d'apport du projet PRIM dans le domaine du handicap, <i>Céline Jost, Justin Debloos, Brigitte Le Pévédic, Agnès Piquard-Kipffer, Caroline Barbot-Bouzit, Gérard Uzan</i>	149
Permettre l'autonomie dans l'activité de programmation par blocs pour des enfants non-voyants, <i>Ken Andriamahery-Ranjalahy, Philippe Truillet</i>	155
Assistant en accessibilité, rendre accessible une activité d'analyse d'article, <i>Gérard Uzan, Alexis Culpin, Estelle Dupré, Antoine Taly</i>	161

Session Posters

Président de session : Gérard Uzan

	167
Les enseignants en école élémentaire française connaissent-ils le Facile à Lire et à Comprendre ?, <i>Floriane Balssa, Véronique Lespinet-Najib</i>	169
Les techniques d'analyse d'images biométriques au service des spécialistes du suivi des maladies neurodégénératives, <i>Wagner de Aguiar, Guillaume Thomann, José Celso Freire Junior, Gilberto Cuarelli</i>	176
Système de mesure de l'angle sol - assise pour l'apprentissage du deux roues en fauteuil roulant manuel : Étude préliminaire, <i>Antonio Pinti, Atef Belghoul, Eric Watelain, Rawad El Hage</i>	180

Index des auteurs

185

Crédits

187

Conférences Invitées

Titre de la conférence : Conception universelle, lead users et intelligence émotionnelle

Andréa Boisadan

Enseignante chercheuse au sein de LINEACT CESI, mes travaux portent sur les méthodes et stratégies d'innovation et de créativité pour stimuler l'innovation radicale d'usage. Ils s'inscrivent dans le champ de la conception universelle, en effet, je m'intéresse plus particulièrement à l'intégration d'utilisateurs extraordinaires tels que les leads users, les personnes en situation de handicaps ou encore les enfants dans les processus de conception.



Stéphanie Buisine

Directrice de Recherche CESI, je suis co-responsable au sein de notre laboratoire LINEACT du Thème de recherche « Apprendre et Innover ». Nos travaux reposent sur l'analyse des écosystèmes d'apprentissage et d'innovation – deux besoins fondamentaux des sociétés modernes – afin de favoriser une expérience et un développement responsable des individus, des organisations et des territoires.



Résumé :

Cette présentation repose sur le modèle de l'utilisateur extraordinaire qui s'inscrit à la fois dans les perspectives d'une part de la Conception Universelle et d'autre part de la Conception Centrée Utilisateur qui, d'un point de vue de l'innovation est proche de la stratégie « market readers » (basée sur l'écoute du marché) qui est particulièrement appropriée pour l'innovation incrémentale mais qui bloque l'innovation radicale (dilemme de l'innovateur).

L'objectif de notre modèle est d'outrepasser ce blocage grâce à la stratégie « need seekers » (paradigme de la découverte ou de la création de nouveaux besoins) qui permet d'identifier les besoins futurs utilisateurs. Ainsi, tout comme dans l'approche de la conception centrée utilisateurs, nous incluons des utilisateurs dans notre processus de conception, la différence est que nos utilisateurs sont extraordinaires dans le sens où ils ont des besoins spécifiques de par leurs habilités (cognitives, sensorielles, motrices) atypiques et/ou parce qu'ils n'appartiennent pas directement à la cible en termes de segmentation marketing.

Parmi ces utilisateurs extraordinaires, les Lead users possèdent un profil particulièrement intéressant puisqu'ils conjuguent un certain avant-gardisme avec une forte appétence à innover. Nous avons souhaité mieux appréhender les caractéristiques de ces lead users afin de faciliter leur recrutement et leur intégration dans des projets d'innovation centrés sur les besoins et usages futurs. Nos résultats ont mis en évidence que la compétence des lead users à anticiper les besoins futurs était liée en partie à leur intelligence émotionnelle. Dans cette perspective, l'intelligence émotionnelle apparaît comme une capacité humaine clé pour alimenter l'innovation centrée sur les besoins, et contribuer ainsi à transformer les usages et la société.

Titre de la conférence : Accessibilité et jeux vidéo

Xavier RETAUX

Consultant en ergonomie et responsable de la spécialité ergonomie de l'Ecole Nationale du Jeu et des Médias Interactifs. J'ai réalisé une thèse sur la sensation de présence dans les environnements virtuels. En tant que consultant, j'ai énormément travaillé sur les situations de handicap et l'accessibilité des espaces et des usages. Ces multiples interventions m'ont conduit à communiquer largement sur le sujet, y compris dans des revues à comité de lecture.



Clara TOUSSAINT

Je suis étudiante en dernière année du Master d'ergonomie à l'école nationale des jeux et médias interactif numérique, et stagiaire artiste interface utilisateur à Ubisoft où je travaille sur l'accessibilité des jeux.

Je mets un point d'honneur à respecter et appliquer autant que possible les game accessibility guidelines dans mon travail sur les interfaces.

Et je réalise des documents de suivi des guidelines pour introduire mes collègues au sujet, et aider, à mon échelle, à rendre nos jeux les plus accessible possible.



Résumé :

Cette communication traitera de l'accessibilité des jeux vidéo. Nous établirons dans un premier temps un tableau global des liens entre jeux vidéo et situations de handicap. Nous proposerons ensuite une grille de lecture théorique de la question de l'accessibilité dans les jeux vidéo afin de soutenir l'idée que le sujet est actif et agit sur sa situation de handicap. Nous illustrerons ensuite largement cette idée par des exemples concrets des actions de l'industrie et des joueurs en matière d'accessibilité. Enfin, nous conclurons sur les enjeux de la prise en compte de l'accessibilité pour l'industrie.

Titre de la conférence : Différence, handicap et corps hybrides

Nicolas BALTENNECK

Enseignant-chercheur en psychologie du développement au laboratoire DIPHE de l'Université Lyon 2 et psychologue dans la réserve opérationnelle du Service de Santé des Armées. Je m'intéresse aux problématiques liées au handicap sensoriel, et en particulier à la déficience visuelle. Mes travaux portent notamment à la perception de l'espace, des émotions et du temps chez les personnes privées de vision. Je suis également responsable du Master Psychologie de l'éducation et de la formation et du centre de formation des psychologues de l'éducation nationale, à Lyon.



Résumé :

Cette présentation propose d'explorer la notion de handicap sous l'angle de la différence. Après avoir présenté certains moments clés du développement de l'enfant, qui contribuent à construire une représentation de l'autre et de la différence, cet exposé portera un regard historique sur la représentation artistique du handicap.

Dans ce deuxième temps, que ce soit à travers peintures ou œuvres cinématographiques, ces supports offrent une occasion de saisir les stéréotypes construits au fil des époques sur la différence et le handicap, ainsi que leurs évolutions.

Enfin, dans un troisième temps, la présentation tentera de montrer comment les évolutions scientifiques et sociales plus contemporaines tendent à faire bouger les lignes, et abordera la question de l'hybridation des corps et des aides technologiques et prothétiques. Elle sera l'occasion de conclure sur la question de « norme », de ses évolutions, et de son rapport avec la différence.

Titre de la conférence : Handicap et technologies : quel futur imaginer ?

Laurent MAURY

Aveugle de naissance, mathématicien et musicien, je suis passionné par l'étude des systèmes complexes. J'ai eu la chance de porter plusieurs projets numériques d'envergure : 01net.com, telecharger.com, libé.fr... Mes recherches et mes activités entrepreneuriales portent sur l'utilisation des technologies les plus innovantes pour préserver l'autonomie des personnes fragilisées par l'âge, la maladie ou le handicap.



Résumé :

Cette présentation débutera par un tour d'horizon réaliste et prospectif des solutions technologiques mises à la disposition des personnes handicapées aujourd'hui puis dans un avenir proche. En adoptant le point de vue d'un aveugle et celui de ses proches, elle identifiera les aides qui prétendent améliorer le quotidien de ces « tribus ». Elle s'attachera alors à étudier les forces, faiblesses et risques associés au déploiement de telles solutions. Elle proposera un récapitulatif des enjeux qu'il conviendrait de considérer dans l'étude, la conception, le développement et le déploiement de ces outils.

Dans un troisième temps, la présentation mettra en lumière les développements récents et les progrès attendus de l'intelligence artificielle, ainsi que l'exploitation de l'IA dans les aides technologiques destinées aux personnes handicapées. Elle posera notamment les questions éthiques récemment mises en lumière par les experts du domaine des agents conversationnels intelligents.

La présentation se conclura par une rapide discussion sur le parcours et l'engagement de Laurent Maury, handicapé de naissance et créateur de produits numériques renommés.

Titre de la conférence : Un poste de travail intelligent pour tous.

Bruno VILAIN

Directeur Général de ADTP, une association loi 1901. ADTP a pour mission de réussir le pari de l'inclusion des personnes en situation de handicap par le travail (EA et ESAT). Diplômé de SUPELEC et passionné par la technologie, j'ai quitté mon ancien poste de directeur général d'une entreprise, SIGMAPHI ELECTRONICS, en charge de développer et de construire des équipements d'alimentation de très haute précision pour les accélérateurs de particules à travers le monde pour rejoindre le projet intéressant et novateur de ADTP. Au sein d'une production modernisée, le projet de ADTP est d'associer Handicap et Technicité. Nous proposons à nos clients de changer leur point de vue sur le Handicap et les tâches accessibles aux personnes en situation de handicap. Par notre rôle de sous-traitant industriel, nous proposons compétitivité à nos clients et développement personnel à nos employés en mariant Handicap et Industrie 4.0, Handicap et production robotisée ou semi-automatisée. Nous souhaitons mettre la technologie au service de l'Homme.



Résumé : « Toute personne a le droit d'obtenir une satisfaction personnelle par le travail »

Cette présentation propose d'explorer comment les nouvelles technologies peuvent venir en support à la personne en situation de handicap pour prendre confiance en elle.

En introduction, nous verrons les freins et surtout les auto-freins qu'une personne en situation de handicap doit surmonter dans la réalisation de nouvelles tâches en production.

Puis nous présenterons à travers la description de notre projet Européen CTM4ALL, en collaboration avec les universités et centres de recherche Grenoble INP, TEKNIKER (Pays Basque Espagnol) et LMS (Grèce), l'ensemble des nouvelles technologies (IA et vision, COBOT, Réalité Augmentée, NUI) que nous animons autour d'un poste de travail d'assemblage ou d'ensachage.

L'objectif est de donner confiance à l'opérateur pour réaliser un travail de qualité grâce aux nouvelles technologies. Nous voulons mettre la technologie au service de l'opérateur afin qu'il puisse non pas dépasser son handicap mais prendre confiance en lui, mettre en avant ses vraies capacités intrinsèques et en développer de nouvelles.



Session 1 : Méthodes et Outils pour l'Évaluation

Présidente de session : Céline Jost

Estimation des Paramètres du Contrôle en Position Assise chez la Personne atteinte d'une Lésion Médullaire

Hajer Srihi, Thierry-Marie Guerra, Philippe Pudlo, Anh-Tu Nguyen

Université Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 LAMIH, Valenciennes, France.

Email: hajer.srihi@uphf.fr

Abstract — Les personnes vivant avec une lésion médullaire souffrent d'une paralysie des muscles du dos et des membres inférieurs ce qui impacte négativement le contrôle de leur position assise. Aussi, au lieu d'utiliser leurs muscles dorsaux et abdominaux, qui naturellement sont engagés pour se stabiliser, ces personnes utilisent leurs membres supérieurs pour maintenir leur stabilité. Cet article présente une approche par modèle permettant de mieux comprendre quelles stratégies contribuent au contrôle postural en position assise. La modélisation proposée s'écrit sous la forme d'un système mécanique descripteur non linéaire. La difficulté principale est de pouvoir remonter aux couples articulaires qui ne sont pas mesurés. Un observateur à entrées inconnues est synthétisé afin de reconstruire ces variables non mesurées. Ce papier propose des résultats issus de simulation et de données issues d'essais réels. Ils permettent de souligner la validité de l'approche pour estimer les éléments du contrôle postural ce qui pourrait permettre, dans les développements à venir, de mieux qualifier la contribution des membres supérieurs dans les exercices de rééducation.

Mots-clés — lésion médullaire, modélisation biomécanique, contrôle postural, observateur à entrées inconnues, formalisme quasi-LPV.

I. INTRODUCTION

Le contrôle de la position assise résulte de contributions actives (muscles fléchisseurs et muscles du dos érecteurs), passives (tissus et os, qui y contribuent mécaniquement) et neuronales (Panjabi, 1992a, 1992b). Une personne atteinte d'une lésion médullaire complète ne peut plus contrôler les muscles situés en dessous du niveau lésionnel, ce qui nuit au maintien de sa position assise, surtout lorsque celle-ci est perturbée. Dans un souci d'autonomie, elle doit alors apprendre une nouvelle stratégie, qui implique une action de la tête et des membres supérieurs (Janssen-Potten et al., 1999). Afin d'apporter des éléments quantifiés aux ergothérapeutes dans le suivi de cet apprentissage, les couples articulaires générés (actifs et passifs) par la personne pour tenter de maintenir son équilibre peuvent être considérés. La mesure directe des couples articulaires étant invasive, une approche dite « par modèle » est nécessaire. L'estimation de ces couples articulaires peut être réalisée par dynamique inverse, approche couramment utilisée en biomécanique, ou à l'aide d'observateurs particuliers appelés observateurs PI qui s'apparentent à des observateurs à entrées inconnues (OEI) (Luenberger, 1966). Si des modèles, de

posture assise existent dans la littérature, ils présentent des limites ou ne sont pas adaptés aux personnes atteintes de lésion médullaire. Remonter aux couples articulaires suppose de conserver un modèle proche de la réalité, c'est-à-dire sans simplifications (de type linéarisation ou termes négligés par exemple). Les modèles qui appliquent par exemple une linéarisation autour de points d'équilibre, comme dans (Masani et al., 2003; Qu et al., 2007; Reeves et al., 2009) ne sont pas adaptés ; comme ceux évidemment qui utilisent une articulation active située au niveau de l'articulation lombo-sacrée (Tanaka et al., 2010). En effet, en l'absence de contrôle volontaire au niveau lombaire, le contrôle de la position assise utilise les membres supérieurs comme une stratégie compensatoire de stabilisation (Blandeau, 2018). Le premier modèle, permettant d'étudier le contrôle postural en position assise chez les personnes lésées médullaires tenant compte de la contribution des membres supérieurs et s'appuyant sur le développement d'OEL, a été proposé par Blandeau (2018). Ce modèle, dit H2AT pour « Head-2-Arms-Trunk », a été construit sur la base des outils développés par (Grangeon et al., 2012 ; Milosevic et al., 2017) et est inspiré des mouvements humains observés chez les patients en contexte clinique. Ce modèle est du type pendule inverse représenté dans le plan sagittal, dont le contrôle au niveau lombaire est assujéti au déplacement sagittal du centre de masse (COM) de la tête et des membres supérieurs. Le modèle H2AT est basé sur une hypothèse mécanique du déplacement linéaire du COM de la tête et des membres supérieurs par rapport au tronc limitant de fait les effets inertiels de rotation des membres supérieurs au niveau de l'épaule et du coude. Cette hypothèse est à la fois importante et limitante d'un point de vue expérimental et mécanique, ce point a été discuté dans les travaux de (Blandeau, 2018). Afin de répondre à ces limitations, une extension du modèle H2AT a été introduite dans les travaux de Blandeau (2018) au travers du modèle S3S, pour « Seated-3-Segments ». Il s'agit d'un triple pendule inverse représenté dans le plan sagittal défini par le tronc, les bras et les avant-bras. Ce modèle se rapproche de l'anatomie humaine, si on le compare en particulier au modèle H2AT. L'enrichissement du modèle H2AT en S3S se fait au prix d'une complexité accrue de modélisation et de conditions nécessaires à la synthèse de l'observateur. Dans (Blandeau 2018) on montre que l'on se retrouve à la limite des solveurs actuels (Ortiz et al., 2021). L'inconvénient est alors que si l'on veut enrichir ce modèle, par exemple, en passant d'un 2D-S3S à un 3D-S3S, il est peu probable que le problème soit compatible avec les solveurs. Le but est alors de chercher une décomposition du problème en sous-problèmes de taille réduite tout en gardant la

qualité de l'estimation (Lendek et al., 2011). Cette approche est possible avec une cascade d'observateurs de type descripteur et a été proposée dans (Srihi et al. 2021), elle sera dénommée « S3S décomposé » dans la suite. Cela permet de résoudre localement chaque problème d'observation tout en conservant une preuve de convergence asymptotique de l'erreur d'estimation, conduisant à un bon compromis entre complexité et qualité d'estimation. L'objectif de ce papier est d'une part, de présenter le modèle S3S décomposé, répondant aux limitations des modèles antérieurs développés, et d'autre part, d'étudier la validité de l'approche associant le modèle S3S décomposé à un OEI au travers de simulations numériques et de résultats utilisant des données cinématiques réelles.

Le papier est organisé comme suit : une première partie présente le modèle S3S décomposé, une deuxième décrit la synthèse de l'observation en cascade, et enfin des résultats, obtenus de simulations numériques et après utilisation de données calculées issus d'essais cliniques, sont présentés et discutés.

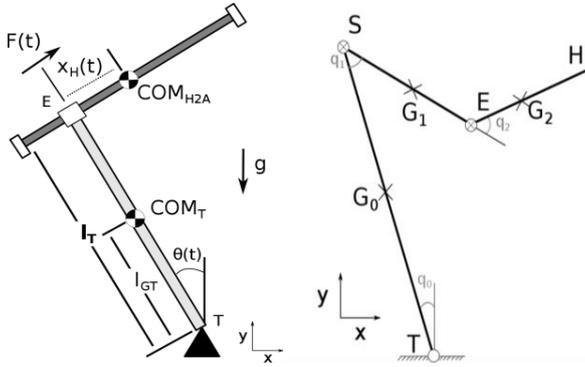


Figure 1: Représentation (de gauche à droite) des modèles H2AT et S3S

II. METHODOLOGIE ET MATERIELS

A. Le modèle S3S décomposé

Le modèle S3S-2D décomposé (Figure 2) a été présenté dans (Srihi et al., 2021). Il s'agit d'un triple pendule inverse représenté dans le plan sagittal défini par 3 blocs en cascade : le tronc 'T', les membres supérieurs 'MS' et une équation statique de découplage $\Gamma_c = f(\cdot)$. Les indices (0, 1 et 2) correspondent respectivement au tronc, bras et avant-bras. Les données anatomiques de flexion/extension des MS (Kapandi, 2005a, 2005b) définissent l'ensemble compact pour les variables du modèle en mètre, ° et °/s.

$$\Omega_x = \left\{ \begin{array}{l} \|\dot{\theta}_0\| \leq 29^\circ / s \\ -20^\circ \leq \theta_1 - \theta_0 - \pi \leq 60^\circ \\ -10^\circ \leq \theta_2 - \theta_1 \leq 45^\circ \\ \|\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0\| \leq 57^\circ / s \\ \|\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1\| \leq 57^\circ / s \end{array} \right\} \quad (1)$$

Pour chaque segment : Γ_i le couple articulaire, m_i la masse, l_i la longueur, l_{G_i} la longueur de l'origine au (COM), I_{G_i} le moment d'inertie au (COM). Les paramètres inertiels et géométriques de ce modèle sont définis en utilisant les règles

de régression présentées dans les travaux de (Dumas, Chèze et al., 2007).

$$p_1 = I_{G_0} + m_0 a_0^2 + (m_1 + m_2) l_0^2, \quad p_2 = (m_0 a_0 + (m_1 + m_2) l_0) g,$$

$$p_3 = I_{G_1} + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2, \quad p_4 = m_2 a_2 l_1, \quad p_5 = I_{G_2} + m_2 a_2^2,$$

$$p_6 = (-m_1 b_1 + (m_1 + m_2) l_1) g, \quad p_7 = m_2 a_2 g$$

$$p_8 = m_1 a_1 l_0 + m_2 l_0 l_1, \quad p_9 = m_2 a_2 l_0, \quad p_{10} = m_1 a_1 + m_2 l_1$$

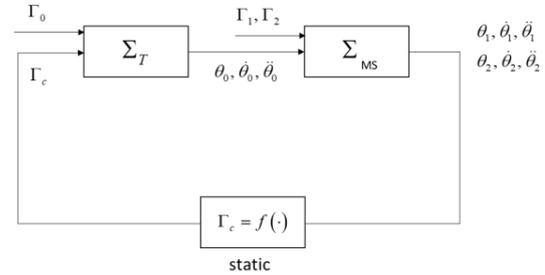


Figure 2: Schéma de fonctionnement du S3S décomposé

Le modèle du tronc Σ_T est régi par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{\Omega}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_T(\theta_0) & B_T \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ \Omega_T \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{Avec : } \Gamma_U = \Gamma_c + \Gamma_0 \quad (3)$$

$$x_T = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix}, \quad \Omega_T = \begin{bmatrix} \Gamma_U \\ \dot{\Gamma}_U \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & p_1^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_T(\theta_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & p_1^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ p_2 \frac{\sin(\theta_0)}{\theta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

Le sous modèle MS est régi par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} E_{MS}(\theta_2) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{MS} \\ \dot{\Omega}_{MS} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A_{MS}(x_A) & B_{MS} \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ \Omega_{MS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_a(\theta_{MS}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C(\theta_{MS}) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0^2 \\ \ddot{\theta}_0 \end{bmatrix} \\ y_{MS} = [I_2 \quad 0] \begin{bmatrix} x_{MS} \\ \Omega_{MS} \end{bmatrix} = \theta_{MS} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

Avec :

$$x_{MS} = \begin{bmatrix} \theta_{MS} \\ \dot{\theta}_{MS} \end{bmatrix}, \quad \theta_{MS} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad \Omega_{MS} = [\Gamma_1 \quad \dot{\Gamma}_1 \quad \Gamma_2 \quad \dot{\Gamma}_2]^T$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & I_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{MS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$E_{MS}(\theta_2) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} p_3 & p_4 \cos(q_2) \\ p_4 \cos(q_2) & p_5 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$A_{MS}(x_{MS}) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & \begin{bmatrix} 0 & p_4 \sin(q_2) \dot{\theta}_2 \\ -p_4 \sin(q_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

L'équation statique est définie par l'équation suivante :

$$\Gamma_c = \begin{bmatrix} -p_{10} \sin(q_1) \dot{\theta}_1 \\ -p_9 \sin(q_1 + q_2) \dot{\theta}_2 \\ p_{10} \cos(q_1) \\ p_9 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \Gamma_1, \quad (5)$$

Naturellement tous les modèles qui représentent ce type d'assise sont instables en boucle ouverte. Cette instabilité est due à l'absence de contrôle au niveau de l'articulation lombosacrée. Une loi de commande stabilisante est donc nécessaire avant de mettre en œuvre un OEI permettant d'estimer les données non mesurables. Cette loi de contrôle doit en outre imiter le comportement d'une personne lésée médullaire, qui en l'absence de contrôle volontaire au niveau du tronc va utiliser les membres supérieurs afin de se stabiliser en position assise. Dans ce cadre de ces travaux, le S3S décomposé a été contrôlé via une loi de commande définie et synthétisée dans (Guerra et al., 2020).

B. Le problème d'observation en cascade

Afin d'estimer les couples articulaires non mesurés (actifs à l'épaule et au coude, passif au niveau lombaire), on utilise l'approche par observation en cascade par le biais du modèle S3S décomposé. Le problème d'observation en cascade a été abordé dans la littérature par (Lendek et al., 2008) et (Gripa et al., 2012). L'idée, qui permet de réduire la complexité de la synthèse, est de construire un observateur local à chaque sous-système tout en garantissant la convergence des variables du système complet. La preuve de convergence a été présentée dans (Srihi et al., 2021), elle utilise classiquement un principe de séparation. Les résultats conduisent à 2 observateurs en cascade selon le schéma suivant :

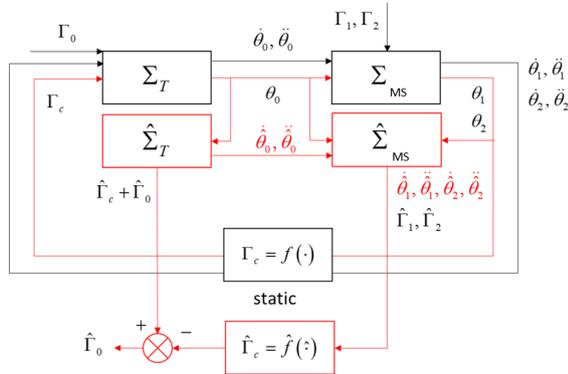


Figure 3 : La cascade d'observateur du modèle S3S décomposé

1. Le formalisme de Takagi-Sugeno

La synthèse des observateurs utilise une mise sous forme quasi-LPV, ou aussi dite de Takagi-Sugeno (Takagi and Sugeno, 1985) qui permet d'obtenir des conditions de convergence de l'estimation d'erreur. Elle consiste à décomposer un modèle non linéaire en une somme convexe de sous modèles pondérés par des fonctions non linéaires. Ainsi pour une non linéarité $z_j(\cdot) \in [\underline{z}_j, \bar{z}_j]$, il existe des fonctions convexes satisfaisant

$\eta_0^j(\cdot) \geq 0$, $\eta_1^j(\cdot) \geq 0$ et $\eta_0^j(\cdot) + \eta_1^j(\cdot) = 1$ telle que la non linéarité s'écrit sous la forme de $z_j = \underline{z}_j \eta_0^j(z_j) + \bar{z}_j \eta_1^j(z_j)$.

$$\eta_0^j(\cdot) = \frac{\bar{z}_j - z_j(\cdot)}{\bar{z}_j - \underline{z}_j}, \quad \eta_1^j(\cdot) = 1 - \eta_0^j(\cdot) \quad (6)$$

On remplace alors un modèle non linéaire affine en la commande du type $E(x)\dot{x} = f(x) + g(x)u$ ($E(x)$ apparait dans un modèle de type descripteur) par un équivalent polytopique :

$$\sum_{i=1}^r v_i(x) E_i \dot{x} = \sum_{i=1}^r v_i(x) (A_i x + B_i u), \quad \sum_{i=1}^r v_i(x) = 1, v_i(x) \geq 0 \quad (7)$$

r est le nombre de modèles, il est en 2^{nl} , nl le nombre de non linéarités différentes à traiter pour le modèle non linéaire..

2. Synthèse des observateurs-PI

- Pour le modèle du tronc Σ_T , l'observateur-PI s'écrit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_T \\ \dot{\hat{\Omega}}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_T(\theta_0) & B_T \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_T \\ \hat{\Omega}_T \end{bmatrix} + K_T(\theta_0)(y_T - \hat{y}_T), \\ \hat{y}_T = C_T \hat{x}_T = \theta_0 \end{cases} \quad (8)$$

K_T est le gain d'observation déterminé par placement des pôles. On remarquera que l'état est augmenté avec une cascade d'intégrateurs (d'où l'appellation observateur-PI) d'ordre 2 dans notre cas. Cet état augmenté, permet d'inclure l'entrée non-mesurée dans l'état afin de l'estimer.

- Pour le modèle des membres supérieurs Σ_{MS} , la structure descripteur étant conservée, l'observateur a une structure particulière (Guerra et al. 2015) : $i \in \{1, 2\}$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^2 v_i(q_2) \begin{bmatrix} E_{MSi} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_{MS} \\ \dot{\hat{\Omega}}_{MS} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{MS}(\hat{x}_{MS}) & B_{MS} \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{MS} \\ \hat{\Omega}_{MS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_a(\theta_{MS}) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ C(\theta_{MS}) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_0^2 \\ \hat{\theta}_0 \end{bmatrix} + \left[\sum_{i=1}^2 v_i(q_2) \begin{bmatrix} E_{MSi} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} P_{(\cdot)}^{-T} \sum_{i=1}^2 v_i(q_2) \begin{bmatrix} K_{1i}(\cdot) \\ K_{2i}(\cdot) \end{bmatrix} \right] (y_{MS} - \hat{y}_{MS}) \end{aligned} \quad (9)$$

Avec : $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_3 & P_4 \end{bmatrix}$, $P_1 = P_1^T > 0$ et E_{MSi} sont des matrices

constantes. v_i, w_{ij} sont les fonctions de pondération de chaque sous modèle. Au total 3 non linéarités bornées dans Ω_x sont à étudier : $\cos(q_2)$, $\sin(q_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\hat{\theta}}_1)$ et $\sin(q_2)(\dot{\theta}_2 + \dot{\hat{\theta}}_2)$.

Pour la non linéarité $\cos(q_2) \in [v, 1]$:

$$v_1(q_2) = \frac{1 - \cos(q_2)}{1 - v} = 1 - v_2(q_2),$$

Pour les deux non linéarités $\sin(q_2)(\dot{\theta}_i + \dot{\hat{\theta}}_i) \in [\underline{\rho}_i, \bar{\rho}_i]$:

$$w_{i1}(x_{MS}, \hat{x}_{MS}) = \frac{\bar{\rho}_i - \sin(q_2)(\dot{\theta}_i + \hat{\theta}_i)}{\bar{\rho}_i - \rho_i} = 1 - w_{i2}(x_{MS}, \hat{x}_{MS})$$

- Enfin pour l'équation statique Γ_c :

$$\hat{\Gamma}_c = \begin{bmatrix} -p_{10} \sin(q_1) \hat{\theta}_1 \\ -p_9 \sin(q_1 + q_2) \hat{\theta}_2 \\ p_{10} \cos(q_1) \hat{\theta}_1 \\ p_9 \cos(q_1 + q_2) \hat{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \\ \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{bmatrix} - \hat{\Gamma}_1 \quad (10)$$

III. Résultats

En premier lieu, pour confirmer le bien-fondé de l'approche, une partie simulation est proposée. Elle permet d'avoir accès à toutes les variables du système S3S simulé et donc de vérifier que, sur la base des seules informations des angles mesurés, la cascade des 2 observateurs-PI permet de converger vers les variables non mesurées. Notamment, elle permet de valider l'estimation des couples, qui se trouve être en bout de chaîne, où toute incertitude, erreur de modélisation s'y répercute. En second lieu, la cascade est testée sur des données obtenues à partir d'essais cliniques. Elle permet là aussi de retrouver les couples articulaires, y compris le couple passif au niveau lombaire.

1. Etude de convergence en simulation numérique

Le principe de la simulation numérique consiste à appliquer, en boucle fermée, la loi de contrôle définie dans (Guerra et al., 2020) afin de stabiliser le modèle non linéaire complet S3S. Cette loi de contrôle, délivre les entrées du modèle S3S c'est-à-dire les couples articulaires : $u = \Gamma_i$, $i \in \{0, 1, 2\}$. La cascade d'observateur-PI (8), (9) et (10) n'utilise comme entrées que les mesures des angles $y = [q_0 \ q_1 \ q_2]$, et estime les vitesses articulaires ainsi que les couples articulaires non mesurés. Pour des raisons de simulation, on teste la robustesse de l'OEI sous une perturbation sur la vitesse simulée du tronc.

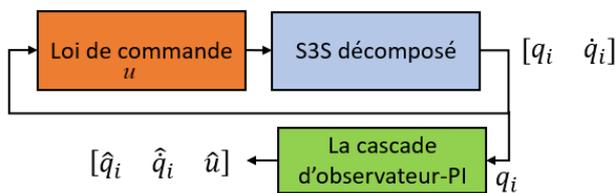


Figure 4: protocole de simulation numérique

Les figures ci-après présentent la vitesse angulaire de l'épaule simulée et estimée et l'erreur d'estimation. Elles correspondent à un essai pour lequel une perturbation de type sinusoïdale a été injectée entre les instants 2 et 4 secondes. Cette perturbation correspond à l'amplitude des accélérations utilisées chez les sujets lésés médullaires pendant les exercices de rééducation (Bjerkefors et al., 2007).

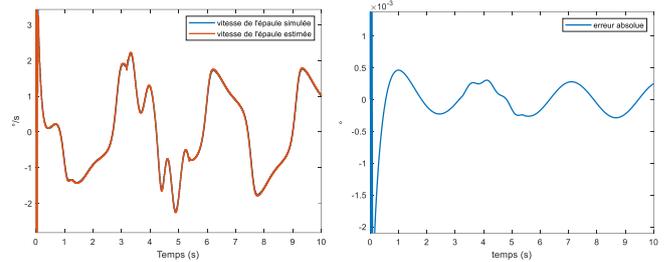
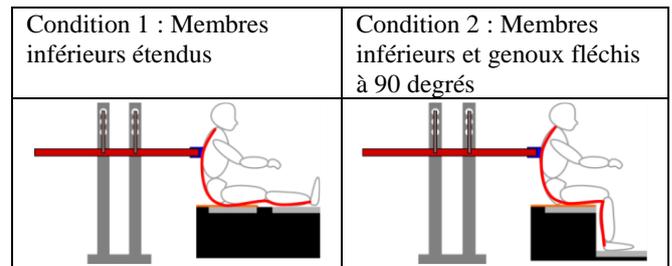


Figure 5: la vitesse angulaire de l'épaule simulée et estimée, et à droite, l'erreur d'estimation

L'erreur est faible, de l'ordre de 10^{-3} , ce qui confirme la fiabilité des résultats d'estimation.

2. Etude de convergence en essais cliniques et interprétation des couples articulaires estimés

Un des objectifs de cette étude est de montrer que l'on peut obtenir à partir de la résolution de problèmes locaux, une estimation des couples non mesurés, dont le couple passif au niveau lombaire. Afin de solliciter particulièrement le couple passif, l'expérience de l'assise longue (jambes tendues) (Shirado et al., 2004) est intégrée au protocole expérimental. Ce protocole expérimental a reçu l'accord éthique du Centre de Recherche Interdisciplinaire en réhabilitation du Grand-Montréal (CRIR-1083-0515R). 26 sujets atteints d'une lésion médullaire (dont 14 avec une lésion située au-dessus de la vertèbre T7) ont été impliqués. Les sujets ont pour objectif de maintenir leur équilibre assis en maintenant les membres supérieurs (MS) levés. Une force déstabilisante appliquée au niveau de la vertèbre T8 vient alors perturber leur position assise. Cette force externe a pour but de challenger la stabilité assise tout en garantissant la sécurité de ce dernier (John et al., 2010). Deux conditions expérimentales de position des membres inférieurs sont étudiées :



Pour chaque condition, cinq essais ont été réalisés et mesurés. La consigne demande au sujet de lever les membres supérieurs et de conserver cette position. Deux à trois secondes après, une force dans la direction antérieure est appliquée afin de déstabiliser le sujet. Le sujet doit alors maintenir son équilibre assis en adoptant des stratégies compensatoires par l'action des membres supérieurs. Enfin, 2 à 3 secondes après et une fois équilibré, l'expérimentateur indique au sujet de baisser les bras. La cascade d'observateur-PI est utilisée entre l'instant où le sujet est stabilisé et la fin de stabilisation.

Deux sujets différents ont été choisis : une femme âgée de 32 ans (poids : 55 Kg et taille : 162 cm) ayant une lésion médullaire depuis 3 ans au niveau de la vertèbre T6 et un homme âgé de 53 ans (poids : 100 Kg et taille : 180 cm) ayant

une lésion médullaire au niveau de la vertèbre T11 depuis 10 ans. La figure 6 présente l'angle articulaire lombaire (q_0) pour les sujets 1 et 2 en fonction des conditions expérimentales sur les membres inférieurs (MI pliés ou MI tendus). L'angle est positif, tronc en arrière de la verticale, pour une position MI pliés, et négatif, tronc en avant de la verticale, pour une position MI tendus.

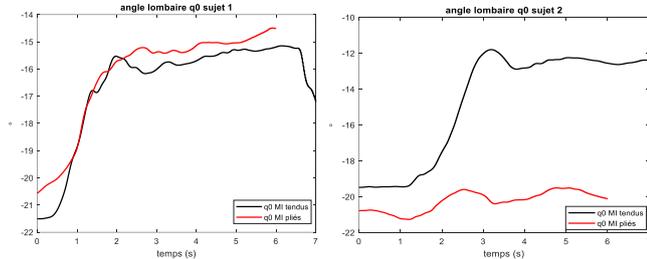


Figure 6: l'angle du tronc, q_0 en fonction des conditions expérimentales

Pour ces mêmes angles, le couple articulaire estimé au niveau lombaire est présenté en figure 7.

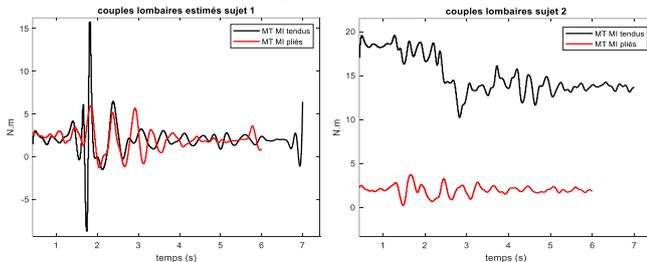


Figure 7 : Estimation du couple passif (ou lombaire)

Ce couple passif est, en moyenne, pour les 2 sujets positif. Ce couple contribue à limiter la flexion du tronc. Il est, pour le sujet 1, en moyenne de 5 N.m (resp. de 3.25 N.m pour le sujet 2) pour une position pliée des MI, et de 10 N.m (resp. de 12 N.m pour le sujet 2) pour une position étendue des MI. Pour ces 2 sujets, le couple passif est donc bien supérieur pour une position étendue des MI, ce qui est en accord avec (Shirado et al., 2004). En position étendue des MI, le tronc se situe en avant de la verticale. Le couple lombaire est positif au début de chaque acquisition ce qui est cohérent d'un point de vue mécanique car l'angle lombaire est négatif au même moment (un couple articulaire est dit positif s'il fait tourner un segment corporel dans le sens trigonométrique).

IV. DISCUSSION

Le but principal de ce papier est d'améliorer notre compréhension de la stabilité assise des personnes lésées médullaires. Dans ce cadre, des contributions actives et passives qui contrôlent la position assise en dépit de l'absence d'action motrices en dessous du niveau de la lésion ont été recherchées. Un modèle bio-inspiré à partir de mouvements observés chez les sujets médullaires pendant des exercices de rééducation a été proposé. Par le biais de ce modèle, des estimateurs des couples articulaires humains à travers une approche d'observateurs-PI en cascade a été conçu. La synthèse de ces observateurs fait appel à un formalisme quasi-LPV ou de Takagi-Sugeno et d'outils numériques de solutions d'équations

linéaires matricielles (non présentés dans ce papier). Les résultats de simulation numérique permettent de valider l'ensemble de l'approche, en montrant que la cascade d'observateur-PI est apte à reconstruire les données d'entrée du modèle S3S non linéaire. Elle est confirmée sur des résultats cliniques obtenus sur des patients. Par rapport aux méthodologies développées précédemment (Blandeau 2018), la possibilité de décomposer le problème global d'observation en problèmes de taille réduite, permet d'envisager de travailler avec des modèles encore plus complexes, par exemple un S3S-3D. De plus, cette méthodologie est pertinente par rapport à la technique de la dynamique inverse couramment employée en biomécanique, qui consiste à dériver des données expérimentales de position pour récupérer vitesse articulaire et accélération d'un segment corporel. L'inconvénient de cette dérivation est qu'elle propage les erreurs d'estimation et peut alors biaiser considérablement les variables en bout-de-chaine que sont les couples articulaires.

Cette approche qui montre son intérêt, notamment d'un point de vue méthodologique, va permettre la mise en place de modèles plus élaborés. Ils sont utiles pour améliorer la compréhension et réaliser des tests plus évolués. Par exemple, les enregistrements expérimentaux ont montré que pour contrer la perturbation, des sujets ont adopté des stratégies compensatoires par l'action des membres supérieurs en dehors du plan sagittal. Ces derniers ne peuvent pas être traités directement avec le modèle S3S et une extension au 3D est en cours.

V. CONCLUSION

Modéliser et estimer est une voie prometteuse pour la compréhension des situations telle que la stabilité assise des lésés médullaires. L'approche globale présentée dans (Blandeau 2018) a ouvert cette voie, avec des limitations dues à la complexité des problèmes à résoudre ; dont les solutions sont à la limite de ce que les solveurs sont capables de faire aujourd'hui. Aller plus loin nécessite donc de réduire la complexité des problèmes à résoudre, et une décomposition en problèmes locaux a été proposée dans (Srihi et al., 2021). Une preuve de convergence du système global à partir d'observateurs locaux a montré que cette possibilité est prometteuse. Cette approche a été exploitée dans ce papier aussi bien en simulation que dans un contexte clinique. Elle permet d'envisager les étapes suivantes (modèles 3D) avec confiance. Le but, étant alors de pouvoir, à terme, fournir des données pertinentes aux rééducateurs physiques, leur permettant de mieux suivre le patient et éventuellement de voir les progrès réalisés, par exemple au cours d'une rééducation.

REFERENCES

- Blandeau, M. (2018). Modélisation Et Caractérisation De La Stabilité En Position Assise Chez Les Personnes Vivant Avec Une Lésion De La Moelle Épinière. PhD Thesis. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Blandeau M., Estrada-Manzo V., Guerra T.M., Pudlo P., Gabrielli F. (2018). Fuzzy unknown input observer for understanding sitting control of persons living with spinal cord injury. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 67, 381-389.

- Bjerkefors, A., Carpenter, M. G. & Thorstensson, A. (2007) Dynamic trunk stability is improved in paraplegics following kayak ergometer training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 17 (6), 672–679.
- Chaffin, D. B. (1969) A computerized biomechanical model—Development of and use in studying gross body actions. *Journal of Biomechanics*. 2 (4), 429–441.
- Crisco, J. J., Panjabi, M. M., Yamamoto, I. & Oxland, T. R. (1992a) Euler stability of the human ligamentous lumbar spine. Part I: Theory. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*. 7 (1), 19–26.
- Crisco, J. J., Panjabi, M. M., Yamamoto, I. & Oxland, T. R. (1992b) Euler stability of the human ligamentous lumbar spine. Part II: Experiment. *Clinical Biomechanics*. 7 (1), 27–32.
- Dempster, W. T. (1955) The Anthropometry of Body Action. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 63 (4), 559–585.
- Dumas, R., Chèze, L. & Verriest, J.-P. (2007) Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters. *Journal of Biomechanics*. 40 (3), 543–553.
- Giangregorio, L. & McCartney, N. (2006) Bone Loss and Muscle Atrophy in Spinal Cord Injury: Epidemiology, Fracture Prediction, and Rehabilitation Strategies. *The Journal of Spinal Cord Medicine*. 29 (5), 489–500.
- Grangeon, M., Gagnon, D., Gauthier, C., Jacquemin, G., Masani, K. & Popovic, M. R. (2012) Effects of upper limb positions and weight support roles on quasi-static seated postural stability in individuals with spinal cord injury. *Gait & posture*. 36 (3), 572–579.
- Gripá H.F., Sabería A., Johansen T.A. (2012). Observers for interconnected nonlinear and linear systems. *Automatica*, 48 (7), 1339-1346.
- Guerra T.M., Estrada-Manzo V., Lendek Zs. (2015). Observer design for Takagi–Sugeno descriptor models: An LMI approach. *Automatica* 52, 154-159
- Guerra T.M., Blandeau M., Nguyen A.T., Srihi H., Dequidt A. (2020). Stabilizing unstable biomechanical model to understand sitting stability for persons with spinal cord injury. IFAC- PapersOnLine, World Congress. Berlin, Gemany.
- Janssen-Potten, Y. J. M., Seelen, H. A. M., Drukker, J., Reulen, J. P. H. & Drost, M. R. (1999) Postural muscle responses in the spinal cord injured persons during forward reaching. *Ergonomics*. 42 (9), 1200–1215.
- John, L. T., Cherian, B. & Babu, A. (2010) Postural control and fear of falling in persons with low-level paraplegia. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*. 47 (5), 497.
- Kapandji, A. I. (2005a) *Anatomie fonctionnelle I: Membres supérieurs*. Physiologie de l'appareil locomoteur. 6th edition. Maloine.
- Kapandji, A. I. (2005b) *Anatomie fonctionnelle III: Tête et rachis*. 6th edition. Maloine.
- Lendek Zs., Babuska R., De Schutter B. (2008). Stability of cascaded fuzzy systems and observers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 17 (3), 641-653.
- Lendek, Z., Guerra, T. M., Babuska, R. & de Schutter, B. (2011) *Stability Analysis and Nonlinear Observer Design using Takagi-Sugeno Fuzzy Models*. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer.
- Luenberger, D. (1971) An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 16 (6), 596–602.
- Masani, K., Popovic, M. R., Nakazawa, K., Kouzaki, M. & Nozaki, D. (2003) Importance of Body Sway Velocity Information in Controlling Ankle Extensor Activities During Quiet Stance. *Journal of Neurophysiology*. 90 (6), 3774–3782.
- Milosevic, M., Gagnon, D. H., Gourdou, P. & Nakazawa, K. (2017) Postural regulatory strategies during quiet sitting are affected in individuals with thoracic spinal cord injury. *Gait & Posture*. 58 (Supplement C), 446–452.
- Ortiz A., Guerra T.-M., Estrada V., Lauber J. (2021). Choosing an Adequate convex structure for controller and observer gains in Takagi-Sugeno control systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54(4), 206-211
- Panjabi, M. M. (1992a) The stabilizing system of the spine Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *Journal of spinal disorders & techniques*. 5 (4), 383–389.
- Panjabi, M. M. (1992b) The Stabilizing System of the Spine. Part II. Neutral Zone and Instability Hypothesis. *Journal of Spinal Disorders*. 5 (4), 390–397.
- Qu, X., Nussbaum, M. A. & Madigan, M. L. (2007) A balance control model of quiet upright stance based on an optimal control strategy. *Journal of Biomechanics*. 40 (16), 3590–3597.
- Reeves, N. P., Cholewicki, J. & Narendra, K. S. (2009) Effects of reflex delays on postural control during unstable seated balance. *Journal of Biomechanics*. 42 (2), 164–170.
- Shirado, O., Kawase, M., Minami, A. & Strax, T. E. (2004) Quantitative evaluation of long sitting in paraplegic patients with spinal cord injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 85 (8), 1251–1256.
- Srihi H, Guerra T-M, Nguyen A-T, Pudlo P and Dequidt A (2021) Cascade Descriptor Observers: Application to Understanding Sitting Control of Persons Living with Spinal Cord Injury. *Front. Control. Eng.* 2:710271. doi: 10.3389/fcteg.2021.710271.
- Takagi, T. & Sugeno, M. (1985) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. SMC-15 (1), 116–132.
- Tanaka, M. L., Ross, S. D. & Nussbaum, M. A. (2010) Mathematical modeling and simulation of seated stability. *Journal of Biomechanics*. 43 (5), 906–912.
- Wyndaele, M. & Wyndaele, J.-J. (2006) Incidence, prevalence and epidemiology of spinal cord injury: what learns a worldwide literature survey? *Spinal Cord*. 44 (9), 523–529.

Évaluation de l'influence du professionnel de santé dans l'application du jeu sérieux RehaBEElitation pour les patients atteints de la maladie de Parkinson

Isabela Alves Marques^{1,6}, Luanne Mendes^{1,6}, Camille Alves^{2,6}, Luiza Luiz¹, Rodrigo Rosa¹, Kennedy Lima¹, Angela Abreu¹, Edgard Júnior³, Fábio Oliveira⁴, Marcus Vieira⁵, Guy Bourhis⁶, Pierre Pino⁶, Adriano Pereira², Eduardo Naves², Yann Morère⁶, Adriano de Oliveira Andrade¹

¹ Center for Innovation and Assessment of Technologies in Health (NIATS), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

² Laboratory of Assisted Technology (NTA), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

³ Computer Graphics Laboratory (CG), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

⁴ Federal Institute of Education, Science and Technology of Brasília - Brasília Campus (IFB), Brasília, Brazil

⁵ Bioengineering and Biomechanics Laboratory, Federal University of Goiás, Goiania, Brazil

⁶ Laboratory of Design, Optimization and Modeling of Systems (LCOMS), University of Lorraine, Metz, France

Résumé - Afin de proposer un système d'évaluation en ligne et objectif de la maladie de Parkinson (MP), il est nécessaire que l'environnement de collecte soit aussi humanisé que possible et pour que cela soit possible, il est nécessaire de comprendre la perception et les sentiments de l'utilisateur. Ainsi, cette étude vise à identifier la perception de l'utilisateur lorsqu'il interagit avec un jeu sérieux, avec ou sans la supervision d'un professionnel de santé. Trente personnes ont été recrutées, divisées en 2 groupes (GE, 15 personnes atteintes de la MP et GC, 15 personnes en bonne santé), l'âge et le sexe étant appariés. Le système RehaBEElitation utilisé dans cette étude, permet d'effectuer, de surveiller et d'évaluer les exercices de réadaptation de la main. Les expériences ont été réalisées dans un environnement contrôlé dans 2 conditions différentes : avec l'aide d'un professionnel de la santé (Avec Stimuli (S)) et sans aucune forme d'aide (Sans Stimuli (SS)). Les sessions ont été réalisées de manière aléatoire et le même jour. Les paramètres évalués sont les suivants : Circumplex Model of Affect (CMA) ; Short Flow State Scale (SFSS) ; Activity Evaluation Scale (Activation and Sensation) (AES) ; Multidimensional Boredom State Scale (MBSS) ; State-Trait Anxiety Inventory (STAI) ; Self Manakin Assessment (SAM). Pour vérifier les différences statistiquement significatives, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué: (i) pour GC et GE, dans les conditions S vs SS; (ii) pour CG, dans les conditions S vs SS et ; (iii) dans le groupe EG dans les conditions S vs SS. Les résultats montrent que pour le GE, le soutien du professionnel de santé peut influencer l'interaction avec le système RehaBEElitation.

Mots clés: maladie de Parkinson; RehaBEElitation; professionnel de santé; évaluation objective.

I. INTRODUCTION

La maladie de Parkinson (MP) est une affection neurodégénérative qui touche environ 3 % de la population âgée de plus de 65 ans et jusqu'à 5 % des personnes âgées de plus de 85 ans [1]. Il est possible que ce nombre augmente considérablement au cours des prochaines décennies, car aux aspects liés au vieillissement de la population s'ajoute une

relation possible entre les maladies neurodégénératives, comme la MP, et les séquelles de la COVID-19 [2].

Cette maladie est extrêmement invalidante et nécessite une surveillance constante [3]. Dans la pratique clinique, le suivi de la progression de la maladie est effectué à l'aide d'échelles, et l'étalon-or pour l'évaluation de la MP est le MDS-UPDRS (Movement Disorder Society-Unified Parkinson's Disease Rating Scale) [4]. Cependant, l'évaluation clinique est complexe, prend du temps et nécessite des évaluateurs ayant de bonnes connaissances et de l'expérience pour un diagnostic correct [5]. Ce fait devient un problème sérieux, car l'incidence de la MP augmente chaque jour, est progressive et nécessite des ajustements périodiques des médicaments [3].

Il existe donc une demande croissante d'intégration d'instruments technologiques pour le suivi des personnes atteintes de la maladie de Parkinson, car ils peuvent notamment fournir des évaluations objectives, favoriser un suivi continu et permettre des évaluations à distance [3], [6], [7]

Cependant, bien que la mise en œuvre de dispositifs technologiques dans le domaine de la santé ait amélioré, par exemple, la prévention des maladies, le diagnostic, etc., elle peut entraîner une déshumanisation et une dépersonnalisation de la relation entre le professionnel de la santé et le patient [8]. Cette question est extrêmement préoccupante, car l'environnement d'évaluation et/ou de collecte des données doit être le plus humanisé possible, puisque la performance lors de la consultation clinique ou dans un environnement stressant ne reflète pas toujours la performance du patient dans un environnement familial [9].

Afin de proposer une évaluation motrice humanisée et centrée sur l'utilisateur, cette étude visait à évaluer la perception et l'émotion des volontaires quant à l'influence du professionnel de santé lors de l'interaction avec un nouveau système d'évaluation pour les personnes atteintes de la MP (RehaBEElitation).

II. MATERIAUX ET METHODES

Ce projet a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche (Universidade Federal de Uberlândia), avec le certificat de soumission à l'examen éthique 43229921.8.0000.5152.

A. Sélection de l'échantillon

Pour cette étude, un échantillon de commodité de 15 sujets atteints de la maladie de Parkinson (groupe expérimental - GE) et 15 sujets sains (groupe de contrôle - GC) a été sélectionné, le sexe et l'âge étant appariés.

Les critères d'éligibilité étaient les suivants: avoir un diagnostic confirmé de la MP; une MP légère à modérée (niveaux I, II et III de Hoehn & Yahr). [10] pas d'antécédents d'autres maladies neurologiques ou musculo-squelettiques; pas de troubles visuels (test d'acuité visuelle à l'aide de l'échelle optométrique de Snellen) [11], ni de perte auditive grave (questionnaire d'auto-évaluation sur la perte auditive) ; avoir un score au Mini Mental State Examination > 22.

B. RehaBEElitation

Le système RehaBEElitation [12] est un outil technologique développé aux seins de nos laboratoires qui permet de recueillir les signaux moteurs des personnes atteintes de la maladie de Parkinson, au moyen de capteurs portables, pendant l'interaction avec un jeu sérieux (JS), basé sur la réalité virtuelle (VR). Grâce à ce système, il est possible d'évaluer les signes moteurs de la maladie de Parkinson, d'allonger le temps de surveillance, d'obtenir un engagement et une efficacité accrues du patient lors de l'évaluation clinique, car c'est l'une des principales raisons de l'utilisation du JS et de la RV en environnement thérapeutique [13].

C. Protocole expérimental

Le protocole expérimental était le même pour les GC et les GE. Les expériences ont été réalisées dans un environnement contrôlé, sur une seule journée. Avant de commencer le protocole expérimental, une session de formation d'environ 40 minutes a été organisée et a permis aux volontaires d'avoir un premier contact avec toutes les phases du JS. Cette étape est très importante car elle permet aux volontaires d'avoir une première expérience avec le système, de manière spontanée, puisque tous les participants ont déclaré qu'ils n'avaient jamais eu d'expérience préalable avec un jeu 3D basé sur la RV.

Après la formation, le protocole expérimental commence par la question "Comment vous sentez-vous aujourd'hui?", en utilisant le modèle Circumplex de l'affect (CMA) (adapté) [14] (Figure 1) dans le but d'identifier l'émotion du participant avant le début de la collecte des données. Ensuite, on réalise de manière aléatoire les sessions, Avec Stimulus (S) et Sans Stimulus (SS).

Lors de la session avec les patients S, les professionnels ont favorisé la facilitation et/ou le soutien social, par des retours positifs et des instructions sur le jeu. Pendant la session avec les patients SS, les professionnels sont restés silencieux, seuls les informations issues du JS ont apporté un soutien aux volontaires. Les volontaires ont interagi avec RehaBEElitation pendant environ 20 minutes, 5 minutes pour chaque phase ou jusqu'à ce

qu'ils aient atteint tous les objectifs requis pour passer à la phase suivante. Tous les volontaires ont interagi avec le niveau facile.

Les questionnaires suivants ont été appliqués après chaque session expérimentale :

- (1) Modèle Circumplex de l'Affect (CMA) (Figure 1) [14] est composé de 12 émotions et une valeur numérique a été adoptée pour chaque émotion. Ces valeurs sont réparties en 4 quadrants, où les 2 premiers quadrants indiquent des émotions positives, l'accent étant mis sur le premier quadrant, qui indique une bonne expérience de flux, c'est-à-dire que le fait de se trouver dans le premier quadrant indique que l'individu est stimulé et engagé dans l'activité proposée.

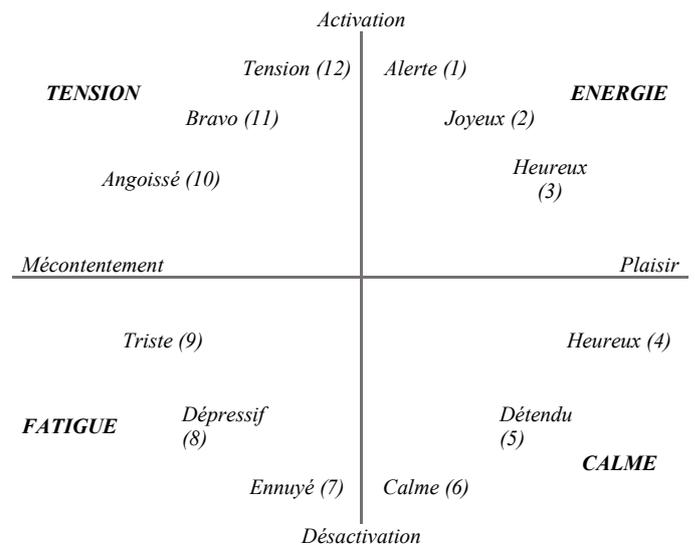


Figure 1 : Modèle Circumplex de l'affect (adapté)

- (2) Manakin d'auto-évaluation (SAM) (Figure 2) [15] est une échelle visuelle destinée à mesurer le plaisir, l'excitation et la dominance RehaBEElitation. Pour permettre l'analyse, des scores de 1 à 9 ont été adoptés pour chacun des items, classés par ordre croissant.

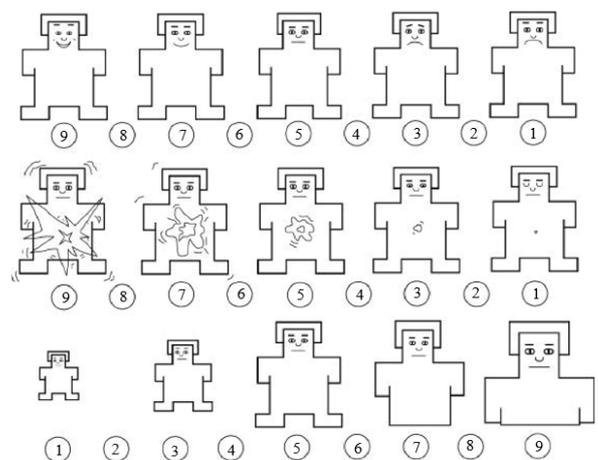


Figure 2 : Manakin d'auto-évaluation

- (3) Échelle d'état d'écoulement court (SFSS) [16]. Ce questionnaire mesure la perception de l'utilisateur concernant les 9 dimensions du flux. Pour répondre au questionnaire, les utilisateurs devaient répondre à la question suivante : "Lorsque je participe à cette activité...". Les réponses correspondent à une échelle de Likert allant de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord), le score final des réponses peut varier entre 9 et 45, les chiffres les plus élevés indiquant une meilleure expérience du système.
- (4) Barème pour l'évaluation des activités (AES) [17] consiste à poser 2 questions : "Dans quelle mesure avez-vous apprécié l'activité ? (échelle de sentiments), allant de -5 (très mauvais) à 5 (très bon), et " Dans quelle mesure étiez-vous activé/stimulé ? ". (échelle d'activation), allant de 1 (peu activé) à 6 (très activé).
- (5) Échelle multidimensionnelle de l'état d'ennui (MBSS) [18] qui est composé de 6 items, le score est également obtenu par une échelle de Likert, allant de 1 (fortement en désaccord) à 5 (fortement en accord). Les scores peuvent aller de 6 à 30, 6 signifiant aucun ennui et 30 très ennuyeux ;
- (6) State-Trait Anxiety Inventory (STAI) (état) [19] composé de 20 items, le score est obtenu au moyen d'une échelle de Likert, les réponses peuvent varier de 1 (absolument pas) à 4 (beaucoup), ainsi, le score minimum est de 20 (pas du tout anxieux) et le maximum de 80 (très anxieux).

D. Analyse des données

Pour l'analyse des données, le logiciel libre The R Project for Statistical Computing [20] a été utilisé. La description et la présentation des données ont été effectuées au moyen de statistiques descriptives. Pour vérifier s'il existe des différences statistiquement significatives entre les groupes, le test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé.

III. RÉSULTATS

Les caractéristiques générales des volontaires et les statistiques descriptives sont présentées dans les tableaux I et II.

TABLEAU I : DONNEES GENERALES DES PARTICIPANTS A LA RECHERCHE

	Groupe de contrôle	Groupe expérimental
Participants	15	15
Âge	67,05±10,22	66,9±10,5
Sexe (Fem_Mas)	06_09	06_09
Date du diagnostic (années)	--	10,93±7,32
Dominance (D_G)	15 D	15 D
Activité physique (O_N)	8_7	5_10
Éducation (PCU_L_EP) *	8_4_3	2_4_9
MDS-UPDRS (Partie III)	--	39,420,6
H&Y	--	2,2±0,7

**PCU : premier cycle universitaire - L: lycée - EP: école primaire

TABLEAU II : DONNEES STATISTIQUES DESCRIPTIVES POUR TOUS LES QUESTIONNAIRES APPLIQUES

	Groupe de contrôle		Groupe expérimental	
	Avec Stimulus	Aucun stimulus	Avec Stimulus	Aucun stimulus
	Médiane	Médiane	Médiane	Médiane
CMA	4	6	3	6
SAM	23	21	25	19
SFSS	37	37	37	34
AES	9	9	10	9
MBSS	7	9	8	10
STAI	50	49	50	50

Pour vérifier l'existence de différences statistiquement significatives entre les conditions S vs SS, trois comparaisons ont été effectuées:

- I. En considérant tous les volontaires (GC + GE).
- II. Au sein de GC.
- III. Au sein de GE.

Les résultats de ces tests statistiques sont présentés dans le tableau III. La colonne "le plus haut score" indique quelle condition (S ou SS) a obtenu le plus haut score.

TABLEAU III : RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES

Questionnaires	Test de comparaison					
	GC + GE		GC		GE	
	p value	Le plus haut score	p value	Le plus haut score	p value	Le plus haut score
CMA	0,03*	S<SS	0,2	--	0,06	--
SAM	0,01*	S>SS	0,24	--	0,02*	S>SS
SFSS	0,17	--	0,87	--	0,11	--
AES	0,24	--	0,98	--	0,08	--
MBSS	0,11	--	0,48	--	0,14	--
STAI	0,88	--	0,26	--	0,21	--

*valeur $p \leq 0,05$

IV. DISCUSSION

Cette étude propose d'évaluer, du point de vue de l'utilisateur, si la présence ou l'absence de facilitation et/ou de soutien social promu par les professionnels de la santé pendant l'interaction avec le système RehaBEElitation, peut influencer la perception ou l'émotion des personnes atteintes de la MP par rapport au système.

En analysant le Tableau III, il est possible de vérifier que dans la comparaison impliquant tous les volontaires, dans les conditions S vs SS, des différences statistiquement significatives ont été trouvées dans le modèle Circumplex de l'affect ($p = 0,03$)

et dans l'auto-évaluation Manakin ($p = 0,01$), avec des scores favorables à la condition S (Tableau II et tableau III).

Dans la condition II, qui comparait les résultats du groupe CG, avec et sans la présence du stimulus, aucune différence statistiquement significative n'a été trouvée. Cela est peut-être dû au fait que le groupe est composé d'individus en bonne santé, qui ne nécessitent pas de soins particuliers, ce qui peut avoir été le facteur décisif pour ne pas comprendre la pertinence de la présence d'une personne qui pourrait compatir à leur état de santé [21].

Pour l'CMA, les valeurs entre 1 et 6 indiquent des émotions positives et les valeurs entre 1 et 3 indiquent un état de flux plus élevé, c'est-à-dire qu'elles montrent que l'individu est plus engagé dans l'activité proposée [24], [25]. En analysant le Tableau II, il est possible de vérifier que pendant la session S, les sujets de l'GE ont présenté une médiane égale à 3, indiquant un état de flow, tandis que dans la session SS, la médiane était de 6, déjà à la fin du deuxième quadrant, dans la dernière émotion positive. Dans le GC, ce nombre variait de 4 (S) à 6 (SS).

Dans l'échelle visuelle SAM, le score maximum est de 27. En observant le Tableau II, il est possible de vérifier que dans la condition S, le GE a atteint une médiane de 25, tandis que dans la condition SS, la médiane était de 19, ce qui indique une nette différence entre les deux conditions, pour le GC, ce nombre variait de 23 (S) à 21 (SS).

Ainsi, l'utilisation de ces questionnaires montre que lorsque le professionnel de santé apporte son soutien, cela produit un effet positif sur les participants lors de l'interaction avec RehaBEElitation. Il est à noter que ces deux échelles mesurent l'affect de manière visuelle d'une manière simple en ne nécessitant qu'un seul essai (CMA), alors que les autres échelles nécessitent trois essais (SAM).

Dans GC, en comparant les conditions S vs SS, aucune différence significative n'a été trouvée. Une explication possible est le fait que le groupe est composé d'individus en bonne santé, qui ne nécessitent pas de soins particuliers, ce qui a pu être le facteur décisif pour ne pas considérer la pertinence de la présence d'une personne qui pourrait compatir à leur état de santé [26].

GE a présenté des différences significatives entre les conditions S vs SS pour l'auto-évaluation Manakin. Cela peut s'expliquer par le fait que les personnes atteintes de la maladie de Parkinson (ou celles qui ont besoin de soins particuliers) ont besoin d'une relation authentique entre les professionnels de la santé, les patients et les soignants. Cela met en évidence le fait qu'il ne suffit pas de traiter la maladie ou les symptômes, il doit y avoir de l'empathie entre le professionnel et les patients [27]. Par conséquent, être attentif, intéressé, concerné et sensible à la douleur de l'autre sont des moyens importants pour établir un lien avec les patients et humaniser les soins, même dans le cadre de soins faisant appel à la technologie.

En ce qui concerne les autres questionnaires, étant donné qu'ils portent sur plusieurs domaines, un examen plus approfondi est nécessaire pour comprendre s'il existe, dans une question spécifique, une différence entre les deux conditions (S vs SS).

V. CONCLUSION

Dans cette étude, il a été possible de vérifier que l'état de santé du participant et son besoin de soins particuliers peuvent nécessiter des interactions technologiques avec le soutien et l'empathie du professionnel de santé. L'implication est que, pour promouvoir un environnement d'évaluation plus familier et humanisé, il est nécessaire que le professionnel de santé, en plus d'être impliqué dans le processus thérapeutique, puisse accueillir l'utilisateur et ainsi permettre l'accès à tous les avantages de la mise en œuvre de ce type de technologie dans la réhabilitation.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé avec le soutien du Conseil national pour le développement scientifique et technologique (CNPq), Coordination pour l'amélioration du personnel de l'enseignement supérieur (CAPES - Programme CAPES/DFATD-88887.159028/2017-00, Programme CAPES/COFECUB-881.370894/2019-01) et la Fondation pour le Soutien à la Recherche de l'État de Minas Gerais. A. O. Andrade est membre du CNPq, Brésil (304818/2018-6), Eduardo Naves est membre du CNPq, Brésil (307754/2020-0), et L. C. Mendes, I. A. Marques et C. M. Alves sont membres du Programme CAPES/COFECUB (88887.612297/2021-00, 88887.628121/2021-01 et 88887.662002/2022-00, respectivement).

RÉFÉRENCES

- [1] A. Edinoff *et al.*, "Chronic Pain Treatment Strategies in Parkinson's Disease," *Neurol. Int.*, vol. 12, no. 3, pp. 61–76, Dec. 2020.
- [2] K. Makhoul and J. Jankovic, "Parkinson's disease after COVID-19," *J. Neurol. Sci.*, vol. 422, Mar. 2021.
- [3] L. M. D. Luiz, I. A. Marques, J. P. Folador, and A. O. Andrade, "Intra and inter-rater remote assessment of bradykinesia in Parkinson's disease," *Neurología*, Sep. 2021.
- [4] C. G. Goetz *et al.*, "Movement Disorder Society-sponsored revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale presentation and clinimetric testing results," *Mov. Disord.*, vol. 23, no. 15, pp. 2129–2170, Nov. 2008.
- [5] T. D. Fonticoba, D. S. García, and M. M. Arribi, "Inter-rater variability in motor function assessment in Parkinson's disease between experts in movement disorders and nurses specialising in PD management," *Neurologia*, vol. 34, no. 8, pp. 520–526, 2019.
- [6] C. G. Goetz, G. T. Stebbins, and S. Luo, "MDS-UPDRS use in the COVID era," *Mov. Disord.*, p. mds.28094, Apr. 2020.
- [7] A. de Oliveira Andrade *et al.*, "Task-Specific Tremor Quantification in a Clinical Setting for Parkinson's Disease," *undefined*, vol. 40, no. 6, pp. 821–850, Dec. 2020.
- [8] E. Lovato *et al.*, "Humanisation in the emergency department of an Italian hospital: new features and patient satisfaction," *Emerg. Med. J.*, vol. 30, no. 6, pp. 487–491, Jun. 2013.
- [9] A. H. Snijders, C. A. Haaxma, Y. J. Hagen, M. Munneke, and B. R. Bloem, "Freezer or non-freezer: Clinical assessment of freezing of gait," *Park. Relat. Disord.*, vol. 18, no. 2, pp. 149–154, 2012.
- [10] "Hoehn and Yahr Scale," in *Handbook of Disease Burdens and*

- Quality of Life Measures*, 2010, pp. 4226–4226.
- [11] “Escala optométrica de Snellen- Avaliação da acuidade visual.”
- [12] L. Cardoso Mendes *et al.*, “RehaBEElitation : Un Jeu Sérieux pour la Rééducation des Membres Supérieurs des Personnes Atteintes de la Maladie de Parkinson,” in *RehaBEElitation*, 2021, pp. 35–40.
- [13] M. Tarousi *et al.*, “Serious games for Parkinson’s Disease management as implemented in PROPHETIC platform,” *Health Informatics J.*, vol. 27, no. 2, 2021.
- [14] J. A. Russell, “A circumplex model of affect,” *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 39, no. 6, pp. 1161–1178, 1980.
- [15] M. M. Bradley and P. J. Lang, “Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential,” *J. Behav. Ther. Exp. Psychiatry*, vol. 25, no. 1, pp. 49–59, Mar. 1994.
- [16] S. A. Jackson, A. J. Martin, and R. C. Eklund, “Long and short measures of flow: The construct validity of the FSS-2, DFS-2, and new brief counterparts,” *J. Sport Exerc. Psychol.*, vol. 30, no. 5, pp. 561–587, 2008.
- [17] R. Sobral Monteiro-Junior *et al.*, “Respostas afetivas e cardiovasculares de mulheres jovens a uma sessão de treinamento com Nintendo Wii: uma nova perspectiva de exercício físico,” *Rev. Bras. Atividade Física Saúde*, vol. 19, no. 3, pp. 361–361, Jun. 2014.
- [18] S. A. Fahlman, K. B. Mercer-Lynn, D. B. Flora, and J. D. Eastwood, “Development and Validation of the Multidimensional State Boredom Scale,” *Assessment*, vol. 20, no. 1, pp. 68–85, Feb. 2013.
- [19] C. D. Spielberger, “State-Trait Anxiety Inventory,” *Corsini Encycl. Psychol.*, pp. 1–1, Jan. 2010.
- [20] R Core Team, “A language and environment for statistical computing,” *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.*, 2021. .
- [21] S. G. Henry, A. Fuhrel-Forbis, M. A. M. Rogers, and S. Eggly, “Association between nonverbal communication during clinical interactions and outcomes: A systematic review and meta-analysis,” *Patient Education and Counseling*, vol. 86, no. 3, pp. 297–315, 2012.

Évaluation de l'utilisabilité d'un jeu sérieux pour la rééducation des personnes atteintes de la maladie de Parkinson

Luanne Cardoso Mendes^{1,5}, Isabela A. Marques^{1,5}, Camille M. Alves^{2,5}, Angela A. R. de Sá², Rodrigo R. Rosa¹, Kennedy R. Lima¹, Luiza M. D. Luiz¹, Marcus F. Vieira³, Eduardo L. M. Naves², Edgard A. L. Júnior⁴, Fábio H. M. Oliveira⁵, Adriano A. Pereira¹, Guy Bourhis⁶, Pierre Pino⁶, Yann Morère⁶ and Adriano de Oliveira Andrade¹

¹ Centre pour l'Innovation et l'Évaluation des Technologies dans le Domaine de la Santé (NIATS), Faculté d'Ingénierie Électrique, Université Fédérale d'Uberlândia, Uberlândia, Brésil

² Laboratoire de Technologie d'Assistance (NTA), Faculté d'Ingénierie Électrique, Université Fédérale d'Uberlândia, Uberlândia, Brésil

³ Laboratoire de Bioingénierie et de Biomécanique (Labioeng), Université Fédérale de Goiás, Goiânia, Brésil

⁴ Laboratoire d'Infographie (CG), Faculté d'Ingénierie Électrique, Université Fédérale d'Uberlândia, Uberlândia, Brésil

⁵ Institut Fédéral d'Éducation, de Science et de Technologie de Brasília - Campus de Brasília (IFB), Brasília, Brésil

⁶ Laboratoire de Conception, d'Optimisation et de Modélisation des Systèmes (LCOMS), Université de Lorraine, Metz, France

Résumé—Les Jeux Sérieux (JS) sont des outils de plus en plus prometteurs pour la rééducation du mouvement. Cependant, de nombreux JS sont conçus pour répondre aux attentes des développeurs plutôt qu'à celles du public cible, ce qui impacte leur utilisabilité. Les objectifs de cette étude sont de créer un jeu sérieux pour la rééducation de la main et du poignet des personnes atteintes de la Maladie de Parkinson (MP) et d'évaluer son utilisabilité. *RehaBEElitation*, un jeu basé sur les abeilles, a été créé dans Unity 3D. Les étapes suivantes ont été suivies pour évaluer son utilisabilité: cinq personnes atteintes de la MP ont joué au jeu alors que leurs interactions étaient enregistrées; elles ont rempli les questionnaires *System Usability Scale (SUS)*, *Game Experience Questionnaire (GEQ)* et *Short Flow State Scale (SFSS)*; les vidéos montrant les participants interagissant avec le jeu ont été évaluées par quatre évaluateurs à l'aide de l'instrument *Serious Game Usability Evaluator (SeGUE)* afin d'identifier des problèmes d'utilisabilité; des améliorations ont été apportées au jeu; et les participants ont interagi à nouveau avec le jeu pour valider les changements. Le test t et le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été utilisés pour confirmer les différences dans les réponses aux questionnaires avant et après les modifications du jeu. En raison de problèmes d'interface et de design du jeu, et du contrôle utilisé, quatre améliorations majeures ont été effectuées. À l'exception des éléments GEQ "affect négatif", "tension", "expérience négative" et "fatigue", des différences statistiquement significatives ont été constatées pour tous les questionnaires. L'élément présentant la plus grande différence après les changements est la compétence des utilisateurs à jouer ($p = 0,0002$). Enfin, les modifications apportées ont permis d'améliorer l'utilisabilité du jeu.

Keywords—maladie de Parkinson; jeu sérieux; utilisabilité

I. INTRODUCTION

La Maladie de Parkinson (MP) est une maladie progressive et neurodégénérative caractérisée par tremblement, rigidité, bradykinésie et instabilité posturale [1]. Comme il n'existe pas de traitement curatif à la MP, le traitement des symptômes est extrêmement important pour que les personnes atteintes de la MP puissent se rétablir et conserver leur qualité de vie.

L'utilisation de Jeux Sérieux (JS) est une forme de thérapie largement étudiée et proposée pour la rééducation du mouvement [2]. Les JS impliquent la mise en œuvre d'attributs et de mécanismes de jeu pour inciter les utilisateurs à atteindre

des objectifs de la vie réelle, comme l'amélioration ou l'entraînement du mouvement et de la cognition pour les patients présentant divers troubles [3]. De plus, comme l'exercice par les jeux est perçu comme un divertissement plutôt qu'une thérapie par l'utilisateur, ils sont considérés comme des outils très efficaces qui peuvent être exploités pour la rééducation [2], [3].

Malgré les nombreux avantages des JS, beaucoup d'entre eux sont conçus pour répondre aux attentes des développeurs et non des utilisateurs finaux, c'est-à-dire que nombre de jeux sont uniquement conçus selon les impressions et les opinions des programmeurs, ce qui peut faire que le public cible n'interagisse pas bien avec le jeu ou éprouve des difficultés à y jouer [4]. En outre, il est connu que les JS centrés sur la santé sont généralement joués par des utilisateurs ayant des besoins d'interaction particuliers et des déficiences sensorielles.

Par conséquent, pour atteindre l'objectif d'un jeu, il est très important de s'assurer que ses caractéristiques sont compatibles avec les besoins de la population pour laquelle il a été créé ; et que le jeu présente une grande utilisabilité, c'est-à-dire qu'il soit efficace, efficient et satisfaisant pour le public cible [4]. En outre, l'évaluation de l'utilisabilité d'un jeu est essentielle car elle permet d'identifier et de résoudre les problèmes éventuels qui peuvent affecter l'interaction de l'utilisateur avec le jeu [4], [5]. Les jeux devraient être conçus pour être des expériences "agréablement frustrantes" afin de défier les joueurs, les obliger à échouer et donc fournir plus de satisfaction avec la victoire [6].

Ainsi l'objectif de ce travail est de développer un jeu sérieux pour la rééducation de la main et du poignet des personnes atteintes de la MP et d'évaluer son utilisabilité.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Développement du jeu sérieux

1) Description générale du jeu

Une équipe pluridisciplinaire constituée d'ingénieurs biomédicaux, d'informaticiens (ayant une expérience en conception de jeux), de physiothérapeutes et d'éducateurs physiques a collaboré à la conception et au développement du jeu. En outre, les suggestions d'une personne atteinte de la MP ont été prises en compte lors du processus de raffinement du jeu.

Les principes de conception suivants pour la conception de JS utilisés dans la rééducation motrice des personnes atteintes de la MP, présentés par [7], ont été pris en compte : traduction en jeu d'exercices d'évaluation de la motricité spécifiques aux patients atteints de la MP ; adaptation et calibrage automatiques pour chaque joueur, de sorte que le niveau d'exercice requis par le jeu soit automatiquement ajusté, offrant au joueur la meilleure expérience possible ; inclusion de stimuli visuels et auditifs, capables de fournir une expérience ludique et agréable au joueur ; et inclusion d'une personne atteinte de la MP dans le processus de perfectionnement du jeu, permettant une économie de travail et de ressources.

Un jeu sérieux basé sur les abeilles, appelé *RehaBEElitation*, a été développé. Les abeilles représentent le travail acharné et le dévouement, des caractéristiques très demandées aux patients atteints de la MP pendant leur rééducation. Unity 3D a été utilisé pour créer les scénarios et les interactions. La modélisation des objets a été réalisée avec Blender 3D. Le panneau de contrôle a été développé en langage C# à l'aide de Visual Studio. Pour le développement de la base de données, PostgreSQL a été utilisé.

L'utilisateur doit contrôler les mouvements d'une abeille dans un environnement 3D qui avance en permanence. Les tâches du jeu ont été conçues pour reproduire les mouvements suivants, présents dans l'outil de référence pour l'évaluation des personnes atteintes de la MP (MDS-UPDRS Partie III) : ouverture/fermeture de la main, extension/flexion de la main, adduction/abduction de la main, tapotement des doigts et supination/pronation du poignet. Le jeu se compose de quatre phases (Figure 1), ses objectifs sont décrits ci-dessous :

- Phase 1 : Polliniser les fleurs – L'objectif est de collecter le pollen d'une fleur et de polliniser une autre fleur. Les fleurs qui ont du pollen à collecter sont indiquées par des arcs jaunes ; et celles qui ont besoin d'être pollinisées, par des arcs verts. Le joueur doit déplacer l'abeille vers une fleur contenant du pollen et fermer la main pour l'attraper. Ensuite, avec la main fermée, le joueur doit déplacer l'abeille vers une fleur qui n'a pas de pollen et ouvrir la main pour le déposer.
- Phase 2 : Nourrir les larves – L'objectif est de nourrir les larves. Pour s'adresser aux larves, le joueur doit effectuer une extension et une flexion de la main pour soulever et abaisser l'abeille, respectivement, et une adduction et une abduction de la main pour déplacer l'abeille vers la gauche et la droite, respectivement (s'il joue avec la main droite). Une larve sera nourrie lorsque le joueur placera l'abeille devant lui.



Figure 1. Phases du jeu – (1) Phase 1 : Polliniser les fleurs. (2) Phase 2 : Nourrir les larves. (3) Phase 3 : Collecter le nectar. (4) Phase 4 : Sécher le nectar.

- Phase 3 : Collecter le nectar – L'objectif est de collecter le nectar des fleurs. Les fleurs qui ont du nectar sont indiquées par des gouttes d'eau. Le joueur doit amener l'abeille jusqu'à une fleur qui contient du nectar et effectuer le mouvement de tapotement du doigt pour collecter le nectar.
- Phase 4 : Sécher le nectar – L'objectif est de sécher le nectar. Le joueur doit se rendre dans les alvéoles contenant du nectar indiquées par un reflet lumineux, et effectuer un mouvement de supination et de pronation du poignet pour que l'abeille batte des ailes plus rapidement pour sécher le nectar.

Il existe neuf niveaux de difficulté dans le jeu, et chaque coup réussi ajoute 10 points au score.

2) Dispositif d'interface

L'utilisateur interagit avec le jeu à l'aide d'une interface homme-machine (IHM) portable (Figure 2).



Figure 2. IHM portable, vue sous deux angles différents

Ce dispositif (pesant ≈ 100 g), développé spécifiquement pour l'application, possède des capteurs inertiels capables d'estimer l'orientation de la main. Des capteurs tactiles connectés à la paume de la main et aux doigts estiment les mouvements de tapotement des doigts, et l'ouverture/fermeture de la main.

B. Évaluation de l'utilisabilité du jeu

L'étude a été approuvée par le Comité d'Éthique de l'Université Fédérale d'Uberlândia, sous le Certificat de Présentation d'Appréciation Éthique : 43229921.8.0000.5152.

Pour évaluer l'utilisabilité du jeu nous avons utilisé la méthodologie décrite par [6] et [7], qui suit des approches centrées sur l'utilisateur. Ces analyses sont réalisées à l'aide de méthodes basées sur des enquêtes, dans lesquelles l'utilisateur remplit des questionnaires d'évaluation après avoir interagi avec le système ; et d'une analyse observationnelle, dans laquelle l'utilisateur interagit avec le système pendant que les développeurs observent et évaluent cette interaction [8].

Un panel de cinq patients atteints de la MP a été utilisé (une femme, quatre hommes, $68 \pm 5,83$ ans). Ce nombre d'utilisateurs répond aux critères suggérés par [9], selon lesquels cinq utilisateurs sont suffisants pour détecter plus de 80% des problèmes d'utilisabilité. Les critères d'éligibilité des participants étaient les suivants : avoir un diagnostic confirmé de la MP ; être âgé de 40 à 100 ans ; présenter un stade léger à modéré de la MP (niveaux I, II et III de Hoehn & Yahr) [10] ; avoir un score au Mini Mental State Examination (MMSE) > 22 [11] ; et ne pas présenter de déficience visuelle et auditive grave. En revanche, les personnes n'ayant pas signé le consentement éclairé ont été exclues de l'étude.

Les utilisateurs ont reçu de brèves instructions sur le contexte du jeu et ont été invités à jouer seuls les quatre phases pendant 20 minutes chacune, ou jusqu'à ce que les objectifs du jeu soient atteints. Les utilisateurs avaient pour consigne de parler à haute voix pendant le jeu, en exprimant leurs pensées et

leurs impressions. Les interactions des participants avec le jeu ont été enregistrées en vidéo à l'aide d'une caméra, qui capturerait la main de l'utilisateur et ses réactions ; et l'écran du jeu a été enregistré à l'aide du logiciel OBS Studio.

1) Questionnaires d'évaluation

Juste après la fin de la session, chaque participant a répondu au *System Usability Scale* - SUS (ANNEXE 1), l'une des méthodes les plus fiables pour évaluer l'utilisabilité d'un système. Cette échelle est composée de dix questions, chacune avec cinq options de réponse, allant de "fortement en désaccord" à "fortement en accord" [12]. Pour calculer le score de chaque participant, le chiffre 1 est soustrait du score auquel l'utilisateur a répondu pour les questions impaires et le score auquel l'utilisateur a répondu dans les questions paires est soustrait du chiffre 5. Ensuite, il faut additionner les valeurs des 10 questions et multiplier la valeur de la somme par 2,5, ce qui fait que les résultats du questionnaire vont de 0 à 100. Pour ce questionnaire, la moyenne générale est égale à 68 points. Ainsi, si le score est inférieur à ce chiffre, cela signifie que le jeu développé présente des problèmes d'utilisabilité. Cependant, comme l'échelle SUS n'a pas été développée pour évaluer spécifiquement l'utilisabilité des JS [13], des instruments supplémentaires qui évaluent le plaisir et l'engagement, tels que le *Game Experience Questionnaire* - GEQ (ANNEXE 2) et la *Short Flow State Scale* - SFSS (ANNEXE 3), ont également été utilisés.

Le GEQ est un instrument qui évalue l'expérience de jeu à travers la perception du joueur [14]. Il comprend quatre modules: le module de base, composé de 33 questions évaluées dans les composantes immersion, flux, compétence, affect positif, affect négatif, tension et défi ; le module en-jeu, composé de 14 questions évaluées dans les mêmes composantes que le module de base ; le module social, composé de 17 questions évaluées dans les composantes empathie, sentiments négatifs et implication comportementale ; et le module post-jeu, composé de 17 questions évaluées dans les composantes expérience positive, expérience négative, fatigue et retour à la réalité. Les réponses aux questions se font sur une échelle de Likert allant de 0 (pas du tout/aucun) à 4 (extrêmement) [15]. Seuls les modules de base et post-jeu ont été appliqués aux participants de l'étude. Le module en-jeu, qui doit être appliqué pendant les pauses de jeu, n'a pas été appliqué parce qu'il était souhaité que l'interaction utilisateur-jeu ne soit pas interrompue. Le module social, lui aussi, n'a pas été appliqué car il ne doit l'être que si le jeu possède des fonctionnalités multijoueurs, ce qui n'est pas notre cas. Pour le module de base, les scores des composantes sont calculés comme la valeur moyenne de leurs éléments : immersion - éléments 3, 12, 18, 19, 27 et 30 ; flux - 5, 13, 25, 28 et 31 ; compétence - 2, 10, 15, 17 et 21 ; affect positif - 1, 4, 6, 14 et 20 ; affect négatif - 7, 8, 9 et 16 ; tension - 22, 24 et 29 ; et défi - 11, 23, 26, 32 et 33. Pour le module post-jeu, les scores des composantes sont également calculés comme la valeur moyenne de leurs items : expérience positive - items 1, 5, 7, 8, 12 et 16 ; expérience négative - 2, 4, 6, 11, 14 et 15 ; fatigue - 10 et 13 ; et retour à la réalité - 3, 9 et 17.

La SFSS est une échelle qui évalue l'expérience de flux (flow en anglais) du joueur, c'est-à-dire son degré d'engagement et d'immersion dans l'activité. Il est composé de neuf items, un pour chaque dimension du flux : équilibre défi-compétences, fusion action-conscience, objectifs clairs, retour d'information

non ambiguë, concentration sur la tâche à accomplir, sentiment de contrôle, perte de conscience de soi, transformation du temps et expérience autotélique. Chaque question présente cinq options de réponse, allant de "fortement en désaccord" (1) à "fortement en accord" (5) [16]. Le score de chaque participant est calculé à partir de la moyenne des réponses aux neuf items.

2) Analyse observationnelle

Après la première session d'interaction, les vidéos enregistrées de chaque joueur ont été synchronisées à l'aide du logiciel Movavi Video Editor : celle montrant l'utilisateur interagissant avec le jeu et celle de l'écran du jeu.

Ensuite, les vidéos des cinq participants ont été soumises à quatre évaluateurs, qui constituaient une équipe multidisciplinaire. Ils ont analysé l'interaction des participants à l'étude avec le jeu, en identifiant et en notant tous les événements significatifs, qui se produisent lorsque l'utilisateur rencontre un problème ou réagit visiblement au jeu.

Les observations des évaluateurs ont été réalisées à l'aide du *Serious Game Usability Evaluator* - SeGUE (ANNEXE 4), un outil comportant deux dimensions de catégories (l'une relative au système et l'autre à l'utilisateur). Dans la dimension liée au système, il y a six catégories différentes d'événements : deux liées au design du jeu, trois liées à l'interface du jeu et une non applicable pour les événements qui ne sont pas directement liés au système, mais qui sont néanmoins considérés comme pertinents pour améliorer l'expérience de l'utilisateur. Dans la dimension liée à l'utilisateur, il existe dix catégories d'événements dans un spectre d'émotions : quatre négatives, quatre positives et deux neutres [6]. Les évaluateurs ont noté les événements tant négatifs que positifs. Chaque événement a été étiqueté selon les deux dimensions proposées dans SeGUE.

Ensuite, après que les évaluateurs aient regardé les vidéos et fait des annotations de manière indépendante, une harmonisation de leurs résultats a été effectuée afin de parvenir à un accord. Enfin, une liste de changements dans le jeu a été préparée. Pour chaque événement négatif observé, une action corrective a été proposée et classée par ordre de priorité. Pour déterminer la priorité des actions d'amélioration du jeu, le nombre d'événements qui seraient résolus par cette action (fréquence) et le nombre d'utilisateurs affectés par l'événement qui serait impactés par cette action (propagation) ont été pris en compte.

Après les changements dans le jeu, les cinq patients atteints de la MP ont de nouveau interagi avec *RehaBEElitation* et répondu aux questionnaires afin de valider les changements effectués. La deuxième session n'a pas été enregistrée.

3) Analyse statistique des données

Les variables ont été décrites par la moyenne, l'écart-type, la médiane, le minimum et le maximum. Le test t et le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été utilisés pour confirmer les différences dans les réponses au questionnaire avant et après les changements apportés au jeu. La valeur $\alpha=0.05$ a été considérée.

III. RÉSULTATS

A. Questionnaires d'évaluation

Le tableau I présente les résultats de l'analyse statistique des réponses aux questionnaires appliqués.

TABLEAU I. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Questionnaire	1 ^{ÈRE} SESSION		2 ^{ÈME} SESSION		Valeur P
	Moyenne (Écart-type)	Médian (Min - Max)	Moyenne (Écart-type)	Médian (Min - Max)	
SUS	76 (9.62)	75 (62.5 - 87.5)	89.5 (4.11)	92.5 (85 - 92.5)	0.0111
GEQ – Immersion	2.87 (0.22)	2.83 (2.67-3.17)	3.53 (0.36)	3.67 (3 - 3.83)	0.0088
GEQ – Flux	2.84 (0.38)	2.8 (2.4 - 3.4)	3.5 (0.5)	3.4 (2.8 - 4)	0.0105
GEQ – Compétence	2.16 (0.33)	2 (1.8 - 2.6)	3.84 (0.36)	4 (3.2 - 4)	0.0002
GEQ – Effet positif	3.56 (0.33)	3.6 (3 - 3.8)	3.88 (0.18)	4 (3.6 - 4)	0.0349
GEQ – Effet négatif	0.35 (0.55)	0 (0 - 1.25)	0.3 (0.54)	0 (0 - 1.25)	0.8492
GEQ – Tension	0.07 (0.15)	0 (0 - 0.33)	0 (0)	0 (0 - 0)	0.7133
GEQ – Défi	2.32 (0.39)	2.2 (2 - 3)	1.32 (0.36)	1.2 (1 - 1.8)	0.0008
GEQ – Expérience positive	3.33 (0.46)	3.33 (2.67 - 3.83)	3.8 (0.3)	4 (3.33 - 4)	0.0189
GEQ – Expérience négative	0.03 (0.07)	0 (0 - 1.67)	0 (0)	0 (0 - 0)	0.8986
GEQ – Fatigue	0.1 (0.22)	0 (0 - 0.5)	0.1 (0.22)	0 (0 - 0.5)	1
GEQ – Retour à la réalité	1.07 (0.55)	1 (0.67 - 2)	1.87 (0.38)	2 (1.33 - 2.33)	0.0092
SFSS	3.89 (0.71)	4 (2.77 - 4.55)	4.33 (0.41)	4.33 (3.67 - 4.67)	0.0374

Des différences statistiquement significatives ont été constatées pour tous les questionnaires, sauf pour les éléments du GEQ "affect négatif", "tension", "expérience négative" et "fatigue". Les scores moyens de tous les questionnaires ont augmenté après les modifications apportées au jeu, ce qui indique que celles-ci ont amélioré l'utilisabilité du jeu (à l'exception des éléments GEQ qui n'ont pas montré de différences significatives et de l'aspect "défi"). L'élément qui a montré la plus grande différence après les changements dans le jeu était la compétence des utilisateurs à jouer (p = 0.0002).

B. Analyse observationnelle

Les tableaux II et III présentent les résultats de l'analyse observationnelle de l'interaction des participants avec le jeu dans les dimensions système et utilisateur, respectivement.

TABLEAU II. RÉSULTATS DU SEGUE - DIMENSION DU SYSTÈME

Particip-ant	SYSTÈME						Total
	INTERFACE			DESIGN		Non applicable	
	Contenu	Layout	Erreur technique	Fonction-nalité	Flux		
A	0	4	5	5	0	0	14
B	0	6	10	16	0	5	37

C	0	12	9	13	4	0	38
D	0	9	3	15	0	0	27
E	0	5	7	9	0	0	21
Total	0	36	34	58	4	5	

TABLEAU III. RESULTATS DU SEGUE - DIMENSION DE L'UTILISATEUR

Partici-pant	UTILISATEUR								Total		
	NÉGATIF				POSITIF					NEUTRE	
	i.	ii.	iii.	iv.	v.	vi.	vii.	viii.	ix.	x.	
A	1	2	0	0	13	11	5	8	0	1	41
B	0	3	0	0	7	8	3	6	0	0	27
C	2	9	0	0	0	0	1	0	4	0	16
D	0	0	0	0	11	9	6	12	0	0	38
E	0	0	0	0	5	4	16	0	0	0	25
Total	3	14	0	0	36	32	31	26	4	1	

Avec : i. Frustré, ii. Confus, iii. Agacé, iv. Fatal, v. Apprentissage, vi. Réflexion, vii. Satisfait, viii. Agréablement frustré, ix. Non applicable, x. Suggestion.

Les principaux problèmes constatés étaient : 1 – le gant n'identifiait pas correctement les mouvements d'ouverture et de fermeture de la main et de pincement des doigts ; 2 – la position des cibles de la phase 1 était mal ajustée ; 3 – la main qui apparaissait en 3D à l'écran lorsque le joueur arrivait à la fin du scénario de la phase 1 apparaissait toujours ouverte, même si le joueur tenait le pollen ; et 4 – comme le scénario du jeu est en trois dimensions, les cibles des phases 2 et 4 qui étaient situées plutôt sur les bords de l'écran semblaient être déformées. Le tableau IV montre la priorité, la fréquence et la propagation des actions d'amélioration suggérées par les évaluateurs.

TABLEAU IV. ACTIONS D'AMÉLIORATION PROPOSÉES

Priorité	Action d'amélioration	Freq	Prop
1	Améliorer l'ergonomie et la structure du gant. Utiliser un gant en tissu plus fin et coudre davantage de lignes conductrices sur la paume de la main et sur les doigts	47	5
2	Transformer toute la zone de la cible en cible elle-même en phase 1	29	4
3	Laisser la main qui apparaît en 3D sur l'écran de jeu dans le même état que la main du joueur à la fin du scénario de la phase 1	31	4
4	Retirer les cibles des régions trop proches des bords de l'écran dans les phases 2 et 4	7	4

IV. DISCUSSION

Les résultats de l'analyse statistique des questionnaires sont présentés dans le tableau I. Avec les échelles SUS et SFSS, on peut observer que les améliorations apportées au jeu ont contribué à améliorer l'utilisabilité du jeu et l'engagement des participants. Les résultats du GEQ montrent que la compétence des participants à jouer au jeu a augmenté de manière significative après les améliorations apportées. Bien que l'apprentissage ait pu contribuer à améliorer la compétence des individus, ce résultat suggère également que les actions effectuées ont réellement amélioré l'interaction du participant avec le jeu. Cependant, "l'affect négatif", "la tension", "l'expérience négative" et "la fatigue" sont des aspects qui n'ont

pas présenté de changements avant et après les modifications du jeu, probablement parce que, même en ayant besoin d'améliorations, le jeu n'a pas généré de sensations et de sentiments négatifs chez les individus depuis la première session. Il est également possible d'observer que les participants ont perçu un niveau de défi plus faible après les changements, ce qui indique que le niveau de difficulté du jeu a diminué avec l'application des actions d'amélioration.

Dans le tableau II, qui montre la quantité d'événements observés dans la dimension du système, la quantité d'événements liés à l'interface du jeu est considérable en raison de l'inadaptation de l'emplacement des cibles, et aussi en raison de la non synchronisation de l'affichage de la posture de la main 3D avec celle de l'utilisateur ; et la quantité d'événements liés au design du jeu a été considérable en raison de problèmes techniques du dispositif d'interface homme-machine utilisé. Le tableau III montre que le nombre d'événements positifs dans la dimension utilisateur est clairement prédominant par rapport aux négatifs. Ce résultat ne peut pas être considéré comme attendu, puisque les évaluateurs recherchent activement les obstacles qui peuvent affecter l'utilisabilité du jeu. Cependant, les participants à cette étude étaient extrêmement satisfaits et heureux d'interagir avec le jeu sérieux, et tous ont déclaré qu'ils aimeraient jouer à *RehaBEElitation* plus souvent.

Le tableau IV présente les actions d'amélioration dérivées de l'analyse des résultats, la priorité, la fréquence et la propagation de chaque action. L'action d'amélioration la plus prioritaire était liée au gant et ses dispositifs d'acquisition. Lors de la première session, le gant utilisé ne reconnaissait pas bien les mouvements de fermeture et d'ouverture des mains et les mouvements de pincement des doigts, ce qui a affecté l'utilisabilité du jeu de manière importante. Pour la deuxième session, un nouveau gant fabriqué avec un matériau plus fin et avec plus de fils cousus sur la paume de la main et les doigts a été développé, ce qui a résolu les problèmes précédemment évoqués et ainsi considérablement amélioré l'interaction des participants avec le jeu.

V. CONCLUSION

Ce travail a proposé le développement et l'évaluation de l'utilisabilité d'un jeu sérieux pour la réhabilitation des personnes atteintes de la MP. *RehaBEElitation* est un jeu sérieux qui entraîne intensivement les mouvements de la main et du poignet des personnes atteintes de la MP, et les modifications apportées au jeu ont contribué de manière significative à augmenter l'utilisabilité de l'ensemble du système développé.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé avec le soutien du Conseil National pour le développement scientifique et technologique (CNPq), Coordination pour l'Amélioration du Personnel de l'Enseignement Supérieur (CAPES - Programme CAPES/DFATD-88887.159028/2017-00, Programme CAPES/COFECUB-881.370894/2019-01) et la Fondation pour le Soutien à la Recherche de l'État de Minas Gerais. A. O. Andrade est membre du CNPq, Brésil (304818/2018-6), Eduardo Naves est membre of CNPq, Brésil (307754/2020-0), et L. C. Mendes, I. A. Marques, C. M. Alves et Y. Morère sont

membres du Programme CAPES/COFECUB (88887.612297/2021-00, 88887.628121/2021-01, 88887.662002/2022-00 et MA957/20 2019-2023, respectivement).

RÉFÉRENCES

- [1] L. Palacios-Sánchez, M. T. Nupan, and J. S. Botero-Meneses, "James Parkinson y su ensayo sobre la 'parálisis agitante', doscientos años después," *Archivos de Neuro-Psiquiatria*, vol. 75, no. 9. Asociacao Arquivos de Neuro-Psiquiatria, pp. 671–672, 01-Sep-2017, doi: 10.1590/0004-282X20170108.
- [2] O. Assad et al., "Motion-based games for Parkinson's disease patients," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, vol. 6972 LNCS, pp. 47–58, doi: 10.1007/978-3-642-24500-8_6.
- [3] V. Bégel, I. Di Loreto, A. Seilles, and S. Dalla Bella, "Music games: potential application and considerations for rhythmic training," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 11. Frontiers Media S. A, 29-May-2017, doi: 10.3389/fnhum.2017.00273.
- [4] R. Yáñez-Gómez, D. Cascado-Caballero, and J. L. Sevillano, "Academic methods for usability evaluation of serious games: a systematic review," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 76, no. 4, pp. 5755–5784, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11042-016-3845-9.
- [5] M. Leatherbury, "Developing User Interfaces: Ensuring Usability Through Product & Process," *Inf. Process. Manag.*, vol. 31, no. 1, pp. 156–157, Jan. 1995, doi: 10.1016/0306-4573(95)80030-w.
- [6] P. Moreno-Ger, J. Torrente, Y. G. Hsieh, and W. T. Lester, "Usability testing for serious games: Making informed design decisions with user data," *Adv. Human-Computer Interact.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/369637.
- [7] I. Paraskevopoulos, E. Tseklevs, C. Craig, C. Whyatt, and J. Cosmas, "Design guidelines for developing customised serious games for Parkinson's disease rehabilitation using bespoke game sensors," *Entertain. Comput.*, vol. 5, no. 4, pp. 413–424, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.entcom.2014.10.006.
- [8] B. Ingadottir, K. Blondal, D. Thue, S. Zoega, I. Thylen, and T. Jaarsma, "Development, Usability, and Efficacy of a Serious Game to Help Patients Learn About Pain Management After Surgery: An Evaluation Study," *JMIR Serious Games*, vol. 5, no. 2, p. e10, May 2017, doi: 10.2196/games.6894.
- [9] J. Preece, H. Sharp, and Y. Rogers, *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*, 4th Edition | Wiley, 2015.
- [10] V. R. Preedy and R. R. Watson, *Handbook of Disease Burdens and Quality of Life Measures* | Amazon.com.br, 2010a. Springer, 2009.
- [11] M. F. Folstein, S. E. Folstein, and P. R. McHugh, "'Mini-mental state'. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician," *J. Psychiatr. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 189–198, 1975, doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.
- [12] J. Brooke, "SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale," in *Usability Evaluation In Industry*, CRC Press, 2020, pp. 207–212.
- [13] T. Olsen, K. Procci, and C. Bowers, "Serious games usability testing: How to ensure proper usability, playability, and effectiveness," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, vol. 6770 LNCS, no. PART 2, pp. 625–634, doi: 10.1007/978-3-642-21708-1_70.
- [14] K. L. Norman, "GEQ (Game Engagement/experience questionnaire): A review of two papers," *Interacting with Computers*, vol. 25, no. 4, pp. 278–283, Jul-2013, doi: 10.1093/iwc/iwt009.
- [15] W. A. Ijsselstein, D. Y. Kort, and Y. A. W. Poels, "GAME EXPERIENCE QUESTIONNAIRE," Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [16] S. A. Jackson, A. J. Martin, and R. C. Eklund, "Long and short measures of flow: The construct validity of the FSS-2, DFS-2, and new brief counterparts," *J. Sport Exerc. Psychol.*, vol. 30, no. 5, pp. 561–587, 2008, doi: 10.1123/jsep.30.5.561.

ANNEXE 1 – System Usability Scale (SUS), adaptée

1. Je pense que j'aimerais utiliser ce jeu fréquemment.
2. J'ai trouvé ce jeu inutilement complexe.
3. J'ai trouvé ce jeu facile à jouer.
4. Je crois que j'aurais besoin de l'aide d'un thérapeute pour jouer.
5. J'ai trouvé que toutes les fonctionnalités du jeu étaient bien intégrées.
6. Je pense que le jeu a trop d'incohérences.
7. Je pense que les gens apprendront rapidement à utiliser ce jeu.
8. J'ai trouvé le jeu trop compliqué/inconfortable à jouer.
9. Je me suis senti en confiance en jouant le jeu.
10. Je devais apprendre plusieurs choses avant de pouvoir jouer.

ANNEXE 2 – Game Experience Questionnaire (GEQ), adapté

Module de base :

1. Je me suis sentie satisfaite.
2. Je me sentais compétent.
3. J'étais intéressé par l'histoire du jeu.
4. J'ai trouvé ça amusant.
5. J'étais totalement occupé par le jeu.
6. Je me suis sentie heureuse.
7. Jouer le jeu m'a fait me sentir mal.
8. J'ai pensé à d'autres choses en jouant.
9. J'ai trouvé cela fatiguant.
10. Je me sentais compétent.
11. J'ai trouvé difficile.
12. C'était esthétiquement plaisant.
13. J'ai oublié tout ce qui m'entoure.
14. Je me sentais bien.
15. J'étais bon au jeu.
16. Je me suis ennuyé.
17. J'ai senti que j'avais réussi.
18. Je me suis sentie imaginative.
19. Je sentais que je pouvais explorer des choses.
20. J'ai apprécié.
21. J'ai atteint rapidement les objectifs du jeu.
22. Je me sentais mal à l'aise.
23. Je me suis senti sous pression.
24. Je me suis senti irrité.
25. J'ai perdu la notion du temps.
26. Je me suis sentie mise au défi.
27. J'ai trouvé cela impressionnant.
28. J'étais profondément concentré sur le jeu.
29. Je me suis sentie frustrée.
30. C'était une expérience enrichissante.
31. J'ai perdu le contact avec le monde extérieur.
32. J'ai senti la pression du temps.
33. J'ai dû travailler dur pour jouer.

Module post-jeu :

1. Je me suis senti revivre.
2. Je ne me sentais pas bien.
3. J'ai eu du mal à revenir à la réalité.
4. Je me suis sentie coupable.
5. C'était comme une victoire.
6. Je pensais que c'était une perte de temps.
7. Je me suis sentie pleine d'énergie.
8. Je me suis sentie satisfaite.
9. Je me suis sentie désorientée.
10. Je me sentais épuisé.
11. Je pense que j'aurais pu faire des choses plus utiles.
12. Je me sentais puissant.
13. Je me sentais fatigué.
14. Je me suis sentie désolée.
15. Je me suis sentie honteuse.
16. Je me suis senti fier.
17. J'avais l'impression de revenir d'un voyage.

ANNEXE 3 – Short Flow State Scale (SFSS), adaptée

1. Je me sens suffisamment compétent pour répondre aux exigences élevées de la situation.
2. Je le fais spontanément et automatiquement, sans avoir à réfléchir.
3. J'ai une idée précise de ce que je veux faire.
4. J'ai une bonne idée de la façon dont j'agis et de ce que je fais.
5. Je suis complètement concentré sur la tâche à accomplir.
6. J'ai le sentiment d'un contrôle total.
7. Je ne m'inquiète pas de ce que les autres peuvent penser de moi.
8. La façon dont le temps passe semble être différente de la normale.
9. L'expérience est extrêmement enrichissante.

ANNEXE 4 – Serious Game Usability Evaluator (SeGUE), adaptée

Catégories d'événements pour la dimension système :

Fonctionnalité : Un événement est lié à la fonctionnalité lorsqu'il est le résultat de l'activation d'un élément de contrôle par l'utilisateur et qu'il est lié à une action spécifique.

Layout : Un événement est lié à la disposition/interface lorsque l'utilisateur fait une supposition erronée sur ce que fait un contrôle, ou lorsque l'utilisateur ne sait pas comment faire quelque chose (événements négatifs).

Flux : Un événement qui n'est pas causé par une seule interaction spécifique, mais qui est la conséquence des interactions et des résultats des séquences de jeu et de la conception spécifique du jeu.

Contenu : Concerne le texte flou et d'autres formes d'informations textuelles fournies par le jeu.

Erreur technique : Lié à une défaillance non-intentionnelle du système qui doit être corrigée.

Non applicable : Lorsque l'événement n'est pas lié au système et/ou n'est pas causé par le comportement du système.

Catégories d'événements pour la dimension utilisateur :

Apprentissage : L'utilisateur découvre comment effectuer une action qui n'était pas claire auparavant, ou lorsque l'utilisateur est activement engagé dans la consommation de contenu.

Réflexion : L'utilisateur fait une pause ou se demande ce qu'il doit faire ensuite. Le fait de refléter les événements indique une pause pour créer des plans d'action dans l'espace de jeu.

Satisfait : L'utilisateur réagit de manière remarquablement positive.

Agréablement frustré : L'utilisateur exprime sa frustration de manière positive. Un moment de frustration agréable stimule l'utilisateur à essayer de surmonter à nouveau l'obstacle.

Frustré : L'utilisateur exprime ou montre des sentiments négatifs sur le fait de ne pas pouvoir terminer le jeu ou de ne pas savoir comment faire quelque chose.

Confus : L'utilisateur ne sait pas comment effectuer une action et/ou interprète mal les instructions.

Agacé : L'utilisateur effectue correctement une tâche dans le jeu, mais se sent mal de devoir la faire.

Fatal : Un événement est lié à ce thème lorsque l'utilisateur est bloqué de façon permanente et/ou ne peut pas continuer sans l'aide du chercheur. Ces événements sont mis en évidence parce que leur origine doit toujours être résolue.

Non applicable : Un événement n'est pas lié à l'utilisateur (par exemple, il s'agit d'une observation faite par le chercheur, ou d'un défaut apparu mais que l'utilisateur n'a pas remarqué).

Suggestion : L'utilisateur verbalise un commentaire ou une suggestion qui n'est pas lié à une interaction ou un événement spécifique.

BabelDr, un système de traduction du discours médical vers l'animation virtuelle signée

Bastien David, Jonathan Mutal, Irene Strasly & Pierrette Bouillon

Faculté de Traduction et d'Interprétation
Université de Genève (UNIGE)
Genève, Suisse
Prénom.Nom@unige.ch

Hervé Spechbach

Unité d'urgences ambulatoires
Hôpitaux universitaires de Genève (HUG)
Genève, Suisse
Prénom.Nom@hcuge.ch

Résumé – Cet article montre comment le système BabelDr, développé pour faciliter le dialogue médical entre un médecin et son patient, a pu être porté à la langue des signes de Suisse romande. Il explique, dans un premier temps, la méthodologie utilisée pour développer la version en langue de signes. Dans un second temps, il présente les résultats d'une évaluation visant à mesurer la compréhensibilité des animations avec la communauté Sourde de Suisse romande. Les premiers résultats montrent que les participants comprennent les vidéos signées par un personnage virtuel, malgré le manque important de réalisme et d'expressivité.

Mots-clés–traduction automatique ; communication ; médecine ; langue des signes ; synthèse de signes.

I. INTRODUCTION

D'après les chiffres de l'Organisation mondiale de la santé, 466 millions de personnes (5%) sont, en 2022, atteintes d'une forme de surdité, dont 70 millions d'enfants sourds à la naissance (1‰) [1]. Culturellement, il faut distinguer les personnes appareillées, les personnes qui font le choix de l'oralisme, ainsi que les personnes sourdes qui maîtrisent une langue des signes (LS)^a et s'identifient comme membre d'une communauté linguistique à part entière^b. Notre étude s'axe sur la communication entre une personne sourde maîtrisant une LS et une personne non-locutrice de cette langue.

Le milieu médical, comme la majorité des secteurs exigeant de communiquer avec un interlocuteur, exclut les sourds. Ce constat en milieu hospitalier est d'autant plus préoccupant que l'information fournie par le personnel médical et sa compréhension par le patient sourd peut lui être vitale.

L'interaction médecin/patient demande la présence d'un interprète. En raison d'un manque de professionnels formés et disponibles, les outils de traduction automatique constituent une alternative intéressante. Cependant, les systèmes spécialisés dans le discours médical et adaptés aux besoins des personnes sourdes sont rares. En Suisse, l'université (UNIGE) et les hôpitaux universitaires de Genève (HUG) ont développé le système de traduction BabelDr [2], destiné aux minorités

allophones, ainsi qu'aux personnes sourdes de Suisse romande qui se rendent aux services des urgences ambulatoires.

L'objectif de cet article est de montrer comment le système BabelDr a été porté à la langue de signes et d'évaluer la compréhensibilité de l'animation virtuelle (avatar) utilisée dans ce projet. Un questionnaire alternant les propositions signées par un humain et un avatar a été diffusé auprès de membres de la communauté sourde suisse romande dans le but de comparer la compréhensibilité des vidéos humaines et des animations.

L'article est structuré de la manière suivante. Nous commencerons par décrire le système BabelDr, ainsi que la plateforme de développement d'animations en LS SigLa (**section II**). Ensuite, nous présenterons la méthodologie élaborée pour réaliser notre enquête en ligne (**section III**). Enfin, nous présenterons les résultats de notre questionnaire (**section IV**).

II. BABELDR, UN SYSTÈME DE TRADUCTION MÉDICALE POUR SOURDS

En Suisse, le projet BabelDr^c [2] est issu de la collaboration de la faculté de Traduction et d'Interprétation de l'UNIGE et du service ambulatoire des HUG. Le constat des deux institutions est qu'il n'existe pas d'outil de communication fiable, sécurisé et facile d'utilisation pour les services d'urgences. Cette collaboration a abouti à la création d'un système de traduction du discours médical pour des patients allophones ne maîtrisant pas la langue du personnel médical (Tigrinya, Dari, Farsi, Arabe, Albanais, anglais simple), mais aussi pour la langue des signes française de Suisse romande (LSF-SR) [3].

Le système répond à trois critères : fiabilité de l'information, sécurité des données et portabilité vers d'autres langues. Le système repose sur un ensemble de phrases pré-traduites (environ 10'000 phrases canoniques), collectées par le corps médical, traduites et validées par des experts de la langue. Le médecin peut poser sa question à l'oral et le système lie le résultat vers la phrase pré-traduite la plus proche [2].

a Rappelons que les langues des signes ont évolué avec les communautés sourdes du monde entier et donc qu'elles sont plurielles. Il n'existe pas une langue des signes universelle utilisée par l'ensemble des locuteurs.

^b Les langues des signes ne sont pas les représentations signées des langues écrites/orales. Elles ont leur propre grammaire, syntaxe et organisation.

^c <https://babeldr.unige.ch/>

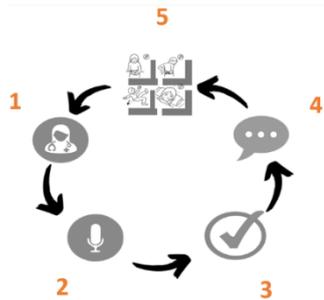


Fig. 1. Architecture de BabelDr

L'interaction avec BabelDr se fait en cinq étapes (**Fig. 1**). Après avoir déterminé la langue et le sexe du patient, le médecin pose oralement la question à son patient (1). Le système, au moyen de la reconnaissance vocale et de méthodes de traduction et classification neuronales, produit les phrases pré-traduites les plus proches de la reconnaissance vocale (2). Le médecin valide la phrase proposée par le système (3). La traduction est envoyée à l'interface utilisateur du patient (4) qui pourra répondre au médecin par geste ou par sélection de pictogrammes (5) [4].

A. Le choix de l'output

Un système de traduction automatique vers la langue des signes a cette particularité de ne pas pouvoir faire appel aux mêmes outils de développement que les langues classiques.

Les systèmes de type "text-to-text" sont à exclure en raison de la difficulté d'apprentissage de la langue écrite pour les personnes sourdes natives^d. [6] montre que le niveau moyen de lecture d'un adolescent sourd entre 16 et 17 ans est comparable à celui d'enfants entendant de 8 ans. Ceci est dû notamment aux divergences entre la langue des signes et son homologue oral/écrit et la perte d'informations non-manuelles non transcrites en langue écrite.

Les systèmes d'enregistrement vidéo d'interprètes en LS sont appréciés pour leur expressivité, leur fluidité et leur réalisme, mais ils sont peu pratiques en termes de stockage, de matériel et de réutilisation [7]. La fusion de segments vidéos enregistrés ne fournit pas non plus de solution optimale [8].

Depuis quelques années, l'emploi d'animations virtuelles apportent une plus-value à l'étude des langues des signes. Trois méthodes permettent de synthétiser les SL et de générer des animations virtuelles : l'animation à la main, la capture du mouvement et l'animation complètement synthétisée [9]. Si les deux premières méthodes demandent une présence humaine pour l'élaboration de chaque signe, elle n'est pas requise pour la dernière approche. Cette méthode comprend des animations générées à partir de séquences de représentations phonétiques des signes [10].

Les personnages virtuellement intégralement synthétisés et générés à partir de méthodes phonétiques sont pertinents pour un système de traduction automatique. Ils sont interchangeables, adaptables rapidement et peuvent générer un nombre important de phrases à partir de règles linguistiques et de variables de traduction [11].

B. SigLa, une plateforme de développement d'animations synthétisées

SigLa [12] est une plateforme de développement web créée par l'UNIGE pour faciliter la production d'animations en LS avec le personnage virtuellement complètement synthétisé, JASigning [13].

Les animations JASigning sont générées à partir de la notation Gestural SiGML (langage de balisage XML représentant phonétiquement une séquence de signes [14]). Ce code est lui-même produit à partir du Hamburg Notation System for Sign Language (HamNoSys) pour les expressions manuelles [15]. Pour les expressions non-manuelles, des expressions SiGML sont disponibles [16]. Pour les expressions faciales et labiales, sont utilisées des expressions SiGML ainsi que des expressions issues de la notation SAMPA [17].

Pour produire le code Gestural SiGML, une grammaire synchrone modélise le lien entre une phrase source (ici une phrase canonique médicale écrite) et sa représentation en LS, qui comprend les différents éléments manuels, non-manuels et labiaux cités plus haut, nécessaires pour animer l'avatar [11]. Cette représentation a la forme d'une table de signes comme illustré dans la **Table I**.

^d "Environ 56 millions de personnes sourdes, soit 80% des 70 millions de personnes sourdes dans le monde aujourd'hui, ne reçoivent aucune éducation. C'est particulièrement vrai pour les femmes et les filles sourdes, ainsi que pour

les habitants des pays en développement. Il s'agit d'une violation profonde du droit universel à l'éducation." [5].

TABLE I. TABLE DE SIGNE DE LA PHRASE "JE SUIS LE CARDIOLOGUE"

Gloss	ETRE	MEDECIN	SPECIALISTE	COEUR	ATTENTE
Aperture	Wide	Wide	Wide	Wide	Wide
Body	Straight	Straight	Straight	TiltBack	Straight
Eyebrows	Neutral	Neutral	Up	Neutral	Neutral
Gaze	Neutral	Right	Neutral	Down	Neutral
Head	Neutral	TurnRight	Neutral	Neutral	Neutral
Shoulders	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Mouthing	null	medsa	spesialis	kO:	null

Une fois les ressources développées et téléchargées, la plateforme SigLa génère une animation JASigning. Française (Fig. 2) est le personnage virtuel réaliste et neutre sélectionné pour cette étude.

SigLa facilite le développement et offre trois fonctionnalités. La première (GLOSSARY) permet de télécharger, supprimer ou modifier le glossaire bilingue de gloses en notation HamNoSys. La seconde fonctionnalité (GRAMMAR) joue une fonction similaire à la précédente pour la grammaire de traduction. Une fois ces deux ressources compilées, la troisième fonctionnalité (GENERATE) associe la grammaire au glossaire correspondant. Pour chaque règle de grammaire soumise, SigLa fournit le code Gestural SiGML correspondant. En parallèle, les animations JASigning peuvent être visualisées. La fonctionnalité AVATAR permet de changer directement le SiGML et de visualiser le résultat correspondant.

Au moment où nous écrivons ce papier, la grammaire est composée de 513 règles de grammaire, 154 non terminaux et 426 terminaux. 1'670'062 vidéos sont générées à cette date.

III. MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, nous voulons savoir si les personnages virtuels générés sont aptes à résoudre le manque de communication qu'il peut y avoir entre un membre du personnel médical entendant et un patient sourd maîtrisant la LS traitée par le personnage virtuel. Nous voulons déterminer si l'avatar JASigning Française est apprécié et s'il est aussi compréhensible par rapport à un humain enregistré sur vidéo.

Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel de solliciter l'opinion de potentiels utilisateurs (à savoir des personnes sourdes maîtrisant la LS locale). En raison de la crise sanitaire



Fig. 2. Animation JASigning Française sur l'interface SigLa

mondiale du COVID19, il n'a pas encore été possible de réaliser

des évaluations en situation réelle aux HUG, ni d'entretien groupé sur la thématique. Pour cette raison, nous avons axé notre évaluation sur une enquête en ligne.

A. L'enquête réalisée

L'étude porte sur la compréhensibilité du personnage virtuel par rapport à un enregistrement humain. Elle a été réalisée avec le logiciel Lime Survey. Cette étude a débuté le 22 mars 2022 et s'est terminée le 13 mai 2022.

Les évaluateurs de cette enquête doivent maîtriser la langue des signes française de Suisse romande (LSF-SR) et avoir des notions de français. L'étude a été programmée pour durer moins de 10 minutes. Il n'y a cependant aucune limite de temps. Les résultats estiment le temps de réalisation à 7 minutes 22 sec.

Le format est lisible sur un téléphone portable. La présentation du projet et les considérations éthiques utilisent la langue facile et des pictogrammes.

B. Le contenu du questionnaire

Le questionnaire porte sur la compréhensibilité de huit phrases extraites du domaine COVID en LS signées humainement et avec l'avatar. Il s'agit de questions médicales, de recommandations à suivre ou d'instructions liées à l'examen médical :

1. Je vais vous poser des questions avec cet appareil
2. Les données restent confidentielles et protégées
3. Vous devez garder le masque sur la bouche et le nez
4. Voici la feuille avec les mesures d'auto-isolement que vous devez suivre
5. Avez-vous une toux grasse ?
6. À quelle date ont commencé les symptômes ?
7. Nous allons faire un frottis du nez
8. Expirez, s'il vous plaît

Les participants doivent trouver parmi une liste de 5 possibilités le sens de la phrase. Afin que chaque participant puisse évaluer des phrases signées par l'avatar et un interprète humain (Fig. 3), le questionnaire suit un plan croisé (groupe A : Avatar-Humain-Avatar ; groupe B : Humain-Avatar-Humain).

La bonne réponse est dissimulée parmi deux propositions erronées et une proposition "Autre", le tout au sein d'une barre de défilement. Une fois une proposition sélectionnée, la compréhension doit être évaluée sur une échelle de 5 points, sous forme de pictogramme.

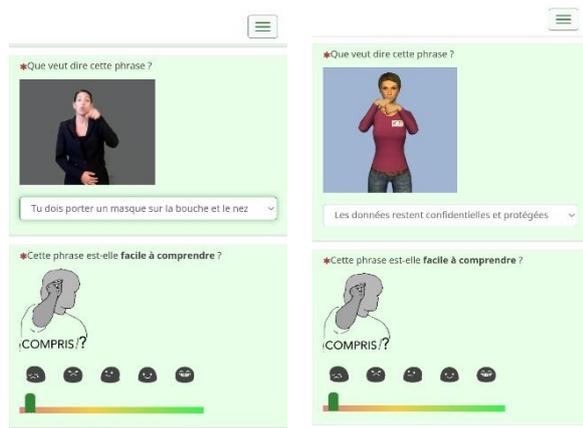


Fig. 3. Interface du questionnaire sur support mobile

IV. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Près de deux mois après le lancement du questionnaire, 38 personnes ont répondu au questionnaire, 19 personnes par groupe.

Comme le montre la **Table II**, les vidéos humaines ont donné un taux de réponse correcte de 92,76%, l'animation virtuelle en a fourni 81,58%.

« Principaux résultats » regroupent les propositions correctes sélectionnées par les participants. « Autre » fait référence aux réponses personnelles envoyées par les participants et, ici, assimilables à une bonne compréhension de l'énoncé. Pour l'énoncé Q6 (À quelle date ont commencé les symptômes ?) par exemple, le participant B11 a proposé *Les symptômes a commencé quand ?* Autre cas, le participant B8 écrit *Les informations sont secrètes anonymes et protégées* pour Q2 (*Les données restent confidentielles et protégées*)

TABLE II. NOMBRE DE RÉPONSES CORRECTES PAR QUESTION

	Réponses correctes avec la vidéo			Réponses correctes avec l'avatar		
	Principaux résultats	Autre	Valeur relative (%)	Principaux résultats	Autre	Valeur relative (%)
Qu.1	14	3	89,47	8	1	47,36
Qu.2	14	0	73,68	18	1	100
Qu.3	19	0	100	16	0	84,21
Qu.4	17	0	89,47	16	0	84,21
Qu.5	19	0	100	17	0	89,47
Qu.6	19	0	100	17	1	94,73
Qu.7	17	0	89,47	15	0	78,94
Qu.8	19	0	100	14	0	73,68
Moyenne			92,76			81,58
Ecart-type			9,3			16,16
Groupe A						
Groupe B						

Sur les huit énoncés, sept ont obtenu de meilleurs résultats avec la vidéo (Q1, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8) qu'avec l'avatar (**Fig. 4**). Il n'y a que la phrase Q2 (*Les données restent confidentielles et protégées*) à avoir obtenu un score supérieur avec l'avatar par rapport à la vidéo.

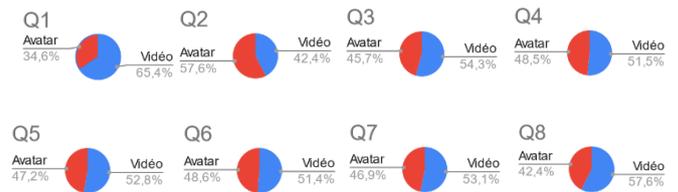


Fig. 4. Comparaison des résultats corrects entre vidéo et avatar par énoncé

En comptabilisant l'ensemble des résultats corrects, les meilleurs scores ont été obtenus pour l'énoncé Q6 (*À quelle date ont commencé les symptômes* : 37/38). L'énoncé ayant obtenu les plus mauvais résultats est Q1 (*Je vais vous poser des questions avec cet appareil* : 26/38). De moins bons résultats en début de test s'expliquent par le manque d'habitude des évaluateurs dans l'exercice. Les phrases sont évaluées hors contexte, ce qui rend la tâche de compréhension plus difficile.

Pour ce qui est de la compréhension ressentie par l'ensemble des participants (A) et par l'ensemble des bons répondants (B), les vidéos humaines sont considérées comme très largement comprises par les participants (Très facile = (A) 49,3 % / (B) 48,9 % ; Facile = 34,8 % / (B) 36,8 % ; Compris = (A) 12,5 % / (B) 11,3 %) (**Table III**). Les résultats pour les avatars sont plus nuancés, compréhensibles pour la plupart, mais avec certains énoncés plus difficiles à comprendre (Très facile = (A) 9,2 % / (B) 9,6 % ; Facile = (A) 16,4 % / (B) 17,7 % ; Compris = (A) 44,1 % / (B) 44,3 % ; Difficile = (A) 20,4 % / (B) 21,1 % ; Très difficile = (A) 9,8 % / (B) 8 %).

La **Figure 5** montre les résultats de la compréhensibilité perçue par énoncé. Elle met en évidence la préférence des utilisateurs pour les vidéos humaines.

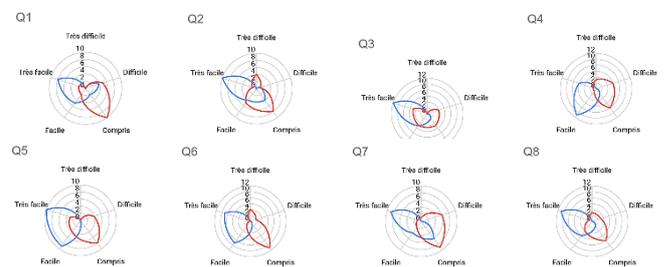


Fig. 5. Niveau de compréhension ressentie selon l'énoncé (N=38)

Avatar
Humain

V. CONCLUSION

BabelDr est l'un des rares exemples de système de traduction automatique vers les langues signées utilisé dans le milieu médical. Notre étude montre que les personnes sourdes interrogées comprennent les vidéos signées par l'avatar JASigning, même si elles estiment qu'elles sont moins faciles à comprendre.

À l'avenir, de nouvelles évaluations en ligne et en présentielle seront organisées. Une phase préparatoire destinée à entraîner les participants sera organisée. De futures études sur le terrain seront, entre autres, organisées au sein des HUG. La combinaison d'un questionnaire avec des distracteurs et d'une

évaluation subjective de la compréhensibilité nous semble intéressante pour évaluer séparément l'utilisabilité et la difficulté de compréhension.

Notre étude montre qu'avec une méthodologie de traduction adaptée, qui repose notamment sur une plateforme de

développement pour générer le code Gestural SiGML (SigLa) et des références de traduction humaine, il est possible d'arriver à des traductions utilisables dans le domaine médical avec l'avatar JASigning.

TABLE III. NIVEAU DE COMPRÉHENSION RESENTIE SELON L'ANIMATION

	Vidéo : niveau de compréhension ressentie				Avatar : niveau de compréhension ressentie			
	Ensemble des réponses (N=152)	Valeur relative (en %)	Bonnes réponses (N=141)	Valeur relative (en %)	Ensemble des réponses (N=152)	Valeur relative (en %)	Bonnes réponses (N=124)	Valeur relative (en %)
Très difficile à comprendre (1)	0	0	0	0,00	15	9,87	12	9,68
Difficile à comprendre (2)	5	3,29	4	2,84	31	20,39	22	17,74
Compris (3)	19	12,50	16	11,35	67	44,08	55	44,35
Facile à comprendre (4)	53	34,87	52	36,88	25	16,45	25	20,16
Très facile à comprendre (5)	75	49,34	69	48,94	14	9,21	10	8,06

RÉFÉRENCES

- [1] OMS, « Deafness and Hearing Loss », *Organisation mondiale de la santé*, 2022. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss> (consulté le 17 mars 2022).
- [2] P. Bouillon, B. David, I. Strasly, et H. Spechbach, « A Speech Translation System for Medical Dialogue in Sign Language : Questionnaire on User Perspective of Videos and the Use of Avatar Technology », in *Barrier-free Communication*, Winterthur, Switzerland, 2021, p. 46-54. doi: 10.21256/zhaw-3001.
- [3] I. Strasly *et al.*, « Le Projet BabelDr : Rendre les Informations Médicales Accessibles en Langue des Signes de Suisse Romande (LSF-SR) », in *Proceedings of the 2nd Swiss Conference on Barrier-free Communication: Accessibility in educational settings (BfC 2018)*, Geneva (Switzerland), 2018, p. 92-96. [En ligne]. Disponible sur: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:114719>
- [4] M. Norré, P. Bouillon, J. Gerlach, et H. Spechbach, « Evaluating the Comprehension of Arasaac and Sclera Pictographs for the BabelDr Patient Response Interface », in *Proceedings of the 3rd Swiss Conference on Barrier-free Communication (BfC 2020)*, Winterthur (Switzerland), 2021, p. 55-63. [En ligne]. Disponible sur: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:152083>
- [5] WFD, « Human Rights of the Deaf », *World Federation of the Deaf*. <http://wfdeaf.org/our-work/human-rights-of-the-deaf/> (consulté le 30 mars 2022).
- [6] L. P. Kelly et D. Barac-Cikoja, « The Comprehension of Skilled Deaf Readers: The Roles of Word Recognition and Other Potentially Critical Aspects of Competence. », in *Children's comprehension problems in oral and written language: a cognitive perspective*, K. Cain et J. Oakhill, Éd. New York: Guilford Press, 2007, p. 244-280. [En ligne]. Disponible sur: <https://psycnet.apa.org/record/2007-05218-009>
- [7] M. Debevc, D. Milošević, et I. Kožuh, « A Comparison of Comprehension Processes in Sign Language Interpreter Videos with or without Captions », *PLOS ONE*, vol. 10, n° 5, p. e0127577, mai 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0127577.
- [8] M. Boulares et M. Jemni, « Mobile Sign Language Translation System for deaf Community », in *Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility - W4A '12*, Lyon, 2012, p. 1. doi: 10.1145/2207016.2207049.
- [9] S. Ebling *et al.*, « Evaluation of Animated Swiss German Sign Language Fingerspelling Sequences and Signs », in *Universal Access in Human-Computer Interaction. Designing Novel Interactions*, Cham, 2017, p. 3-13.
- [10] F. Roelofsen, L. Esselink, S. Mende-Gillings, et A. Smeijers, « Sign Language Translation in a Healthcare Setting », in *Sign Language Translation in a Healthcare Setting*, juill. 2021, p. 110-124. doi: 10.26615/978-954-452-071-7_013.
- [11] M. Rayner, « Using the Regulus Lite Speech2Sign Platform », *Using the Regulus Lite Speech2Sign Platform*, 2016. <https://www.issco.unige.ch/en/research/projects/lite-doc/Speech2SignDoc/build/html/index.html>
- [12] B. David, J. Mutal, I. Strasly, J. Gerlach, et P. Bouillon, « SigLa - Une plateforme de développement d'animations en langue des signes », *Journée d'étude Technologies du Langage Humain et Accès Interactif à l'Information (JAIH2022)*, Paris (France), p. 22-24, 2022.

- [13] S. Ebling et J. Glauert, « Exploiting the Full Potential of JASigning to Build an Avatar Signing Train Annoncements », présenté à Proceedings of the Third International Symposium on Sign Language Translation and Avatar Technology (SLTAT), Chicago, oct. 2013. doi: <https://doi.org/10.5167/uzh-85716>.
- [14] R. Elliott, J. Glauert, V. Jennings, et R. Kennaway, « An Overview of the SiGML Notation and SiGMLSigning Software System », 2004, p. 98-104. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.signwriting.org/archive/docs3/sw0201-Sign-Processing-2004.pdf>
- [15] S. Prillwitz, R. Leven, H. Zienert, T. Hanke, et J. Henning, « Hamburg Notation System for Sign Language. An Introduction Guide », *Int. Stud. Sign Lang. Commun. Deaf*, vol. 5, 1989.
- [16] T. Hanke, G. Langer, et C. Metzger, « Encoding non-manual aspect of Sign Language », in *ViSiCAST deliverable D5-1: Interface definitions*, T. Hanke, Éd. 2001, p. 44-59. [En ligne]. Disponible sur: http://www.visicast.cmp.uea.ac.uk/Papers/ViSiCAST_D5-1v017rev2.pdf
- [17] J. Wells, « SAMPA Computer Readable Phonetic Alphabet », in *Handbook of standards and resources for spoken language systems*, Mouton de Gruyter., D. Gibbon, R. Moore, et R. Winski, Éd. Berlin-New York, 1997, p. 684-732. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.phon.ucl.ac.uk/home/sampa/>

Session 2 : Technologies d'Assistance Intelligentes

Président de session : Guy Bourhis

Orthèse à rigidité variable pour la réduction des tremblements de la main

Jhedmar Callupe, Eric Monacelli et Vincent Chalvet

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles
UVSQ - Université Paris-Saclay
Vélizy-Villacoublay, France

Dante Elias

Research Laboratory of Biomechanics and Applied Robotics
Pontifical Catholic University of Peru
Lima, Pérou

Résumé—L'infirmité motrice cérébrale est un trouble du développement neurologique qui peut affecter le tonus musculaire et les capacités motrices. En conséquence, de nombreux patients atteints de paralysie cérébrale doivent utiliser un fauteuil roulant électrique pour se déplacer. Cependant, comme l'infirmité motrice cérébrale affecte également les membres supérieurs, les patients peuvent présenter des troubles de la main causés par la maladie, tels que des tremblements, des réflexes exagérés et une raideur musculaire. Ces troubles empêchent le patient de manœuvrer adéquatement le joystick du fauteuil roulant. Afin de rendre le patient autonome dans sa mobilité, nous proposons dans cet article d'étudier le principe d'une solution d'assistance orthétique pour réduire les tremblements de la main. Ce dispositif est basé sur le principe du « Layer Jamming » (LJ). Il s'agit de modifier la rigidité de l'actionneur en fonction de la pression de vide appliquée sur un ensemble de feuilles intercalées. La dépression, ainsi créée, provoque alors une augmentation de la friction entre les couches de feuilles et donc une raideur par collage. Cela induit ainsi une réduction de la capacité de rotation articulaire. Dans notre application, cette variation de la rigidité a été utilisée pour amortir les tremblements de la main. Contrairement à l'état de l'art, nous avons développé un actionneur LJ sur une base technologique d'impression 3D. Dans cet article, nous présentons les tests réalisés pour évaluer les performances intrinsèques du système : mesure de la réponse couple/angle et évaluation de la variation de rigidité. L'actionneur a été testé pour la conception d'une orthèse de main afin de proposer un premier test de performances face à des perturbations en utilisant notre simulateur de fauteuil roulant virtuel et un mannequin. Les résultats ont montré que l'actionneur LJ se comporte comme un ressort rotatif avec une rigidité variable et contrôlable. Les résultats montrent une réduction des tremblements de la « main » allant jusqu'à 93,5% avec un temps de réaction de 461 ms.

I. INTRODUCTION

A. Infirmité motrice cérébrale

L'infirmité motrice cérébrale (IMC), ou Paralysie Cérébrale (PC), est un trouble du développement neurologique qui peut affecter le tonus musculaire et les capacités motrices. Il est attribué à des lésions survenues au cours du développement précoce du cerveau [1], [2], [3]. Selon des recherches menées aux États-Unis, cette maladie touche entre 2 et 2,5 enfants pour 1000 naissances [4].

B. Tâche de conduite en fauteuil roulant

La PC affecte donc principalement les muscles. En conséquence, certains patients doivent utiliser un fauteuil roulant électrique. Le joystick est le dispositif d'interface le

plus populaire pour la conduite du fauteuil roulant électrique (Figure 1). Cependant, la conduite par le joystick peut également devenir difficile pour certains usagers concernés par la PC. Lorsque le conducteur veut agir sur le joystick, ce mouvement peut se produire trop rapidement ou faiblement. Il peut aussi y avoir des tremblements de la main [5], [6].



Figure 1. Un patient atteint de paralysie cérébrale utilisant un fauteuil roulant électrique.

C. Dispositifs d'aide à la main

Pour réduire les tremblements de la main, de nombreux projets ont été développés au fil des ans :

- Parmi les dispositifs anti-tremblements, on peut citer le Viscous Beam. Il est basé sur un principe d'amortisseur visqueux pour absorber les tremblements de flexion et d'extension de la main [7].
- L'exosquelette WOTAS est un dispositif capable d'absorber les tremblements jusqu'à 90% [8]. Cependant, sa structure rigide et ses actionneurs le rendent très inconfortable pour l'utilisateur.
- L'orthèse anti-tremblements Read-Steady est une orthèse de tremblement de la main. Son principe d'action repose sur l'application de contre-poids à des points stratégiques de la main du patient [9].
- L'orthèse anti-tremblements Steadiwear est une orthèse passive basée sur un amortisseur rotatif. Cet amortisseur est composé d'un fluide non newtonien, qui réagit différemment en fonction de la fréquence du mouvement généré par la main [10].
- L'orthèse Tremelo est une orthèse passive dont le fonctionnement repose sur le principe d'un amortisseur de masse accordé [11].

Plusieurs de ces dispositifs ont montré une grande efficacité dans la réduction des tremblements. Cependant, ils ont été conçus sur la base d'actionnements lourds et rigides tels que des moteurs, des amortisseurs hydrauliques, de contre-poids, etc. Ces éléments sont sources d'inconfort pour le patient et d'encombrement. Ils peuvent impacter l'ergonomie.

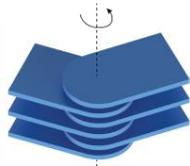


Figure 2. Principe mécanique de l'actionneur LJ.

Dans cet article, nous avons donc proposé d'étudier le principe d'un dispositif utilisant un actionneur léger et non-rigide. L'étude repose sur une technologie d'actionneur basé sur le principe du Layer Jamming (LJ). Cet actionneur sera utilisé pour amortir les tremblements de la main grâce à sa capacité à faire varier sa flexibilité en fonction de la dépression créée.

Dans la section II, nous présentons le principe, la conception et la fabrication de l'actionneur. Dans la section III, nous présentons l'orthèse de main à deux degrés de liberté. Dans la section IV, nous développons les tests de performance pour analyser la flexibilité de l'actionneur et la réponse de l'orthèse face aux perturbations. Cette étape est essentielle comme préalable aux tests utilisateurs. Enfin, dans la section V et VI, la discussion et la conclusion sont présentées.

II. ACTIONNEUR À RIGIDITÉ VARIABLE

A. Proposition

Dans cette étude, nous avons décidé d'éviter les actionneurs rigides comme les moteurs ou les transmissions métalliques. En tenant compte du fait que le dispositif sera utilisé en interaction corporelle, nous avons choisi un actionneur issu de la technologie de la robotique souple (i. e. Soft Robotic). Spécifiquement, nous avons choisi la technologie dite du Layer Jamming, ou blocage multi-couches, pour développer un actionneur capable de changer sa raideur pour contrer les tremblements de la main.

Lorsque l'actionneur est placé parallèlement aux articulations, le changement de flexibilité de l'actionneur vise à agir directement sur la main. Ainsi dans le cas d'un tremblement ou d'un mouvement brusque de la main, l'actionneur deviendra plus rigide et contribuera à soutenir la main dans son mouvement.

B. Technologie de Layer jamming

La technologie de LJ est basée principalement sur l'empilement de feuilles (i. e. papier, polyéthylène, kapton, mylar, etc [12]). Lorsque le vide est appliqué à l'intérieur, des forces de frottement sont générées entre les couches. Le composant finit par se comporter comme un solide, capable de supporter des forces équivalentes à la force de friction totale. Cette force peut varier en fonction du type de matériau utilisé, du nombre de couches, de l'épaisseur des couches ou de la dépression appliquée [13],[14]. L'actionneur change alors sa raideur.

Afin d'assurer un couple résistant suffisant pour contenir les tremblements de la main, un dimensionnement adapté du dispositif sera présenté dans la section suivante.

C. Critères de conception

Tout d'abord, nous avons analysé le couple nécessaire pour déplacer la main. Ensuite, nous avons étudié le couple théorique offert par l'actionneur LJ afin de le comparer à la référence, et ainsi valider le dimensionnement de l'actionneur.

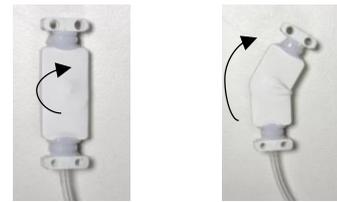


Figure 3. Actionneur Layer Jamming imprimé en 3D dans son isolation hermétique en latex.

- Selon les études menées par Peaden et Charles [15], le couple nécessaire au mouvement de la main se divise en quatre caractéristiques : inertie, rigidité, amortissement et gravité. Dans notre cas, seules les trois premières caractéristiques ont été prises en compte (car la gravité dépend toujours de la référence).
- Le couple total de la main est de 0,4N.m pour la flexion-extension (FE) et de 0,18N.m pour la déviation radiale/ulnaire (RUD) [15]. Afin de faciliter la conception du dispositif, un seul modèle a été réalisé, en tenant compte d'un couple de 0,3N.m (choix sur la base d'une moyenne des deux couples) pour les deux degrés de liberté.

La force maximale qu'un actionneur LJ peut exercer dépend de la configuration dans laquelle il est utilisé. Par exemple dans [13], 10 couches empilées ont été soumises à une force perpendiculaire aux couches, montrant une force maximale de 4N. Cependant, d'après [16], la même quantité de couches a été soumise à une force perpendiculaire, résultant en des forces supérieures à 150N pour les forces longitudinales et à 13N pour les forces transversales (rotation en lacet). Cette grande différence dans les forces maximales peut être expliquée par l'analyse mathématique des deux types de configuration. Ainsi, nous pouvons différencier que pour le premier cas, la force maximale dépend de l'inertie et de la section transversale du mécanisme [17]. Cependant pour le second cas, la force maximale dépend directement du nombre de couches et de la surface de contact [16]. Ainsi, dans notre étude, nous avons utilisé la seconde configuration afin d'assurer un couple suffisant pour contrer les tremblements avec une taille d'actionneur minimale.

TABLE I. CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CALCUL

Paramètre	Critères
μ	La conception est réalisée en impression 3D en utilisant du PLA. Le coefficient de friction est de 0.492 [19].
Sc	Afin de réaliser un actionneur mince, le nombre de couches est choisi de 5. Par conséquent, le nombre de surfaces en contact est de 9.
A	L'aire dépend du rayon de la surface en contact.
P	La pression maximale atteinte par les mini-pompes à vide classiques est de - 60kPa.
r	Le rayon représentatif est proportionnel au rayon de la surface en contact, soit 41,7% d'après [16].

Nous avons donc décidé de concevoir un premier prototype LJ de manière à ce qu'il agisse directement sur les rotations de la main et qu'il amortisse ainsi les tremblements. Le principe est présenté dans la Figure 2. Dans ce cas, deux pièces identiques avec un nombre égal de couches sont développées. De plus, elles possèdent une surface de contact circulaire et peuvent tourner autour de cet axe.

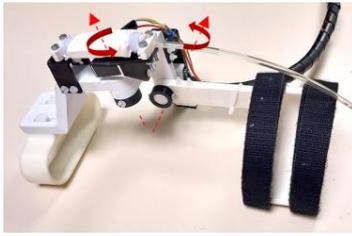


Figure 4. Prototype d'orthèse de la main 2DOF avec l'actionneur LJ en position RUD.

Le couple théorique que l'actionneur LJ exercé peut être calculé grâce à des simulations par éléments finis [13], des méthodes expérimentales [14] ou des calculs mathématiques [18]. Dans ce cas, nous avons choisi d'utiliser des équations mathématiques afin d'estimer les dimensions de l'actionneur. Ainsi, le couple exercé par l'actionneur correspond à celui proposé dans [18] :

$$\text{Couple} = \mu * Sc * A * P * r \quad (1)$$

Où : μ est la friction entre les couches, Sc est le nombre de surfaces de contact, A est l'aire de la surface de contact, P est la pression de vide appliquée, et r est le rayon représentatif.

Ensuite, ces paramètres ont été évalués à l'aide des critères présentés dans le tableau I.

En utilisant la valeur du couple souhaité de la main (0,3N.m), l'équation 1 et les paramètres sélectionnés, il a été déterminé que le rayon de la surface en contact est d'un rayon de 10mm.

Le modèle présenté dans la Figure 2 a été développé en utilisant les caractéristiques proposées : 5 couches (chaque pièce ayant une surface circulaire commune de 10 mm de rayon). Chaque couche avait une épaisseur de 0,5mm. Les pièces ont été imprimées en 3D en utilisant du PLA. Nous avons choisi du latex pour isoler le système (Figure 3).

III. ORTHÈSE DE MAIN 2DOF

L'actionneur flexible conçu précédemment doit être capable de transmettre son couple à la main. Pour cela, nous avons développé, dans cette pré-étude, une première version d'orthèse de main (à 2ddl) afin de placer l'actionneur LJ dans deux axes de la main.

A. Degrés de liberté

On modélise ici la main humaine comme deux degrés de liberté avec des caractéristiques dynamiques différentes [20]. L'amplitude de mouvement de ces deux degrés de liberté est de 15° et 45° respectivement pour la déviation radiale et cubitale, et de 85° pour la flexion-extension [21]. Un support a été développé pour permettre à l'orthèse d'être positionnée sur l'accoudoir d'un fauteuil roulant. Toutes les pièces ont été imprimées en 3D avec du PLA afin de rendre le système léger.

B. Dimensionnement

Les dimensions de la structure ont été basées sur les dimensions proposées dans les tableaux de Paolo de Leva [22], qui sont actuellement utilisés par différents chercheurs en analyse biomécanique [23],[24]. Ces tableaux fournissent les mesures biomécaniques du corps humain. Les mesures de la main ont été utilisées dans le but de réaliser le

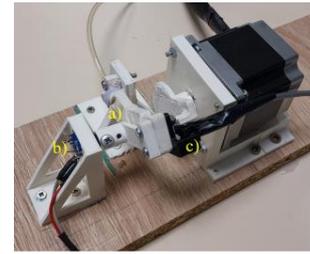


Figure 5. Module de test développé pour analyser la réponse couple-angle de notre actionneur LJ. a) Actionneur LJ, b) Capteur de rotation et c) Capteur de force.

dimensionnement des pièces mécaniques. L'orthèse prototype est représentée sur la Figure 4. Nous avons placé un actionneur LJ sur le dessus. L'objectif, à terme, est d'agir sur les mouvements RUD. De la même manière, nous pourrions placer l'actionneur sur le côté afin d'agir sur les mouvements FE. Ensuite, 2 potentiomètres rotatifs sur les axes FE et RUD sont intégrés pour les angles dans les tests.

IV. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

A. Caractérisation de l'actionneur à rigidité variable

La première expérience consiste à mesurer la réponse couple-angle de l'actionneur LJ afin d'analyser la variation de sa rigidité en fonction de la pression. Un module de test a été développé (Figure 5). Pour déplacer l'actionneur, nous utilisons un moteur pas à pas. Pour le couple, nous utilisons un capteur de force et un potentiomètre pour mesurer l'angle.

Lors de ces tests (Figure 5), l'actionneur est placé en position angulaire de -60° par rapport au plan horizontal avant mise à vide (réglé à la pression désirée). Un déplacement incrémental de -60° à $+60^\circ$ est réalisé par un moteur pas à pas. Ces tests ont été effectués pour des pressions de 0 à -60kPa avec des intervalles de 15kPa . Nous avons répété 10 fois pour chaque pression, puis les données ont été traitées pour obtenir la valeur moyenne. Les résultats finaux sont présentés dans la Figure 6. Ainsi, l'actionneur LJ conçu présente un comportement similaire à celui d'un ressort rotatif en raison de la relation quasi-linéaire entre le couple et l'angle de déformation du dispositif. Cela est particulièrement visible dans la plage de -40° à 60° pour les réglages de pression de -30 à -45kPa .

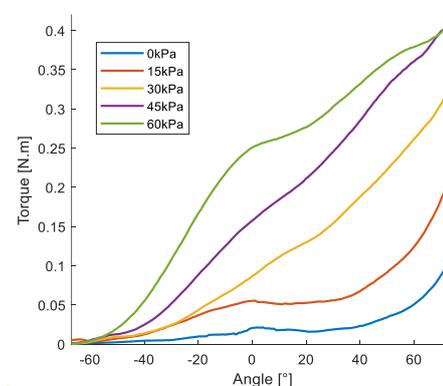


Figure 6. Réponse couple-angle de notre actionneur à rigidité variable

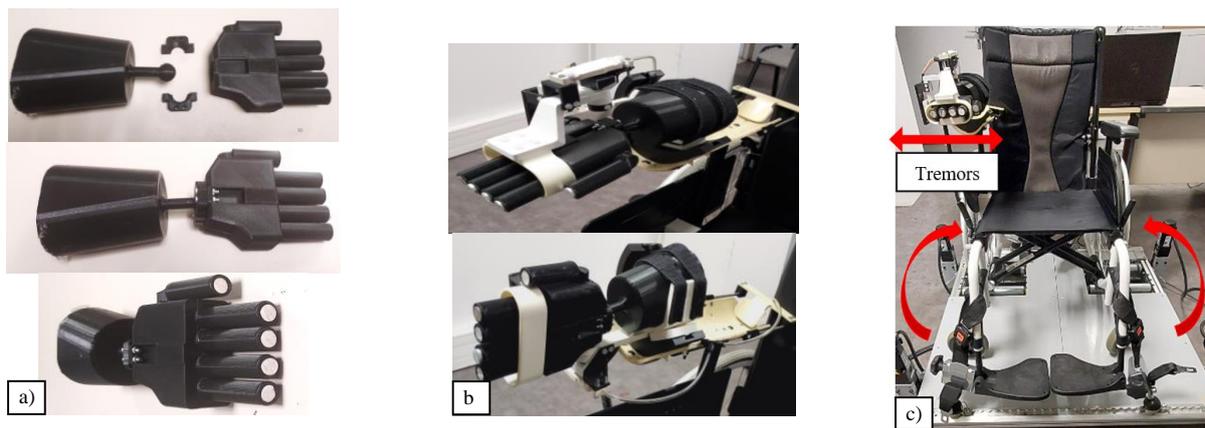


Figure 7. a) Main de mannequin, b) Orthèse de main en position RUD (vers le haut) et FE (vers le bas) et c) Simulateur de fauteuil roulant.

De plus, on peut observer sur cette Figure que ce comportement linéaire augmente proportionnellement avec la pression d'entrée. Cela donne un actionneur avec une flexibilité variable et contrôlable.

Enfin, il est important de noter que la conception préliminaire a été faite avec l'objectif d'atteindre un maximum de 0,3 N.m à -60kPa. Cependant, on peut observer dans les graphiques que la valeur maximale atteint 0,4 N.m. Ceci a probablement été obtenu en raison de la valeur de friction proposée dans l'approche théorique.

B. Réduction des tremblements de l'orthèse

Dans l'expérience précédente, nous avons testé la réponse en couple de l'actionneur LJ. Le résultat montre que l'actionneur se comporte comme un dispositif avec une flexibilité variable. Ce paragraphe présente des expériences réalisées pour évaluer la performance de l'actionneur en présence de perturbations. En ce sens, une main mannequin a été conçue afin de simuler la main de la personne. Elle reproduit les 2 degrés de liberté de la main au moyen d'une articulation à rotule. Afin de se rapprocher du poids d'une vraie main, son poids total est de 226g (Figure 7a). L'orthèse avec l'actionneur LJ a été installée sur le support de main d'un fauteuil roulant (Figure 7b). Le fauteuil roulant a été installé sur notre simulateur développé au LISV : Virtual Fauteuil (Figure 7c). Il permet de reproduire les mouvements générés (et les perturbations liées au roulement du fauteuil sur le sol) pendant la conduite [25]. Dans notre pré-test, le simulateur est utilisé dans notre test pour générer un mouvement vibratoire sinusoïdal. C'est la prise en compte de cette source de vibration qu'il faut évaluer ici.

B.1. Protocole

Les mouvements FE et RUD sont étudiés indépendamment à travers deux séries d'expériences distinctes. La main du mannequin et l'orthèse ont été placées dans chaque position (Figure 7.b). Ensuite, le simulateur de fauteuil roulant virtuel a été activé avec une perturbation sinusoïdale de 2 Hz et a fait osciller la main sur les côtés (Figure 7.c). L'actionneur LJ a été activé afin de faire varier la flexibilité de l'orthèse de la main et d'étudier la réduction des tremblements. Cette opération a été réalisée pour des pressions allant de 0 à -60

kPa avec des intervalles de 10 kPa. L'expérience a été répétée 10 fois pour chaque pression et pour chaque position.

B.2. Résultats et analyse

L'objectif est d'étudier l'influence de l'actionneur sur le mouvement de la main et les réponses temporelles du système. La Figure 8 présente les données brutes obtenues lors de cette expérience. La ligne rouge est l'entrée de la commande de pression de l'actionneur. La ligne bleue est la pression mesurée par l'actionneur. La ligne verte est le

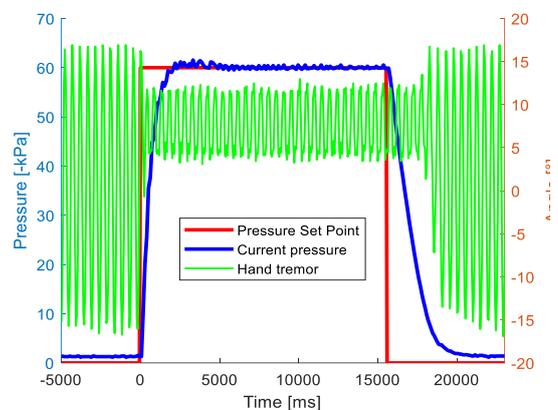


Figure 8. Réduction du tremblement du RUD à -60kPa.

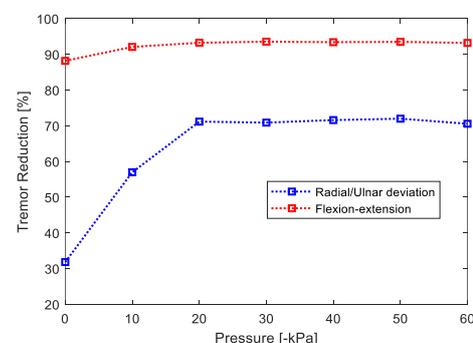


Figure 9. Pourcentage de réduction des tremblements pour les joints RUD et FE.

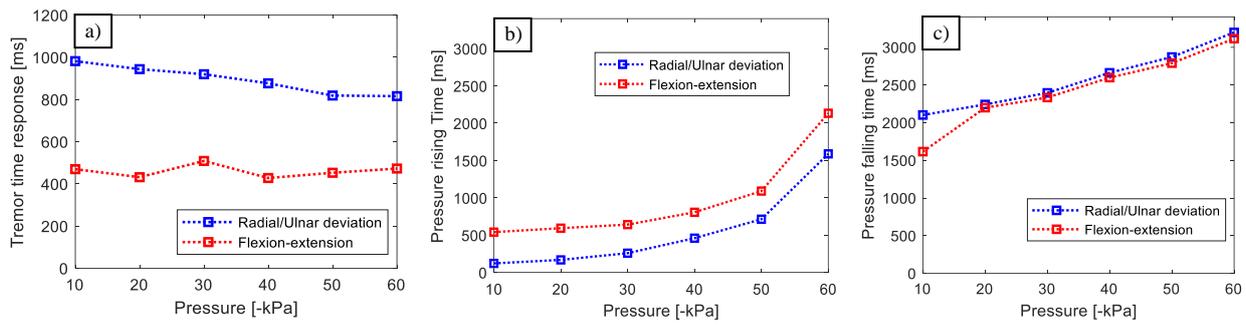


Figure 10. Analyse de la réponse temporelle. a) Réduction des tremblements b) Temps de montée en pression c) Temps de descente en pression.

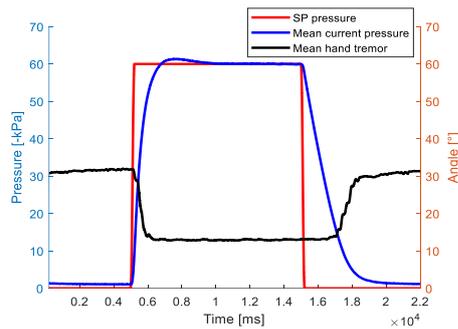


Figure 11. Données moyennes pour RUD à -60kPa.

mouvement de la main du mannequin (le mouvement RUD à -60kPa est représenté sur cette Figure). La réduction des vibrations de la main est significative, passant d'une amplitude de 32° sans pression, à une amplitude de 12,9° avec l'actionneur pressurisé, atteignant une réduction relative de 40,3%. Cependant, il est important de mentionner que l'utilisation de l'actionneur LJ en mode passif (sans pression) contribue également à une réduction des tremblements de la main. Ainsi, tous les calculs de réduction des tremblements ont pris comme référence les tremblements mesurés obtenus en configuration main libre (orthèse sans actionneur LJ). Ces valeurs étaient de 43,6° pour RUD et de 23,3° pour FE.

Les données obtenues ont été traitées afin d'obtenir une moyenne de la réduction du tremblement par rapport à la pression pour chaque position de la main. La Figure 9 montre qu'il n'est pas nécessaire d'atteindre -60kPa pour obtenir la réduction maximale du tremblement : -20kPa pour RUD et -10kPa pour FE suffisent. Une dépression supplémentaire n'a pratiquement aucun effet sur la réduction des tremblements. Il faut également remarquer que la réduction maximale est plus élevée dans FE, 93,5 %, que dans RUD, 71,9 %.

Nous avons également analysé les réponses temporelles pour la réduction des tremblements et pour le contrôle pneumatique (Pression montante et descendante). Ces données ont été traitées comme dans la Figure 11 (ligne noire). Elle montre les valeurs moyennes de la réduction du tremblement de la main et de la pression actuelle en fonction du temps pour une pression de -60 kPa en position RUD. Elle a été obtenue à partir de 10 expériences pour chaque pression et chaque position. Des tracés similaires ont été obtenus pour toutes les pressions et pour les deux positions.

La réponse temporelle de la réduction du tremblement, le temps de montée de la pression et le temps de descente de la pression montrent :

- Le temps de réponse du tremblement par rapport à chaque pression et chaque position est présenté dans la Figure 10.a. Ici, il est possible de souligner que le temps de réponse au tremblement reste relativement cohérent tout au long de l'étude. Il est assez indépendant de la pression contrôlée, étant en moyenne de 460,8 ms pour FE et 893 ms pour RUD.
- Le temps de réponse au tremblement pour RUD est plus élevé que pour FE. Ces faits contribuent à expliquer le comportement pour la réduction des tremblements. En effet, comme -20kPa semble être nécessaire pour atteindre la pleine performance du système, le temps passé pour atteindre la pression restante est inutile. Ceci explique le retard observé dans la phase de dé-raïdissement sur la Figure 11, où l'amplitude du tremblement commence à augmenter lorsqu'une pression de -30kPa est atteinte.
- Enfin, les résultats sur la réponse temporelle du système pneumatique sont illustrés dans les Figures 10b et 10c.

Ces résultats se comparent bien à l'état de l'art [26]. Ils montrent une différence importante entre les temps de montée et de descente (une caractéristique des systèmes pneumatiques) et une augmentation constante de la réponse temporelle en fonction de la pression souhaitée.

V. DISCUSSION

La caractérisation de l'actionneur LJ répond aux exigences de la manipulation d'un joystick. Lors des pré-tests, l'actionneur a présenté un comportement similaire à celui d'un ressort rotatif en raison de la relation quasi-linéaire entre le couple et l'angle. Sa rigidité augmente proportionnellement avec la pression d'entrée, ce qui donne un actionneur avec une flexibilité variable et contrôlable. L'actionneur a dépassé la valeur de couple maximale souhaitée de 0,3N.m à -60kPa, en atteignant jusqu'à 0,4N.m. Ceci a probablement été obtenu en raison d'une valeur de friction proposée qui est sous-estimée.

L'orthèse de main 2DOF (RUD et FE) intégrant notre actionneur LJ a été soumise à une perturbation de 2Hz au moyen du simulateur de fauteuil roulant Virtual Fauteuil [25] et d'une main de mannequin (Conçue en 3D). A partir de cette mise en situation dynamique, la réduction des tremblements et les temps de réponse associés ont été analysés. En ce qui concerne la réduction des tremblements, il a été possible d'atteindre la réduction maximale pour -20kPa : respectivement 93,5 % pour FE et 71,9 % pour RUD. Le temps de réponse n'a pas varié considérablement en fonction

de la pression (461 ms pour FE et 893 ms pour RUD en moyenne). En effet, les tremblements sont réduits au maximum sans qu'il soit nécessaire d'atteindre des valeurs de pression élevées. De même, pour FE, la réduction des tremblements était plus importante et le temps de réponse plus court que pour RUD. Ceci est cohérent car l'inertie dans FE est plus faible que dans RUD. Il est donc envisageable que l'actionneur flexible soit capable de réduire les tremblements avec un temps de réponse plus court pour des inerties faibles. Cela suggère qu'une conception différente de l'actionneur pourrait être nécessaire pour chaque utilisateur (en fonction de l'inertie de sa main). Cela serait possible avec le procédé d'impression 3D utilisé.

Enfin, les données obtenues sur le temps de réponse montrent que le temps de descente (entre 1615 et 33197 ms) est beaucoup plus lent que le temps de montée (entre 120 et 2132 ms). Cela est dû au fait que le système ne prévoit pas une forme d'insertion d'air, mais procède de manière naturelle (volume constant). Il est important d'y remédier ultérieurement dans une seconde étude.

VI. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé d'étudier un actionneur à flexibilité variable visant à réduire les tremblements dans la main des personnes atteintes de PC. L'objectif est de proposer une solution souple et légère. Elle est basée sur la technologie Layer Jamming et a été développée en impression 3D. Nous avons montré que cet actionneur a eu un comportement similaire à celui d'un ressort rotatif, dont la rigidité pouvait être contrôlée en fonction de la pression d'entrée.

Une orthèse de main 2DOF a été développée. Elle est basée sur deux actionneurs LJ pour les deux articulations de la main (RUD et FE). Ainsi, nous avons évalué son efficacité pour la réduction des tremblements à l'aide d'une main mannequin et notre dispositif de simulation Virtual Fauteuil. Les expériences ont montré que l'orthèse permettait de réduire les tremblements de la main en 93.5% pour FE et 71.9% pour RUD avec un temps de réponse de 461 ms et 893 ms respectivement. Ces premiers résultats montrent un potentiel intéressant pour l'utilisation de cette orthèse avec les actionneurs LJ pour la réduction de tremblements de la main. L'étape suivante visera à optimiser le système afin de trouver la forme optimale pour qu'elle puisse être utilisée et testée confortablement par des patients atteints de PC.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Juan Carlos Martinez Rocha, Dadou Fares, Kilian Pomel et Damien Loiseau pour leur collaboration.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Gulati and V. Sondhi, "Cerebral Palsy: An Overview 2017," *Indian J. Pediatr.*, vol. 85, no. 11, pp. 1006–1016, 2018.
- [2] M. Bax *et al.*, "Review Proposed definition and classification of cerebral palsy," *Exec. Comm. Defn. Cereb. Palsy*, no. April 2005, pp. 571–576, 2005.
- [3] C. Sankar and N. Mundkur, "Cerebral Palsy-Definition, Classification, Etiology and Early Diagnosis," *Indian J. Pediatr.*, vol. 72, no. 10, pp. 865–868, 2005.
- [4] K. W. Krigger, "Cerebral Palsy: An Overview 2006," *Am. Fam. Physician*, vol. 73, no. 1, 2006.
- [5] Y. Bleyenheuff and A. M. Gordon, "Precision grip control, sensory impairments and their interactions in children with hemiplegic cerebral palsy: A systematic review," *Res. Dev. Disabil.*, vol. 34, no. 9, pp. 3014–3028, 2013.
- [6] A. C. Eliasson and A. M. Gordon, "Impaired force coordination during object release in children with hemiplegic cerebral palsy," *Dev. Med. Child Neurol.*, vol. 42, no. 4, pp. 228–234, 2000.
- [7] J. Kotovsky and M. J. Rosen, "A wearable tremor-suppression orthosis," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 35, no. 4, pp. 373–387, Oct. 1998.
- [8] E. Rocon, M. Manto, J. Pons, S. Camut, and J. M. Belda, "Mechanical suppression of essential tremor," *The Cerebellum*, vol. 6, no. 1, pp. 73–78, 2007.
- [9] K. Madere, "Readi-Steady Anti-Tremor Orthotic Glove System - Readi-Steady® | Anti-Tremor Orthotic Glove System | Online Ordering." 2015. [Online]. Available: <https://www.readi-steady.com/>. [Accessed: 28-Mar-2019].
- [10] M. Elías, "The Steadi-One - Stabilizing hand tremors, one hand at a time - Steadiwear Inc," *Steadywear*, 2017. [Online]. Available: <https://steadewear.com/>. [Accessed: 13-Jan-2020].
- [11] L. Nguyen, "Tremelo - Stabilizing Hands, Enhancing Lives.," *FiveMicrons*, 2017. [Online]. Available: <https://fivemicrons.com/>. [Accessed: 13-Jan-2020].
- [12] I. Choi, N. Corson, L. Peiros, E. W. Hawkes, S. Keller, and S. Follmer, "A Soft, Controllable, High Force Density Linear Brake Utilizing Layer Jamming," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 450–457, 2017.
- [13] Y. S. Narang, J. J. Vlassak, and R. D. Howe, "Mechanically Versatile Soft Machines through Laminar Jamming," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 17, pp. 1–9, 2018.
- [14] Y. S. Narang, A. Degirmenci, J. J. Vlassak, and R. D. Howe, "Transforming the Dynamic Response of Robotic Structures and Systems Through Laminar Jamming," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 688–695, Apr. 2018.
- [15] A. W. Peaden and S. K. Charles, "Dynamics of wrist and forearm rotations," *J. Biomech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2779–2785, 2014.
- [16] W. H. Choi, S. Kim, D. Lee, and D. Shin, "Soft, Multi - DoF, Variable Stiffness Mechanism using Layer Jamming for Wearable Robots," vol. 1, no. c, pp. 1–8, 2019.
- [17] "Design Tool | Soft Robotics Toolkit," 2018. [Online]. Available: <https://softroboticstoolkit.com/laminar-jamming/design-tool>. [Accessed: 02-Sep-2021].
- [18] R. Mukaide *et al.*, "Radial-Layer Jamming Mechanism for String Configuration," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3766, no. c, pp. 1–1, 2020.
- [19] W. Pawlak, "Wear and coefficient of friction of pla-graphite composite in 3D printing technology," *Eng. Mech.* 2018, no. December, pp. 649–652, 2018.
- [20] S. K. Charles and N. Hogan, "Dynamics of wrist rotations," *J. Biomech.*, vol. 44, no. 4, pp. 614–621, 2011.
- [21] N. Omarulov, K. Telegenov, M. Zeinullin, I. Tursynbek, and A. Shintemirov, "Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-Aligning Wrist rehabilitation robot," *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, vol. 2016-July, pp. 962–967, 2016.
- [22] P. De Leva, "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's Segment Inertia Parameters," *J. Biomech.*, vol. 29, no. 9, pp. 1223–1230, 1996.
- [23] T. Kaichi *et al.*, "Estimation of center of mass for sports scene using weighted visual hull," *IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Work.*, vol. 2018-June, pp. 1890–1896, 2018.
- [24] S. Wang, X. Liu, and Y. C. Pai, "Limb Collapse or Instability? Assessment on Cause of Falls," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 767–777, 2019.
- [25] F. Goncalves, L. Trenoras, E. Monacelli, and A. Schmid, "Motion adaptation on a wheelchair driving simulator," *2014 2nd Work. Virtual Augment. Assist. Technol. VAAT 2014; Co-located with 2014 Virtual Real. Conf. - Proc.*, pp. 17–22, 2014.
- [26] T. Wang, J. Zhang, Y. Li, J. Hong, and M. Y. Wang, "Electrostatic Layer Jamming Variable Stiffness for Soft Robotics," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 24, no. 2, pp. 424–433, 2019.

Une neuroprothèse visuelle interactive pour mieux percevoir l'environnement

Julien Desvergnès
IRIT ENSEEIHT - CNRS
Toulouse, France

Axel Carlier
IRIT ENSEEIHT
Toulouse, France

Vincent Charvillat
IRIT ENSEEIHT
Toulouse, France

Christophe Jouffrais
IRIT UPS - CNRS - IPAL
Toulouse, France

Résumé—Les neuroprothèses visuelles sont des dispositifs qui permettent de rétablir une perception visuelle limitée chez les patients non-voyants implantés. Certaines de ces neuroprothèses, implantées dans la rétine ou dans le cortex visuel, comprennent un implant, un dispositif de calcul informatique et une caméra externe pour capturer la scène. Une perception visuelle appauvrie est alors restaurée lors d'une micro-stimulation de la rétine ou du cortex visuel via l'implant, ce qui conduit à l'apparition de points blancs appelés phosphènes. Toutefois, la résolution des implants actuels (c'est-à-dire le nombre d'électrodes et leurs espacements) qui ont passé les phases d'essais cliniques reste faible. Cette faible résolution, associée au nombre limité de couleurs différentes rendues par les implants, limite les informations qui peuvent être transférées et donc perçues. Le processus de rendu utilisé par défaut sur les implants, appelé *scoreboard*, est insuffisant pour comprendre la scène visuelle. Pour permettre aux patients de mieux percevoir leurs environnements, les recherches en cours visent à maximiser la qualité et la quantité d'informations fournies par l'implant. Nous avons mis en place une étude comparative entre différents rendus et nous avons montré que le fait de donner aux non-voyants la possibilité d'alterner entre plusieurs modes de rendu en temps réel augmente significativement la compréhension de l'environnement.

Mots clés—Neuroprothèses visuelles, rendu interactif, rendu adaptatif, implant rétinien, vision par ordinateur, non-voyants

I. INTRODUCTION

Selon l'OMS [1], 253 millions de personnes souffrent de déficience visuelle : 36 millions d'entre elles sont aveugles et 217 millions ont une déficience visuelle entre modérée et sévère. Les personnes avec déficiences visuelles utilisent traditionnellement une canne ou un chien-guide pour se déplacer. Mais les cannes et les chiens-guides ont un rôle limité dans la compréhension de la scène visuelle.

Les neuroprothèses visuelles sont apparues dans les années 60 [2] et au cours de la dernière décennie, elles sont apparues comme une technique prometteuse pour restaurer partiellement la vision chez les personnes atteintes de déficience visuelle [3]. Il existe à ce jour deux types de dispositif. Le premier est un dispositif implanté dans la rétine et basé sur des photorécepteurs, appelé MPDA pour microphotodiode-array. Les photons frappent ces derniers et stimulent alors les neurones sous-jacents (exemple avec l'implant ALPHA IMS [4]). Dans le second dispositif, une caméra externe capture la scène et envoie des signaux vers un implant situé dans la rétine ou le cortex pour restaurer des perceptions visuelles. Ce type d'implant peut être épirétinien (sur la rétine), sous-rétinien (juste en dessous de la rétine) ou encore supra-choroïdien

(entre la choroïde et la sclérotique). Depuis les dix dernières années, plusieurs implants ont été placés sur des non-voyants et sont en phase d'essais cliniques [3]. Les neuroprothèses utilisant ce genre d'implants ne sont toutefois pas totalement fonctionnelles en raison d'une résolution limitée, c'est-à-dire du faible nombre d'électrodes utilisées (le système PRIMA en comptait 378 lors d'un essai clinique en 2020 [5]). Une forte limitation des niveaux d'intensité lumineuse applicables sur les phosphènes rend la tâche encore plus complexe. De plus, le bruit (imperfection dans le placement de la matrice d'électrodes, dysfonctionnement des électrodes) dans l'affichage des phosphènes peut également poser des difficultés de perception.

Dans cette étude, nous avons comparé trois modes de rendu prothétiques différents : (i) le mode *scoreboard* (Contrôle) qui est utilisée dans les implants actuels ; (ii) une combinaison de segmentation sémantique d'objets et de détection de structure de la scène appelé "Combiné", similaire à une méthode récente de l'état de l'art [6] ; et (iii) un mode appelé "Switch" qui permet d'alterner entre le rendu Combiné et deux autres rendus où n'apparaissent respectivement que les objets ou que la structure. Notre hypothèse de travail est que le mode de restitution Switch permet de mieux comprendre la disposition des objets ainsi que la structure dans la scène extérieure que les modes de restitution Contrôle (*scoreboard*) et Combiné. Étant donné qu'il est impossible de faire de tels tests sur des patients implantés. L'étude a été réalisée avec un simulateur de vision prothétique inspiré de la réalité clinique. Nos résultats, obtenus sur 20 sujets, montrent l'intérêt du mode "Switch" dans la compréhension de scènes statiques (images).

II. ÉTAT DE L'ART

A. Les neuroprothèses visuelles

Les neuroprothèses visuelles sont des dispositifs conçus pour restaurer la perception de la lumière chez les personnes atteintes de cécité partielle ou totale. Les implants épi et sous-rétiniens, se composent d'une caméra portable, d'un petit ordinateur et d'un réseau d'électrodes qui est implanté dans la rétine. Ces implants génèrent des micro-stimulations électriques qui provoquent l'apparition de points flous appelés phosphènes. Plusieurs dispositifs ont été mis au point et certains implants ont fait l'objet d'essais cliniques. Les systèmes commerciaux existants de neuroprothèses visuelles sont basés sur l'implantation rétinienne d'un nombre limité d'électrodes (6x10 pour l'Argus II développé par Second Sight [7], 21x18

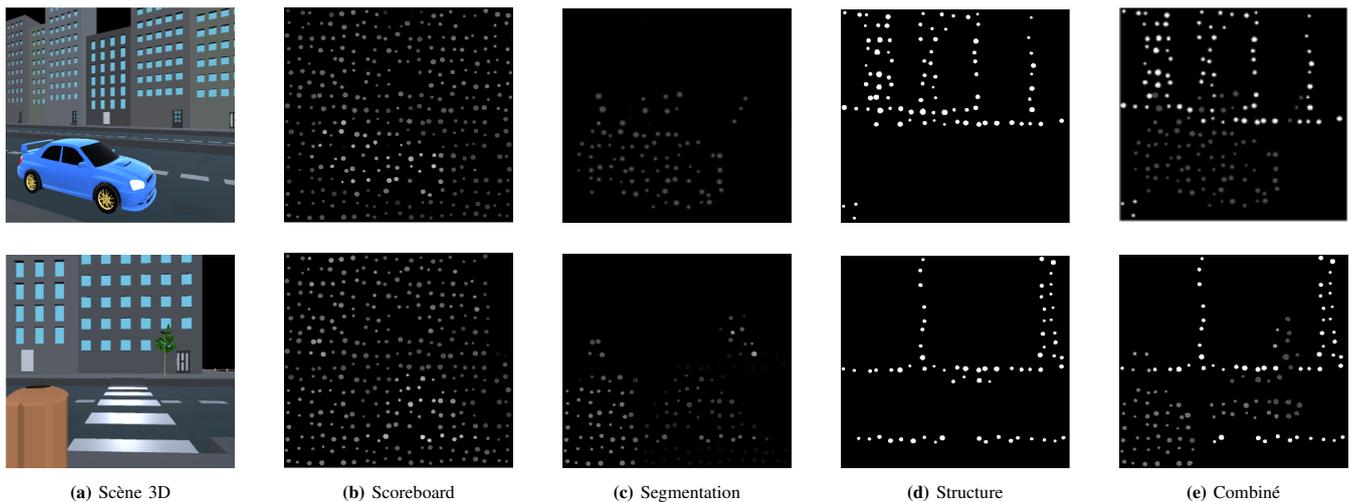


FIGURE 1 – Exemples de rendus prothétiques : (a) montre l'image initiale dans un environnement virtuel. (b) montre comment (a) est rendu avec le rendu scoreboard. (c) montre comment (a) est rendu avec une méthode qui détecte uniquement les objets (segmentation sémantique des objets), et (d) montre comment (a) est rendu avec une méthode qui améliore les informations structurelles (amélioration de la structure). (e) est un rendu combinant (c) et (d) et appelé Combiné.

pour le système PRIMA développé par Pixium Vision [5]). Si ces neuroprothèses ont permis d'améliorer la vie quotidienne de nombreux non-voyants [8], la perception visuelle restaurée est trop faible pour permettre des processus perceptifs ou sensorimoteurs plus avancés tels que la navigation.

B. Différents rendus phosphéniques en fonction de la tâche

Les limitations des neuroprothèses visuelles actuelles posent des problèmes importants pour le rendu d'une scène de manière compréhensible. La méthode historique de rendu "scoreboard" consiste à réduire l'image capturée à la résolution de l'implant, puis à convertir l'image en niveaux de gris et à quantifier ces derniers au niveau d'intensité supporté par l'implant (voir figure 1b). Vergnieux et al. [9] ont proposé d'inclure certaines informations structurelles dans le rendu afin de permettre la navigation dans la scène. A l'aide d'un simulateur de vision prothétique, ils ont montré que la mise en évidence des bords des murs et des sols avec une intensité élevée permet d'améliorer les performances de navigation des sujets [10]. Un exemple de rendu de ce type est proposé sur la figure 1d. Li et al. [11] ont montré qu'une segmentation sémantique des objets (comme des chaussures ou des chaises) dans le rendu visuel améliore significativement la perception de la scène. Un exemple de rendu de ce type est proposé sur la figure 1c. Sanchez-Garcia et al. [6] ont proposé un rendu qui construit une représentation schématique des environnements intérieurs, mettant en évidence les bords informatifs structurels et les silhouettes des objets segmentés. Ils ont montré à l'aide d'un simulateur de vision prothétique (32x32 électrodes, 8 niveaux de luminance), que ce rendu est supérieur au rendu scoreboard pour la reconnaissance des objets et l'identification des pièces. Un exemple de rendu de ce type est proposé sur la figure 1e.

Cependant, comme la résolution des neuroprothèses est limitée, la combinaison de différents rendus pourrait renforcer

l'encombrement visuel et altérer la perception. Une autre solution consisterait à donner à l'utilisateur la possibilité de passer d'un rendu à l'autre selon son désir (rendu interactif). Dans ce cas, l'encombrement visuel serait réduit et la perception pourrait être améliorée. Dans cette étude, nous avons conçu un simulateur de vision prothétique et une tâche visuelle consistant à identifier des objets et des configurations de carrefours routiers dans des scènes visuelles virtuelles. Les réponses de vingt sujets ont confirmé notre hypothèse selon laquelle le rendu interactif améliore significativement la compréhension de la scène.

III. SIMULATEUR DE VISION PROTHÉTIQUE

En raison de l'impossibilité d'utiliser des patients implantés pour tester différents rendus de façon systématique, l'utilisation d'un simulateur de vision prothétique est courante dans la littérature [6], [9], [10], [12]. Comme son nom l'indique, le simulateur permet de simuler différents implants (taille, position, résolution) dans des contextes variés (scènes visuelles 2D ou 3D, statiques ou dynamiques). Pour conduire cette étude, nous avons réalisé un simulateur de vision prothétique en utilisant le moteur Unity 3D développé par Unity Technologies (version 2019.4.19f1). Cet outil initialement dédié au développement de jeux vidéo inclut de nombreuses fonctionnalités (moteur de rendu, moteur physique, composants d'interface utilisateur) qui nous ont permis de publier notre simulateur en ligne¹.

A. Implant simulé

Nous avons choisi de simuler le système PRIMA développé par Pixium Vision (Paris, France), composé d'un réseau de 21x18 électrodes. Notre choix est motivé par le fait que c'est l'implant le plus récent ayant passé des phases d'essais cliniques satisfaisantes [3]. Il est aussi l'un de ceux qui permet

1. <http://ubee.enseiht.fr/Julien/WebV2-17/index.html>

un rendu visuel avec la plus grande résolution à ce jour. En effet, les limitations techniques actuelles ne permettent pas d'avoir un nombre d'électrodes très élevé (l'Argus II possède seulement 6x10 électrodes) [13].

Un taux de défaillance (appelé "dropout" en anglais) de 10% était appliqué aux électrodes, afin de simuler des électrodes non fonctionnelles ou cassées. Un flou Gaussien était appliqué aux phosphènes générés, la taille des phosphènes au sein d'un même implant variait entre 0,235° et 0,275° du champ de vision. L'espacement entre deux phosphènes variait entre 0,55° et 0,825° du champ de vision. Chaque électrode pouvait générer un phosphène avec quatre niveaux de gris. Notre simulateur est inspiré de ceux proposés par Chen et al. [12] et Denis et al. [14].

B. Rendus phosphéniques

Sur la base de ces règles, une disposition différente des phosphènes a été générée de manière aléatoire pour chaque sujet, afin de modéliser le scénario réaliste où deux personnes implantées avec le même modèle de prothèse virtuelle ont des perceptions phosphéniques différentes.

Dans cette étude, nous avons utilisé le rendu scoreboard (Contrôle), utilisé par défaut dans certains implants commercialisés actuellement. Nous avons aussi utilisé un rendu mélangeant les segmentations d'objets et de structure (appelé "Combiné") récemment proposé par Sanchez et al. [6]. Pour tester notre hypothèse, nous avons conçu un troisième mode de rendu appelé "Switch" qui permet de changer le rendu à volonté parmi les trois suivants : Objets seuls, Structure seule, Objets + Structure. Les figures 2 et 3 illustrent respectivement la construction des rendus Contrôle et Combiné.

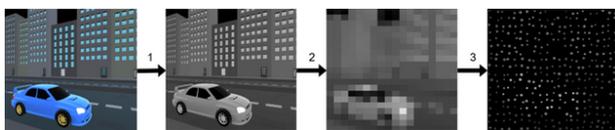


FIGURE 2 – Génération du rendu scoreboard (Contrôle). Chaque image est d'abord convertie en une image en niveaux de gris (étape 1). L'image est ensuite réduite à la résolution de l'implant simulé (dans notre cas 21x18) en faisant la moyenne des couleurs dans une fenêtre locale (on découpe l'image d'entrée en $21 \times 18 = 378$ zones, étape 2). Nous appliquons ensuite un filtre sélecteur d'intensité uniforme pour quantifier l'intensité en quatre niveaux de gris. Enfin, nous transformons chaque zone rectangulaire qui représente désormais une électrode de l'implant en un phosphène (étape 3).

Le mode de rendu Switch permet au sujet de changer de rendu à volonté. Il lui suffit, pour ce faire, de cliquer sur un bouton prévu pour cet effet. Dans ce mode, les rendus disponibles sont le rendu Combiné, le rendu Objets et le rendu Structure. Le rendu Objets est obtenu en transformant l'image issue de la figure 3 - 2A en version phosphénique. Le rendu Structure est obtenu en transformant l'image issue de la figure 3 - 2B en version phosphénique.

IV. MÉTHODE ET PROTOCOLE

A. Hypothèse

Nous avons formulé l'hypothèse suivante : la possibilité de changer de type de rendu en temps réel pour réaliser des tâches

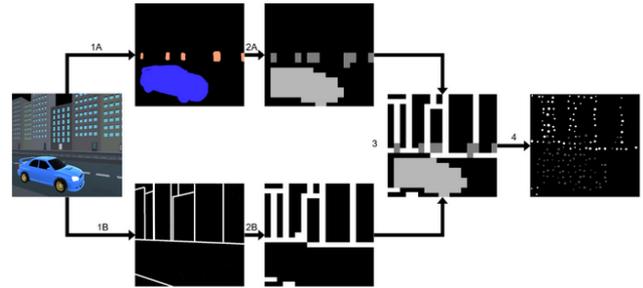


FIGURE 3 – Génération du rendu Combiné (objets + structure). Nous extrayons d'abord une carte de segmentation d'objets de l'image d'entrée (étape 1A). Afin d'obtenir cette carte de segmentation en temps réel, nous avons au préalable labélisé tous les objets dans notre scène. Nous avons mis en place un mécanisme dans la simulation qui permet à la caméra de modifier en temps réel la texture des objets en fonction du label associé. Cela nous permet d'obtenir des cartes des images de segmentation sémantique d'objets (1A). Comme pour le rendu Scoreboard, cette image est mise à l'échelle et quantifiée à l'étape 2A. En parallèle, nous extrayons également les contours de la structure de la scène (1B). Pour récupérer ces contours, nous appliquons un filtre de Sobel sur l'image de la scène sans les objets. On utilise dans ce cas une caméra qui ne détecte que les bâtiments et les routes. L'image des contours est ensuite mise à l'échelle et quantifiée (étape 2B). À ce stade, nous avons deux images qui représentent respectivement la segmentation Objets (2A) et la structure de la scène (2B). Ces deux images sont ensuite combinées en une seule image (3), en conservant la valeur d'intensité de chaque pixel issue de l'extraction de structure puis en écrasant ces valeurs par celles de la segmentation d'objets non nulles. Enfin, nous transformons chaque zone rectangulaire qui représente désormais une électrode de l'implant en un phosphène (4).

de compréhension de scènes visuelles extérieures permet aux sujets d'avoir de meilleures performances visuelles.

B. Sujets

Les sujets ont été recrutés d'une part dans une école d'ingénieur et d'autre part via les réseaux sociaux (LinkedIn, Facebook). 20 sujets, (11 hommes et 9 femmes âgés de 17 à 55 ans, moyenne : 25 ans, écart-type : 13 ans), ont participé à l'expérience.

C. Conditions expérimentales

Lors de cette étude nous avons inclus trois conditions expérimentales : le rendu Scoreboard (Contrôle) seul, le rendu Combiné (Objets + Structure) seul, et le mode Switch qui permet d'utiliser un ou plusieurs rendus (parmi Objets, Structure et Combiné) à volonté avant de répondre.

D. Protocole expérimental

Avant de démarrer l'expérience, les participants ont rempli un formulaire avec des données descriptives telles que leur âge, adresse email, état de la vision et un formulaire de consentement.

La session expérimentale contenait trois blocs correspondant aux trois conditions expérimentales. Chaque bloc était divisé en trois parties comprenant la familiarisation avec le rendu utilisé dans le bloc, la phase de test, puis un questionnaire concernant le rendu que le sujet vient d'utiliser dans le bloc.

Pendant la familiarisation, les sujets étaient libres d'utiliser le simulateur pour répondre à deux questions, sans contrainte

de temps. Pour la condition Switch, ils pouvaient changer de rendu à volonté avant de répondre à ces deux questions.

Pendant la phase de test, le sujet devait répondre à une série de 15 questions incluant 5 questions dans les trois catégories nommées "objets", "rues", "portes et passages piétons". Les questions de la catégorie "objets" portaient sur la présence d'objets qui peuvent gêner le déplacement du sujet. Les questions de la catégorie "rues" portaient sur la configuration des intersections. Les questions de type "portes et passages piétons" portaient sur la présence de portes et de passages piétons dans la scène visuelle. Une fois la réponse choisie, il passait à la question suivante (il ne connaît pas la validité de sa réponse). L'ordre des blocs et des questions était trié de manière pseudo-aléatoire pour limiter les biais inter-blocs ou inter-questions. Pour éviter que les sujets ne reconnaissent certaines questions d'un bloc à un autre, l'angle de vue de la caméra dans la scène était modifié. Ainsi la question restait la même, mais la réponse pouvait changer selon l'orientation de la caméra.

A la fin de chaque bloc, les sujets devaient répondre à des questions subjectives concernant la pertinence du rendu utilisé dans ce bloc. Les questions portaient sur le plaisir éprouvé et l'utilisabilité perçue concernant le rendu utilisé dans ce bloc. Il y avait 4 questions pour les conditions Scoreboard et Combiné, et 5 questions (dont 4 identiques aux précédentes) pour la condition Switch. Dans le cas de la condition Switch, on demandait également aux sujets s'ils trouvaient cette fonctionnalité pertinente. Pour toutes ces questions, ils devaient répondre sur une échelle de Likert allant de 1 à 7 (1 signifiant pas du tout d'accord et 7 tout à fait d'accord). Les questions posées sont disponibles à l'adresse suivante².

E. Variables analysées

Pour répondre à notre hypothèse, nous avons mesuré, pour chaque sujet, plusieurs variables :

- la validité de chaque réponse (correct / incorrect / je ne sais pas) ;
- le temps de réponse à chaque question ;
- pour la condition Switch : l'ordre de sélection des rendus, la durée d'utilisation de chaque rendu, le nombre de changements de rendu.

Pour analyser les résultats quantitatifs nous avons effectué des tests ANOVA à 2 facteurs selon le modèle (Condition * Tâche * Interaction), puis nous avons utilisé un test post-hoc de Tukey pour comparer les paires deux à deux. Dans les figures, nous avons utilisé des intervalles de confiance à 95%.

V. RÉSULTATS

A. Comparaison des trois rendus

Réponses : Une ANOVA à deux facteurs (Condition * Tâche * Interaction) a montré que le nombre de réponses correctes est significativement différent selon le rendu ($F(2,171) = 15,834$; $p < 0,0001$) et selon la tâche ($F(2,171) = 81,730$; $p < 0,0001$). L'interaction est également

2. https://osf.io/dqvy8/?view_only=2807537abf8f437ebd4c33e45ecb67de

significative ($F(4,171) = 5,728$; $p < 0,001$), ce qui montre que la condition Switch est très efficace pour identifier les objets, mais encore plus pour comprendre la configuration des rues (voir FIGURE 4).

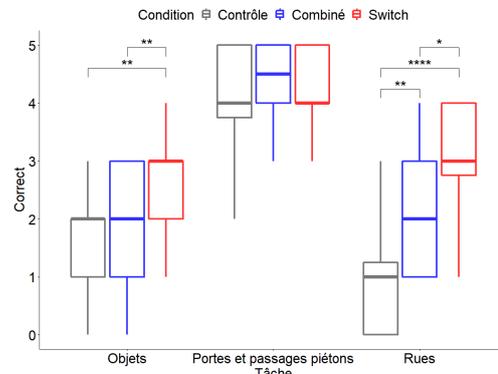


FIGURE 4 – Nombre moyen de réponses correctes par Rendu et par Tâche. La détection des passages piétons et des portes est équivalente pour toutes les conditions. L'identification des objets et des configurations de rues est significativement améliorée avec le rendu Switch. (N=20. Les barres indiquent un intervalle de confiance de confiance à 95%. *=0.05 ; **=0.01 ; ***=0.001 ; ****=0.00001)

Réponses "Je ne sais pas" : Une ANOVA à deux facteurs (Condition * Tâche * Interaction) a montré que le nombre de réponses "je ne sais pas" est significativement différent selon le Rendu ($F(2,171) = 10.543$; $p < 0,0001$) et selon la tâche ($F(2,171) = 5.882$; $p < 0,001$). L'interaction n'est cependant pas significative ($F(4,171) = 1.909$; $p = 0.111$). Le nombre de réponses "je ne sais pas" est significativement plus élevé avec le rendu Scoreboard pour les tâches "objets" et "rues".

Temps de réponse : La distribution des temps de réponse n'étant pas normale, nous avons réalisé une transformation logarithmique des données. Nous avons réalisé une ANOVA à deux facteurs (Condition * Tâche * Interaction) sur les données transformées qui a montré que le temps de réponse est significativement différent selon la condition expérimentale ($F(2,891) = 17.245$; $p < 0,0001$) et selon la tâche ($F(2,891) = 14.081$; $p < 0,0001$). L'interaction n'est cependant pas significative ($F(4,891) = 0.465$; $p = 0.762$). Le rendu Switch obtient des temps de réponses plus longs comparés au rendu Scoreboard, quelle que soit la tâche réalisée.

B. Jugement subjectif

Pour rappel, les participants devaient répondre avec un score entre 1 et 7 à une série de questions à l'issue de chacun des trois blocs.

Une ANOVA à deux facteurs (Rendu * Tâche * Interaction) montre que le score est significativement différent selon les rendus ($F(2,228) = 11.878$; $p < 0.0001$) et selon la tâche ($F(3,228) = 5.604$; $p < 0.001$). L'interaction est significative ($F(6,228) = 7.537$; $p < 0.0001$). La FIGURE 5 présente les résultats obtenus.

Notons qu'à la question : "J'ai trouvé la possibilité de changer de rendu très utile", on obtient un score moyen de 6.2 +/- 1.2 (sur 7).

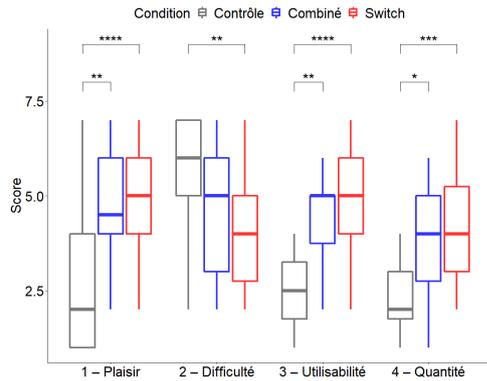


FIGURE 5 – Score moyen donné par les sujets aux trois rendus Scoreboard, Combiné et Switch. Cette figure montre des résultats significativement différents. Analyse réalisée sur les 20 sujets. Les scores sont compris entre 1 et 7 (1 signifiant pas du tout d'accord et 7 tout à fait d'accord).

C. Classement final

Les sujets devaient finalement classer les rendus par ordre de préférence en fonction de quatre dimensions : pour identifier les intersections et les coins de rues, pour identifier les objets, pour identifier les portes et passages piétons, et globalement. Afin de générer un score de préférence, nous avons attribué trois points si le rendu est classé premier, 2 points s'il est classé deuxième et 1 point s'il est classé troisième. On observe que l'ordre de préférence des rendus est Switch, Combiné, Contrôle, quelle que soit la question posée.

D. Analyse détaillée du comportement observé pour le rendu Switch

Dans le mode Switch, les utilisateurs pouvaient choisir d'utiliser librement un des trois rendus Objets, Structure, Combiné. Pour chaque essai réalisé par les sujets, nous avons analysé plus précisément le nombre de fois où chacun des rendus était utilisé, la durée d'utilisation de chaque rendu et le dernier rendu utilisé. La distribution des durées d'utilisation n'étant pas normale, nous avons réalisé une transformation logarithmique des données. Une ANOVA à un facteur (Tâche) a montré que les durées d'utilisation (après transformation) des rendus (Objets, Structure, Combiné) ne sont pas significativement différentes selon la tâche ($F(2,860) = 0.09$; $p = 0.914$). Une ANOVA à un facteur (Tâche) a montré que le nombre d'utilisations de chaque rendu (Objets, Structure, Combiné) n'est pas significativement différent selon la tâche non plus ($F(2,860) = 1.589$; $p = 0.205$). Une ANOVA à un facteur (Tâche) a montré que le nombre de fois où un rendu est utilisé en dernier est significativement différent selon la tâche ($F(2,171) = 5.914$; $p < 0.001$).

VI. DISCUSSION

Nos résultats montrent que la détection des passages piétons et des portes est facile, indépendamment du rendu utilisé. Ceci n'est pas surprenant car pour les portes, le rendu consiste systématiquement en un rectangle blanc qui est facile à percevoir. Une étude de Moreno [15] utilisait une méthode différente

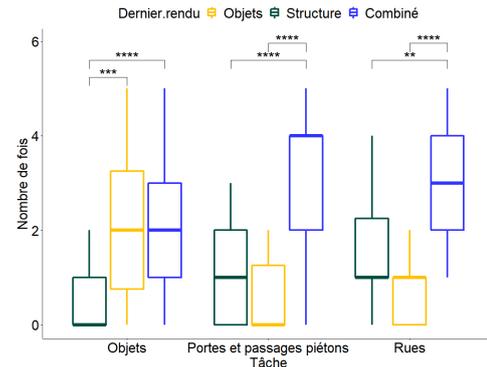


FIGURE 6 – Nombre moyen d'utilisation en dernière instance des trois rendus du mode Switch par Tâche. Analyse réalisée sur les 20 sujets.

pour détecter les portes. Leur objectif était différent du nôtre dans le sens où ils cherchent à donner un indice sonore sur l'emplacement de portes le long de murs dans un couloir. Les passages piétons sont moins faciles à percevoir que les portes mais plus faciles à percevoir que les autres objets car ils apparaissent comme une succession de rectangles parallèles.

Par contre, l'identification des objets et la compréhension de l'organisation des rues dépendent fortement du rendu utilisé. Les résultats montrent que le rendu Switch est significativement meilleur que le rendu Contrôle et le rendu Combiné. Nous avons observé que le rendu Combiné n'est pas significativement plus efficace que le rendu Contrôle pour la détection des objets. Ceci n'est pas cohérent avec l'étude de Sanchez et al. [6]. Cette divergence peut s'expliquer par la résolution des implants utilisés dans notre simulateur (21x18) qui est inférieure à celle utilisée dans le leur (32x32). En effet, selon Cha et al. [16], 600 électrodes avec un rendu de type scoreboard (Contrôle) sont suffisantes pour obtenir une perception déjà fonctionnelle. L'analyse des réponses "je ne sais pas" montre qu'il y a une différence significative selon les rendus et les tâches. Le rendu Contrôle, obtient plus de réponses "je ne sais pas" que le rendu Switch dans les tâches portant sur les "objets" et les "rues".

En ce qui concerne les temps de réponses, nous obtenons des différences significatives. Le rendu Switch est systématiquement plus utilisé en termes de temps d'utilisation que le rendu Contrôle peu importe la tâche. Il est également plus utilisé que le rendu Combiné dans les tâches de type "Portes et passages piétons". Cela peut s'expliquer par le fait que changer de rendu rallonge automatiquement le temps de réponse. En contrepartie, comme le montrent les indices de préférence, la décision est plus sûre (les sujets jugent avoir suffisamment d'informations pour répondre à la question) et la satisfaction plus grande. On pourrait imaginer qu'avec de l'entraînement, la décision soit prise plus rapidement avec le mode Switch.

En ce qui concerne l'analyse des jugements subjectifs et du classement des modes de rendu, nous mettons en évidence que le mode de rendu Switch présente un net avantage sur le mode de rendu Scoreboard dans toutes les catégories. Cela dit, le mode de rendu Switch n'est pas significativement préféré

par rapport au mode de rendu Combiné. En revanche, le classement final montre quand même que le mode de rendu classé premier est le Switch devant le mode de rendu Combiné.

Les résultats obtenus en regardant de plus près le comportement des sujets lorsqu'ils utilisent le mode de rendu Switch sont également intéressants. La plupart des sujets utilisent souvent les rendus dans l'ordre d'affichage des boutons à l'écran. Il semble donc qu'il n'y ait pas de stratégie consciente d'utilisation des rendus de la part des sujets. Par contre, on observe que le dernier rendu choisi est significativement relié avec la tâche réalisée. On observe notamment que les rendus Combiné et Objets sont plus souvent les derniers rendus utilisés pour l'identification d'objets. Les rendus Combiné et Structure sont plus souvent les derniers rendus utilisés pour comprendre la configuration des rues. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les rendus appropriés à chaque tâche sont plus utilisables pour prendre la décision finale. Par contre, le rendu combiné est utilisé plus fréquemment en dernier ce qui va à l'encontre de notre hypothèse sur l'encombrement visuel. En effet, dans ce cas, le rendu Objets devrait être privilégié pour percevoir les objets et le rendu Structure devrait être privilégié pour comprendre les orientations des rues. Cependant ce résultat est à considérer en fonction du fait que le rendu Switch est largement préféré au rendu Combiné seul (en dehors de la condition Switch, quand il est présenté comme seul rendu disponible). Une interprétation possible est que le rendu Combiné est apprécié après avoir utilisé les rendus appropriés pour percevoir les items dans la scène visuelle. Il permettrait de confirmer la perception unitaire puis d'essayer de les replacer dans la scène globale afin de mieux la comprendre.

VII. LIMITATIONS DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES

Dans un premier temps nous pouvons aborder la question de la prédiction des images de segmentation et de structure pour construire les différents rendus. Dans notre étude, ces cartes sont très faciles à obtenir car les objets de la scène sont labélisés et les caméras paramétrées pour ne capturer que les éléments qui sont pertinents (objets pour la caméra objets qui change la texture en fonction des labels, éléments de structure pour la caméra de structure). En condition réelle il faudrait trouver un autre moyen de récupérer ces informations. L'ajout de réseaux de neurones permettrait de résoudre ce problème. La prédiction de segmentation sémantique est un sujet très abordé depuis déjà quelques années avec la production de réseaux tels que EfficientDet [17] ou DeepLab [18]. En ce qui concerne la récupération de structure il existe également quelques réseaux entraînés à prédire ce genre d'informations comme par exemple PanoRoom [19]. Il reste deux problèmes à gérer, les erreurs dans les prédictions et la vitesse de calcul. Il faut que les prédictions ne soient pas trop loin de la réalité et que ces prédictions soient produites en temps quasi-réel.

Pour pousser le réalisme au maximum il pourrait également être intéressant de réaliser une expérience en condition réelle. Le dispositif pourrait être composé d'un casque de réalité virtuelle équipé de caméra qui filme la scène et d'un boîtier de

calcul qui s'occupe de calculer le rendu visuel. Ce dispositif serait une extension du premier proposé par Cha en 1992 [16]. L'intérêt de faire une étude en conditions réelles est double : d'un côté on pourrait proposer un dispositif d'étude complet très proche de la réalité, ce qui permettrait aux futurs travaux d'être essayé sur un modèle réaliste. De plus nous pourrions lors de cette étude mesurer la réaction des sujets dans des tâches de navigation et non plus de perception et de compréhension.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le laboratoire Cherchons Pour Voir (CPV) pour l'aide fournie pendant ces travaux.

RÉFÉRENCES

- [1] R. R. Bourne *et al.*, "Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment : a systematic review and meta-analysis," *The Lancet Global Health*, 2017.
- [2] B. S. Wilson and M. F. Dorman, "Cochlear implants : current designs and future possibilities," *J Rehabil Res Dev*, 2008.
- [3] E. Fernandez, "Development of visual neuroprostheses : trends and challenges," *Bioelectronic medicine*, 2018.
- [4] K. Stingl *et al.*, "Subretinal visual implant alpha ims-clinical trial interim report," *Vision research*, 2015.
- [5] D. Palanker *et al.*, "Photovoltaic restoration of central vision in atrophic age-related macular degeneration," *Ophthalmology*, 2020.
- [6] M. Sanchez-Garcia *et al.*, "Semantic and structural image segmentation for prosthetic vision," *Plos one*, 2020.
- [7] D. D. Zhou *et al.*, "The argus@ ii retinal prosthesis system : An overview," in *IEEE international conference on multimedia and expo workshops (ICMEW)*, 2013.
- [8] K. Stingl *et al.*, "Interim results of a multicenter trial with the new electronic subretinal implant alpha ams in 15 patients blind from inherited retinal degenerations," *Frontiers in neuroscience*, 2017.
- [9] V. Vergnien *et al.*, "Wayfinding with simulated prosthetic vision : Performance comparison with regular and structure-enhanced renderings," in *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.
- [10] —, "Simplification of visual rendering in simulated prosthetic vision facilitates navigation," *Artificial organs*, 2017.
- [11] H. Li *et al.*, "Image processing strategies based on saliency segmentation for object recognition under simulated prosthetic vision," *Artificial intelligence in medicine*, 2018.
- [12] S. C. Chen *et al.*, "Simulating prosthetic vision : I. visual models of phosphenes," *Vision research*, 2009.
- [13] M. Farvardin *et al.*, "The argus-ii retinal prosthesis implantation ; from the global to local successful experience," *Frontiers in neuroscience*, 2018.
- [14] G. Denis *et al.*, "Simulated prosthetic vision : improving text accessibility with retinal prostheses," in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.
- [15] M. Moreno *et al.*, "Realtime local navigation for the blind : detection of lateral doors and sound interface," *Procedia Computer Science*, 2012.
- [16] K. Cha *et al.*, "Simulation of a phosphene-based visual field : visual acuity in a pixelized vision system," *Annals of biomedical engineering*, 1992.
- [17] M. Tan *et al.*, "Efficientdet : Scalable and efficient object detection," in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020.
- [18] L.-C. Chen *et al.*, "Deeplab : Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2017.
- [19] C. Fernandez-Labrador *et al.*, "Panoroom : From the sphere to the 3d layout," 2018.

Système d'alerte sur obstacles pour améliorer l'autonomie des personnes utilisant un fauteuil roulant

Gilles Tagne

CRISTAL, CNRS UMR 9189 and JUNIA
2 Rue Norbert Segard
59046 Lille, FRANCE
gilles.tagne@junia.com

Annemarie Kokosy

HEMiSF4iRE Design School
Catholic University of Lille
Lille, FRANCE
Anne-Marie.Kokosy@univ-catholille.fr

Philippe Saey

Labo Regeltechnik en Automatisering
KU Leuven, ESAT-ELECTA-EA
Gand, Belgique
philippe.saey@kuleuven.be

Steeve Mbakop

CRISTAL, CNRS UMR 9189 and JUNIA
2 Rue Norbert Segard
59046 Lille, FRANCE
steeve-kamga.mbakop@junia.com

Maxime Cheramy

JUNIA
2 Rue Norbert Segard
59046 Lille, FRANCE
maxime.cheramy@junia.com

Ali Oukhrif, Thomas Degallaix

JUNIA
Lille, France
ali.oukhrif@junia.com
thomas.degallaix@junia.com

Foucauld Bergerault

JUNIA ISEN
Lille, France
foucauld.bergerault@student.junia.com

Axandre Gorgol

JUNIA ISEN
Lille, France
axandre.gorgol@student.junia.com

Ikram Ahanou

JUNIA ISEN
Lille, France
ikram.ahanou@student.junia.com

Résumé—L'intérêt principal de cet article repose sur la mise en œuvre d'une application d'alerte sur obstacles visant à améliorer l'autonomie des personnes utilisant un fauteuil roulant. Cette application est conçue sur un dispositif d'enregistrement de données hétérogènes, ouvert et configurable. Une analyse des données collectées lors des essais réalisés permet d'évaluer l'efficacité de la solution proposée et d'envisager de nouveaux axes d'améliorations.

Mots clés—Système d'alerte sur obstacles, collecte de données, tests cliniques, fauteuil roulant connecté intelligent

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, les récentes avancées technologiques ont favorisé l'émergence des technologies d'assistance visant à compenser le handicap [1], à améliorer l'autonomie des personnes à mobilité réduite ou en situation de handicap [2], [3], [4]. Toutes ces solutions technologiques permettent ainsi d'améliorer l'autonomie et la qualité de vie des personnes âgées ou des personnes en situation de handicap.

Plusieurs travaux présentent des applications spécifiques ou une méthodologie permettant de concevoir des applications garantissant la maintenance à domicile, ce, avec assez un maximum d'autonomie [5], [6]. De nos jours, l'un des défis est de fournir des outils permettant d'effectuer des tests cliniques ou des tests à domicile, de ces applications. Lorsqu'on vient à effectuer des tests cliniques sur un dispositif médical ou

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen EDUCAT (2S01-032), soutenu financièrement par le programme Interreg VA 2 Mers. Pour plus d'information, visitez le site web du projet www.educat2seas.eu.

des tests sur l'efficacité d'un traitement médicamenteux dans un environnement donné, il est nécessaire de collecter et de synchroniser des données de capteurs physiques, mais également les réponses aux divers questionnaires utilisés lors de l'étude. Plusieurs investigations ont été menées pour répondre à ce besoin : des solutions utilisant un Cloud sont proposées [7], [8], [9], [10]. Plus récemment, un dispositif générique de collecte de données des capteurs d'un fauteuil roulant électrique (FRE) et de questionnaires ont été développés [11].

Les FRE permettent aux personnes rencontrant des difficultés de déambulation de retrouver une certaine autonomie dans leur mobilité et d'améliorer leur qualité de vie. Il est possible de classer les systèmes d'aides à la conduite d'un FRE en plusieurs catégories :

- les systèmes d'alerte sur obstacles [12], [3],
- les systèmes de conduite partagée où la conduite du fauteuil est conjointement réalisée par l'utilisateur et un module d'assistance. [13], [12],
- les systèmes de conduite semi-autonome et autonome.

La plupart des solutions d'applications d'assistance présentées dans la littérature ont été développées sur des fauteuils modifiés dans les laboratoires de recherche. Ils n'ont pas été forcément conçus pour être interfacés avec n'importe quel FRE du marché, ce qui pourrait limiter leur utilisation. Le dispositif d'enregistrement de données hétérogènes proposé dans [11] permet de résoudre ces problèmes d'interfaçage dans la mesure où, la solution pourrait être implémentée sur environ 80% des fauteuils du marché. A la suite de ce développement,

il est proposé dans cet article, une application d'alerte sur obstacles permettant d'améliorer l'autonomie des personnes utilisant un fauteuil roulant. La suite de l'article est structurée en trois parties. La première partie présente le système d'alerte d'obstacles développé (section II). Puis l'évaluation de ce système en vue de préparer des essais cliniques sera décrite dans la section III. La section IV nous présente un début d'analyse des résultats obtenus sur une dizaine de participants. Ensuite, des conclusions et directions futures sont présentées dans la section V.

II. PRÉSENTATION DU SYSTÈME D'ALERTE SUR OBSTACLE

Le système d'alerte sur obstacle (OAS) présenté et testé dans cet article à été développé sur un dispositif d'enregistrement de données hétérogènes précédemment mis en œuvre [11]. La Fig. 1 présente une vue d'ensemble du système d'enregistrement.

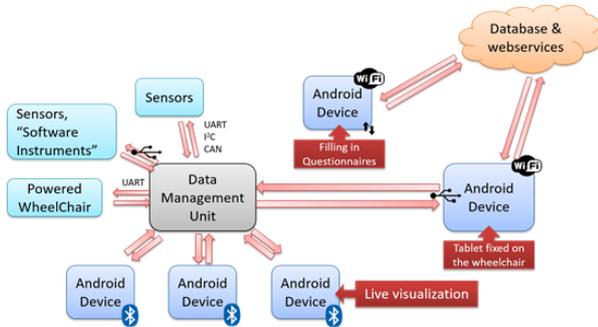


FIGURE 1. Vue d'ensemble du dispositif d'enregistrement de données

L'OAS présentée à la Fig. 2 est un système modulaire de détection et d'alerte sur obstacles, basé sur des capteurs à ultrasons et infrarouges. Ce système modulaire peut être branché sur des FRE utilisant les technologies de commande fabriquées par Dynamic Control (modèle DX2) ou Penny & Giles (modèle R-Net). Le système fournit des informations à l'utilisateur sur l'emplacement et les risques présentés par des obstacles. Ces informations peuvent être de plusieurs ordres : haptique, visuel ou audio. Les utilisateurs peuvent choisir en temps réel le type de feedback qu'ils souhaitent utiliser. Les données collectées de tous les capteurs ainsi que celles fournies par le fauteuil (position X, Y du joystick, profil, vitesse maximale, etc.) sont stockées localement dans une carte SD et envoyées à la tablette pour être stockées dans une base de données sur le Cloud. Les données peuvent être ensuite visualisées en temps réel ou analysées ultérieurement.

Ce dispositif est développé autour d'une application Android 'EDUCAT App'. L'application permet aussi à l'utilisateur de remplir les questionnaires nécessaires (par exemple des questions sur l'état de santé, la prise de médicament, sur l'équipement médical ou sur l'application d'alerte). Les résultats du questionnaire sont synchronisés avec toutes les autres données enregistrées. L'ensemble de ces données sera analysé pour évaluer si le système d'alerte d'obstacles proposé

pourrait offrir une meilleure qualité de vie aux personnes à mobilité réduite.

A. Partie matérielle de l'OAS (Hardware)

Le système d'alerte d'obstacles dispose des instruments suivants : le joystick du fauteuil roulant, un GPS, une IMU et les capteurs de distance, ainsi que d'un instrument logiciel présent dans la tablette (voir Fig. 3, 2).

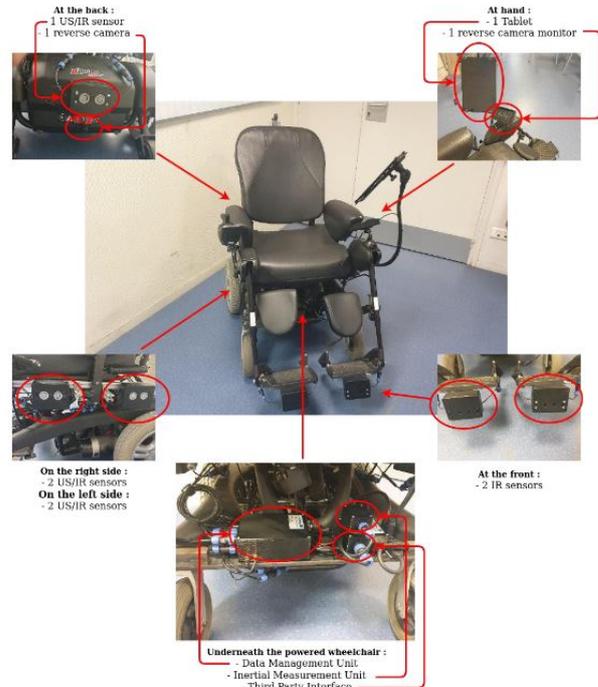


FIGURE 2. Partie matérielle du système d'alerte sur obstacle

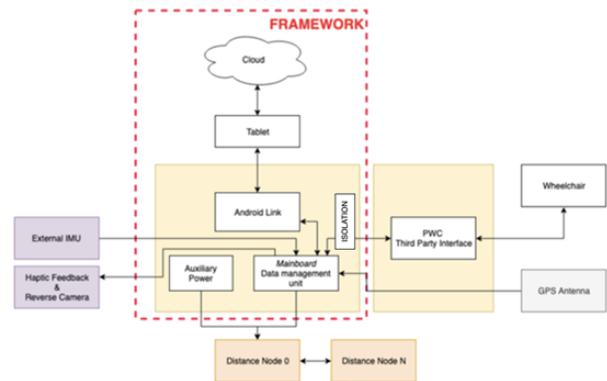


FIGURE 3. Schéma général du système d'alerte d'obstacles

Il comporte les éléments suivants :

- l'unité de gestion des données (DMU) : qui stocke la configuration du test, collecte les données des capteurs, du joystick du fauteuil et des algorithmes et les envoie à la tablette.
- l'interface avec les équipements médicaux : c'est l'interface entre le bus de données pour FRE et la DMU.

Actuellement, la DMU peut s'interfacer avec les systèmes de contrôle de fauteuils DX2, LinX ou R-Net.

- les capteurs infra-rouges, ultrasons et la centrale inertielle (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre) un GPS (pour l'extérieur).
- une tablette avec carte SIM : elle permet l'envoi de la configuration à la DMU et l'envoi de données de la DMU vers le Cloud. De plus, elle donne un retour à l'utilisateur sur l'emplacement et la dangerosité des obstacles autour du fauteuil roulant. L'utilisateur peut choisir en temps réel entre les retours suivants : visuel, vocal, buzzer, haptique.
- une caméra arrière : activée lorsque le fauteuil roulant se déplace vers l'arrière.

Le système ainsi développé a les caractéristiques techniques suivantes :

- Vitesse maximale : 6 km/h
- Espace mémoire de la carte SD pour les mesures de données : 32 ou 64 Go
- Mémoire utilisée pendant les mesures : Max 512 octets toutes les 20ms
- Portée de détection des obstacles pour 1 capteur US/3IR : 2cm à 300cm
- Portée de détection des obstacles pour les capteurs 4IR : 2cm à 135cm

B. Software et retour utilisateur

La Fig. 4 présente une vue de l'application d'alerte d'obstacles EDUCAT App. La distance à l'obstacle est indiquée par un code de couleur allant du vert (environ 1.5 -2m) clair, passant par le jaune (1.20-150m), l'orange (0.60-1.20m) jusqu'au rouge foncé (inférieur à 20 cm). L'interface nous

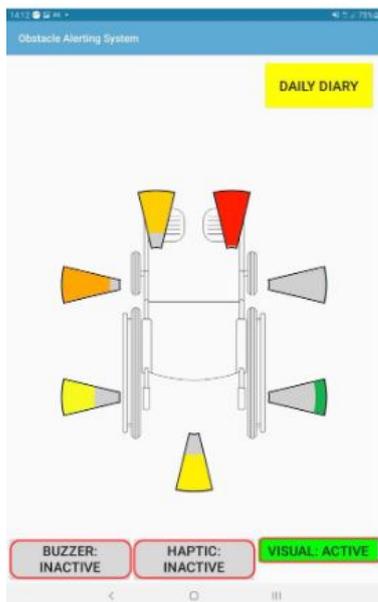


FIGURE 4. Retour visuel du dispositif d'alerte d'obstacles

permet d'activer ou désactiver le buzzer, le retour haptique et remplir le formulaire.

III. HYPOTHÈSES, MATÉRIELS ET CONDITIONS DE RÉALISATION DES TESTS

L'évaluation et le développement de l'OAS implique :

- **Obtenir le feedback des utilisateurs sur le système**, y compris (Qu'est-ce qui est bon ? Qu'est-ce qui doit être changé ? Qu'est-ce qui devrait être amélioré ? Quand est-il utile ? Quels utilisateurs de fauteuils roulants pourrait-il aider ? Certaines de ces informations seront obtenues par le biais des questionnaires avant et après les essais.
- **Analyser des données de l'OAS**. Cette analyse impliquera l'utilisation des questionnaires post-essai, la relation entre les changements dans les habitudes ou qualités de conduite et le moment où l'OAS est active et inactive, la corrélation entre les entretiens et l'analyse des réponses des questionnaires.

A. Hypothèses

Pour évaluer l'impact de l'OAS, il est nécessaire d'identifier le plus grand nombre possible de variables qui peuvent affecter la façon dont les participants conduisent le fauteuil avec et sans l'OAS.

- **Le comportement du conducteur** : Les habitudes de conduite de chaque utilisateur de fauteuil roulant électrique peuvent être affectées différemment. Le modèle de conduite sera lié à la capacité de l'utilisateur à conduire le FRE, (par exemple, à son expérience conduite), à une manœuvre particulière (par exemple, avancer, tourner, faire marche arrière), aux mouvements du joystick, à l'environnement, aux incidents (par exemple, les collisions), le bien-être, les réactions des conducteurs après l'ajout de l'OAS. L'analyse des habitudes de conduite des utilisateurs peut donc fournir des informations sur l'impact de l'OAS sur les habitudes de ce dernier.
- **Le système d'alerte** : Quand faut-il commencer à alerter l'utilisateur de la présence d'un objet ? Est-ce qu'il est distrait ou provoque des mouvements involontaires du joystick ? Combien de fois a-t-il été activé/désactivé par l'utilisateur ? Augmente-t-il la probabilité de collision ? Le feedback audio incite-t-il à regarder le feedback visuel ? Comment l'impact d'un certain retour d'informations peut-il être corrélé avec les habitudes de conduite et les commentaires de l'utilisateur ?
- **Configuration du retour d'informations de l'OAS** : Lorsque l'OAS est active, les différents modes de retour d'informations doivent être détectés et mis en corrélation avec l'analyse. Chaque feedback peut être activé ou désactivé pendant l'essai. Nous avons plusieurs feedbacks :
 - Retours d'informations visuels
 - Feedback audio
 - Retour haptique (vitesse et distance d'activation)

— Retour de la caméra de recul.

Il est important de souligner qu'aucune consigne particulière n'a été donnée aux sujets lors des tests (minimiser les collisions, le temps de parcours, etc.), ils devraient juste réaliser le parcours et répondre aux questions.

B. Matériels et conditions de réalisation des tests

Le protocole des tests cliniques a reçu l'accord du Comité central d'éthique de la recherche de Cambridge, Royaume Uni (réf 20/EE/0007). Compte tenu du fait que les expérimentations ont été réalisées dans un contexte sanitaire délicat lié au COVID-19, les protocoles sanitaires y rattachés ont été respectés ; port de gants, masques, utilisation de désinfectants, gel hydro alcoolique, etc. De plus, cette situation sanitaire nous a empêché de réaliser les tests cliniques initialement prévus. Nous avons donc réalisé les tests avec des étudiants ne présentant aucune situation de handicap. En outre, nous avons implémentés de manière pratique quelques handicaps en équipant ces derniers d'un matériel permettant de les reproduire en conséquence. L'objectif des tests est de pouvoir évaluer l'impact global de l'OAS sur la conduite d'un FRE par un utilisateur.

Les tests ont été réalisés en environnement intérieur dans un circuit décrit par la Fig. 5. L'utilisateur démarre son test au point **Start**, puis, suit le parcours décrit en évitant les obstacles fixes placés de part et d'autre sur son chemin. Nous notons la présence d'une porte sur son trajet.

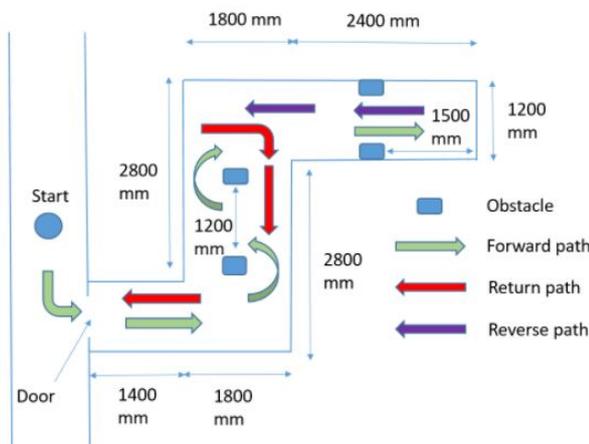


FIGURE 5. Circuit de test

Après une session d'entraînement libre, permettant à l'utilisateur de se familiariser avec l'utilisation du fauteuil, ce dernier a effectué plusieurs fois un parcours prédéfini en changeant les conditions de conduite à chaque itération par l'ajout de matériel permettant de simuler certains handicaps. D'après la caisse nationale de solidarité pour l'autonomie (CNSA), il existe principalement quatre grandes causes de handicap moteur : les lésions de la moelle épinière, les infirmités motrice cérébrale, les maladies neuromusculaires d'origine génétique et les accidents vasculaires cérébraux. Ces maladies entraînant des conséquences en termes de handicap,

peuvent s'accroître au cours de la vie par des déformations pendant la croissance des personnes ou des difficultés majorées par le vieillissement. Nous avons utilisé une attelle pour simuler un **handicap moteur** et les lunettes de vision tunnel pour simuler les **handicaps liés à la vision** (voir la Fig. 6). Sachant qu'un handicap moteur se manifeste par une aptitude limitée à se déplacer, à exécuter des tâches manuelles ou à mouvoir certaines parties du corps, nous avons utilisé les attelles pour simuler au mieux cette limitation de mouvements. Nous reconnaissons qu'une attelle n'est pas suffisante pour simuler l'ensemble des manifestations d'un handicap moteur.



FIGURE 6. Matériel pour simulation de handicap (Vision tunnel et Attelle)

Durant les essais, l'utilisateur a effectué plusieurs fois le parcours prédéfini suivant la liste des scénarios suivant :

- Réalisation du parcours SANS OAS avec attelle,
- Réalisation du parcours SANS OAS avec lunettes,
- Réalisation du parcours AVEC OAS avec attelle,
- Réalisation du parcours AVEC OAS avec lunettes.

Durant la réalisation de chaque scénario, un enregistrement des données a été effectué afin d'être stocké dans une base de données et sur une carte SD. De plus, un observateur extérieur notait toute constatation qu'il jugeait pertinente concernant les événements qui se sont produits durant le test (collisions, temps de parcours, etc.). A l'issue des tests, l'utilisateur remplissait un questionnaire post-essai, lui permettant de nous donner de plus amples informations concernant son ressenti en utilisant l'OAS et son avis sur les perspectives d'amélioration du système.

IV. ANALYSE DES DONNÉES DU SYSTÈME D'ALERTE D'OBSTACLES

Un nombre de neuf personnes au total ont été choisies pour la réalisation des tests. Ces personnes ne présentaient pas de handicap particulier. Toutefois, leur expérience a permis d'avoir une première idée sur l'efficacité ou non de l'OAS. Il convient de souligner que le protocole expérimental a été validé par un comité d'éthique de la recherche, et que les expérimentations ont été menées dans le contexte difficile de la pandémie de COVID. Cela explique sans nul doute pourquoi le nombre de personnes ayant réalisé l'expérimentation n'est pas très élevé, ce qui permet d'estimer des tendances concernant les performances, mais pas de garantir une bonne représentativité au niveau des statistiques.

TABLE I
SYNTHÈSE DES PRÉFÉRENCE DES UTILISATEURS

Personnes	Retour visuel	Camera de recul	Bip Audio	Synthèse vocale	Retour haptic
1	0	0	6	0	6
2	21	28	9	0	5
3	20	25	6	0	14
4	7	9	6	0	4
5	56	56	14	14	26
6	51	51	52	52	50
7	33	36	50	10	59
8	8	10	3	0	0
9	38	37	40	39	40

La note maximale est de 70. Plus elle est élevée, mieux la personne apprécie le dispositif

Des données collectées, il ressort que lorsque les utilisateurs étaient munis d'une attelle et qu'ils utilisaient le fauteuil sans OAS, en moyenne sur 10 fois, ils sont entrés :

- 4,4 fois en collision avec un obstacle contre 2,2 fois avec l'OAS
- 2,2 fois en collision avec un mur contre 0 fois avec l'OAS
- 1,1 fois en collision avec une porte contre 2,2 avec l'OAS

On notera que le parcours contient plus d'obstacles que de portes, ce qui rend cet indicateur moins pertinent. On peut déduire de ces premiers tests que l'OAS réduit le risque de collisions contre les murs et les obstacles mais qu'il n'aide pas particulièrement au franchissement des portes. Il ressort que l'OAS diminue le nombre de collisions en cas de retour visuel, sonore ou haptique dans le cas des déficiences visuelles ou moteurs. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'avec les retours multiples (visuel, sonore ou haptique), le système d'alerte vient aider le conducteur en augmentant son niveau de vigilance. On remarque également que les utilisateurs prennent légèrement plus de temps pour réaliser le parcours lorsqu'ils utilisent l'OAS.

Dans un deuxième temps, les utilisateurs ont été munis de lunette à vision tunnel pour simuler un handicap visuel. Lorsqu'ils utilisaient le fauteuil sans OAS, en moyenne sur 10 tests, ils sont entrés :

- 16,7 fois en collision avec obstacle contre 8,9 fois en utilisant l'OAS
- 1,1 fois en collision avec un mur contre 2,2 fois en utilisant l'OAS
- 2,2 fois en collision avec une porte, pareille avec l'OAS.

On peut déduire de ces tests que l'OAS semble être particulièrement efficace pour éviter les obstacles lorsque l'on a un handicap visuel. En revanche l'OAS ne semble pas être d'une grande aide au franchissement des portes et ne permet pas d'éviter les collisions avec un mur.

Le tableau I présente la synthèse des préférences des utilisateurs sur les différents équipements additionnels ajoutés sur

le fauteuil au travers de l'OAS. Dans ce tableau, force est de constater que la majeure partie des utilisateurs ont manifesté de l'intérêt pour les options relatives au retour visuel, à la camera de recul et au retour haptique. Les options relatives aux signaux sonores (bip et synthèse vocale) ayant été très peu désirées lors de l'expérience utilisateur. Ceci s'expliquerait probablement par l'aisance à utiliser les organes de sens concernés pour des prises de décision.

En définitive, les résultats de ces tests montrent l'efficacité relative de l'OAS mais ils sont encourageants. D'après les réponses aux questionnaires donnés en amont et aval des tests, les utilisateurs déclarent être plus en confiance lorsqu'ils sont sur un fauteuil équipé de l'OAS. De plus, ces tests ont permis de voir les préférences des utilisateurs parmi les différents feedbacks disponibles sur le fauteuil. Le moyen qui a été le plus apprécié par l'ensemble des utilisateurs c'est la caméra de recul. Similaire à celle que l'on retrouve sur les voitures, elle s'allume lorsque l'utilisateur fait une marche arrière et permet de voir ce qu'il y a derrière. Enfin le buzzer de la tablette a également été très apprécié des utilisateurs. Ils leur permettent de se concentrer sur leurs directions tout en étant prévenus à l'approche d'un obstacle.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une application d'alerte sur obstacles visant à améliorer l'autonomie des personnes utilisant un fauteuil roulant. Une analyse des données collectées lors des essais réalisés permet d'évaluer l'efficacité de la solution proposée et envisager de nouveaux axes d'améliorations. Les premiers tests ont démontré la facilité d'utilisation et l'efficacité relative du système d'aide.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Poletti, "Rapport sur les apports de la science et de la technologie à la compensation du handicap," *Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques, Rapport d'information Assemblée Nationale*, no. 1010, 2008.
- [2] Y. Duroc and S. Tedjini, "La rfid au service de l'autonomie et du handicap," in *Handicap 2014*, 2014.

- [3] S. Ferrer, A.-M. Kokosy, J.-M. Capron, M. G. Pepper, M. Henderson, S. W. Kelly, and M. Gillham, "Système universel à bas coût d'aide à la conduite d'un fauteuil roulant électrique," 2014.
- [4] Y. Morère, C. Fritsch, S. Remy, B. M. de Noordhout, and G. Bourhis, "Simulateur de conduite en fauteuil électrique : application à des personnes atteintes de sclérose en plaques," in *Handicap 2014 8^{ème} Edition Paris, 11-13 juin 2014 «Les technologies d'assistance : de la compensation à l'autonomie»*, 2014.
- [5] M.-E. Bobillier-Chaumon, B. Cuvillier, C. Durif-Bruckert, F. Cros, M. Vanhille, and S. Bekkadjia, "Concevoir une technologie ambiante pour le maintien à domicile : une démarche prospective par la prise en compte des systèmes d'activité," *Le travail humain*, vol. 77, no. 1, pp. 39–62, 2014.
- [6] C. Moget, N. Bonnardel, and É. Galy, "Ergonomie prospective et âge : proposition de méthodes nouvelles pour la conception d'un système de maintien à domicile," *Le travail humain*, vol. 77, no. 3, pp. 231–255, 2014.
- [7] J. Fu, W. Hao, T. White, Y. Yan, M. Jones, and Y.-K. Jan, "Capturing and analyzing wheelchair maneuvering patterns with mobile cloud computing," in *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2013, pp. 2419–2422.
- [8] J. Fu, M. Jones, T. Liu, W. Hao, Y. Yan, G. Qian, and Y.-K. Jan, "A novel mobile-cloud system for capturing and analyzing wheelchair maneuvering data : A pilot study," *Assistive Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 105–114, 2016.
- [9] A. Kipf, W. Brunette, J. Kellerstrass, M. Podolsky, J. Rosa, M. Sundt, D. Wilson, G. Borriello, E. Brewer, and E. Thomas, "A proposed integrated data collection, analysis and sharing platform for impact evaluation," *Development Engineering*, vol. 1, pp. 36–44, 2016.
- [10] J. Schobel, R. Pryss, and M. Reichert, "Using smart mobile devices for collecting structured data in clinical trials : Results from a large-scale case study," in *2015 IEEE 28th International Symposium on Computer-Based Medical Systems*. IEEE, 2015, pp. 13–18.
- [11] A. Kokosy, P. Saey, G. Tagne, A. Oukhrif, T. Degallaix, M. Troch, D. De Schuyter, and A. Verhoeven, "Open and configurable heterogeneous data recording device for clinical trials," 2020.
- [12] S. P. Parikh, V. Grassi, V. Kumar, and J. J. Okamoto, "Usability study of a control framework for an intelligent wheelchair," in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2005, pp. 4745–4750.
- [13] C. Urdiales, B. Fernandez-Espejo, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone, "Biometrically modulated collaborative control for an assistive wheelchair," *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 398–408, 2010.

Session 3 : Interactions Humain-Machine

Président de session : Pierre Pino

Le Leap Motion Controller : de la souris gestuelle à la commande gestuelle

Deux études de faisabilité

Jean-Marc Vannobel¹, Marie-Hélène Bekaert¹, Jean Baumann¹

¹Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 CRISAL,
F-59000 Lille, France
jean-marc.vannobel@univ-lille.fr

Résumé—Le Leap Motion Controller, petit périphérique de capture des mouvements de la main, a depuis son apparition sur le marché en 2013 fait l'objet de nombreuses études en particulier dans le domaine du handicap, du diagnostic ou de la rééducation fonctionnelle. Cet article présente deux études préliminaires sur l'utilisation de ce périphérique comme souris gestuelle puis comme commande gestuelle. Si le Leap Motion Controller se montre simple à mettre en œuvre, son manque de précision dans certaines configurations de geste et de fiabilité (données aberrantes) est certes un frein mais qui pourrait être levé dans le cadre d'une interaction multimodale.

Mots-clés—Technologie d'assistance, Souris gestuelle, Communication gestuelle, Leap Motion, Réseaux de Neurones Convolutifs.

I. Introduction

Si l'interaction entre l'humain et la machine se fait aujourd'hui communément au travers d'une interface utilisateur graphique (GUI) et de dispositifs de saisie (clavier) et de pointage (souris), l'arrivée du *smartphone* a permis de démocratiser un autre mode d'interaction certes toujours constitué d'une GUI mais directement pilotée à l'aide d'un stylet ou des doigts via un écran tactile [1]. Comparativement à la souris dont les qualités sont indéniables mais qui ne va pas sans poser de problèmes d'utilisation et qui peut même être utilisée sans faire appel aux boutons [2], une interaction tactile permet de réaliser facilement du scrolling en continu, une action de zoom et même de dessiner de façon plus naturelle.

Les interfaces sans contact constituent encore un autre mode d'interaction possible avec la machine. Dans le cadre de la domotique ou d'applications à destination des personnes âgées, des personnes en situation de handicap ou non habituées à l'ordinateur, pour des questions d'hygiène ou encore de sécurité sinon de communication au travers d'une langue naturelle, il est possible aujourd'hui de piloter un dispositif par le regard [3], par la voix [4] ou par le geste [5] [6].

Dans cet article, nous nous focalisons exclusivement sur l'interaction gestuelle, et plus particulièrement sur l'utilisation d'un dispositif de capture des mouvements de la main, le Leap Motion Controller (LMC). Après une première partie

consacrée à la présentation du LMC, nous proposons un rapide survol des utilisations référencées du LMC comme technologie d'assistance puis nous présentons deux études de faisabilité en vue de réaliser une interaction humain-machine gestuelle. Ces études ont été réalisées dans un environnement MS Windows à l'occasion d'un stage d'initiation à la recherche.

Devant les difficultés parfois rencontrées par certaines personnes (très jeunes, âgées ou en situation de handicap) à utiliser la souris de l'ordinateur, la première étude envisage la possibilité d'utiliser un LMC sur un ordinateur de type PC en remplacement de celle-ci. L'objectif est de permettre une interaction humain-machine plus naturelle. Un deuxième élément de notre cahier des charges, logiciel cette fois-ci, est de permettre une intégration facile du Leap Motion Controller dans l'environnement MS Windows, transparente vis-à-vis des logiciels utilisés.

Lors de notre deuxième étude, nous avons évalué la faisabilité d'utiliser le LMC en tant que périphérique de capture de gestes significatifs et ceci à des fins d'assistance à la personne.

II. Le Leap Motion Controller

A. Description

Proposé par Ultraleap [7], le LMC est un périphérique de capture des mouvements des mains que l'on trouve habituellement dans des environnements de Réalité Virtuelle [8]. Son intérêt principal réside dans sa capacité à proposer un traitement de l'information interne au boîtier qui renvoie à l'ordinateur un ensemble d'informations caractérisant les mains (orientation, coordonnées de la paume et des articulations...). Cela est illustré Fig. 1 et se fait depuis deux caméras infrarouges ($\lambda=850\text{nm}$) identiques intégrées au LMC. Séparées de 40mm selon l'axe x, ces caméras ont une définition de 640x240 pixels et prennent des vues en stéréovision de la scène d'intérêt à une fréquence paramétrable de 20 à 200 images par seconde, une scène qui se profile comme une pyramide inversée de 140x120° (Fig. 2).

Le LMC se connecte par USB au système de traitement qui pourra fonctionner sous Windows 7+, Mac OS X 10.7+ et

Linux (Ubuntu 12). Des kits de développement [9] permettent d'exploiter le potentiel du LEAP Motion Controller dans différents langages de programmation et en particulier le C++ pour la version 4 du SDK. Enfin, le LMC est également compatible avec les environnements 3D Unreal Engine et Unity.



Fig. 1. Dispositif de capture des mains Leap Motion et rendu graphique des points d'intérêt (d'après ultraleap.com).

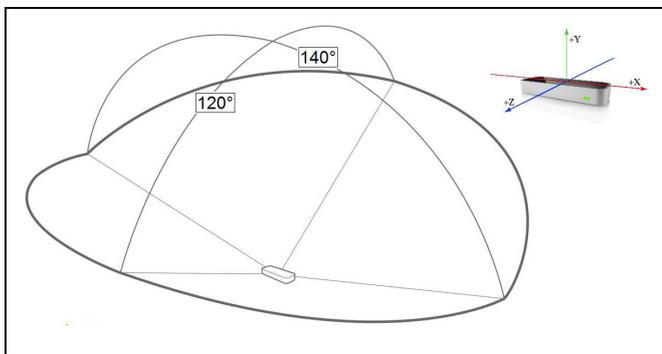


Fig. 2. Champ de mesure du LMC de 140° selon l'axe x et de 120° selon l'axe z (d'après ultraleap.com)

B. Robustesse : faiblesses et limitations du LEAP Motion Controller

Tout comme le Kinect de Microsoft qui n'est plus commercialisé, le LMC d'Ultraleap permet de détecter les mouvements des mains [10]. Une première limitation que l'on peut évoquer est que le Kinect permettait de faire des détections à l'intérieur d'une pièce quand le LMC ne dispose d'une distance de détection que de quelques dizaines de centimètres mais cela avec une précision 200 fois plus élevée.

Si de prime abord le LMC semble bien adapté à une interaction en langue des signes [11], [12], dans [13] Potter *et al.* ont pointé les faiblesses et limitations du LMC pour une telle utilisation car malgré une résolution du capteur inférieure à 1mm telle qu'annoncée par le constructeur, les auteurs insistent sur l'imprécision et le manque de fiabilité des mesures. A la décharge d'Ultraleap, contrairement aux informations fournies par les gants de données (*datagloves*) au prix d'une instrumentation de la main de l'utilisateur et d'une perte de liberté de mouvement [14], le LMC reconstruit les données de la main uniquement à partir des images capturées par ses caméras. Une imprécision inhérente aux algorithmes

de traitement d'image mis en œuvre et aux hypothèses de calcul apparaît donc.

Lors de la prise en main du matériel, nous avons à notre tour et comme Potter *et al.* [13], assez rapidement pu observer l'imprécision de la position renvoyée pour l'extrémité des doigts. De façon plus gênante en présence d'un expérimentateur pianiste confirmé et capable de réaliser une indépendance de mouvement de l'index, du majeur et de l'annulaire, nous avons constaté que les algorithmes d'Ultraleap ne respectaient pas la configuration manuelle réelle et qu'ils s'imposaient une dépendance de mouvement de ces trois doigts. Déjà en 2013, Silva *et al.* [15] indiquaient dans leur étude qu'en demandant une précision de la main particulière, le piano n'était peut-être pas l'instrument idéal pour être simulé avec un seul capteur LMC. Avec notre signeur pianiste, nous avons mené quatre campagnes de flexion de l'un de ces doigts indépendamment des autres afin d'obtenir nos propres données d'observation. La Fig. 3 illustre l'une de ces campagnes. Partant d'une position initiale où la main droite est orientée horizontalement au dessus du capteur doigts tendus (altitude 0 attribuée au barycentre de la paume), nous avons tour à tour individuellement et dans cet ordre, fléchi l'index, puis le majeur et enfin l'annulaire, les autres doigts restant tendus. On observe sur la Fig. 3 que des flexions parasites sont effectivement renvoyées par le LMC. Lors de la flexion de l'index, on constate surtout une information parasite renvoyée pour le majeur et dans une moindre mesure pour l'annulaire. Lors de la flexion du majeur, c'est surtout pour l'index que l'on constate une information erronée. Lors de la flexion de l'annulaire, une fausse flexion du majeur est constatée.

À la suite de ce constat, il a été décidé de ne pas utiliser de configuration manuelle impliquant plus d'un doigt à la fois, exception faite du pouce.

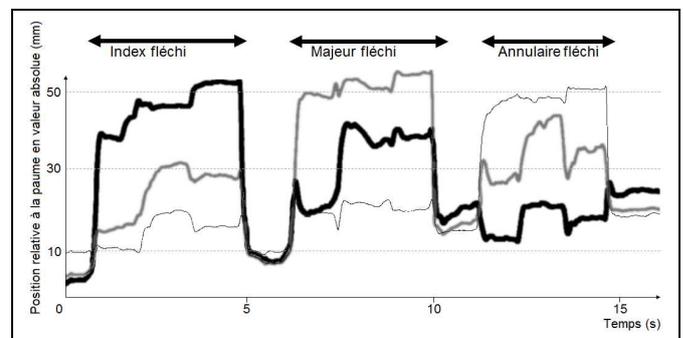


Fig. 3. Relevé dynamique en valeur absolue de la position verticale à la paume (mm) des extrémités de l'index (en gras), du majeur (en gris et en gras) et de l'annulaire (trait fin)

III. Le LMC, comme technologie d'assistance

Le Leap Motion Controller peut s'intégrer facilement dans des systèmes de réalité virtuelle pour le suivi de la main ou pour faciliter l'interaction immersive [16], [17]. Alimanova *et al.* décrivent un jeu de rééducation de la main pour développer

le tonus musculaire et augmenter la précision des gestes (ramasser et déplacer des objets ménagers, faire correspondre des blocs de couleur, jeter les ordures...) [18]. Taylor *et al.* misent sur le potentiel du LMC pour augmenter la motivation et l'implication des jeunes adultes, habitués des jeux vidéo, dans la rééducation de la main après un traumatisme [19]. Ce que confirme l'étude menée par Tarakci *et al.* sur 103 patients entraînés sur 2 jeux interfacés avec le LMC et qui présente ce type de jeu comme une option de traitement alternative efficace chez les enfants et les adolescents ayant un handicap physique [20]. Cortés-Pérez *et al.* concluent à l'utilité et à l'efficacité du LMC comme dispositif de réalité virtuelle haptique pour améliorer différents aspects de la fonction motrice des membres supérieurs chez les patients atteints de maladies du système nerveux central [21].

En dehors du jeu, le Leap Motion Controller a également été utilisé comme outil d'évaluation et d'analyse du mouvement des mains pour différentes pathologies. Un algorithme de reconnaissance des gestes de la main dédié au suivi des sept gestes pour la rééducation résidentielle des patients post-AVC a été développé par Li *et al.* [22]. Chez Chopuk *et al.*, le LMC a été utilisé pour mesurer les angles des articulations afin d'évaluer un mouvement anormal du doigt (doigt déclencheur) [23]. Quatre postures y ont été évaluées (une flexion de l'articulation IP du pouce, une position neutre de l'articulation PIP du doigt, une flexion de l'articulation MP du doigt, une abduction radiale du pouce).

Deux études menées par Butt *et al.* ont inclu des patients parkinsoniens (PwPD, Patient with Parkinson Disease) [24], [25]. Dans la première, les auteurs ont étudié le potentiel du LMC dans l'évaluation du dysfonctionnement moteur des patients et ont conclu à un potentiel modéré. La seconde étude réalisée a visé une classification objective et automatique de la maladie de Parkinson avec le LMC. Les résultats ont révélé que le système ne renvoyait pas de données cliniquement significatives pour mesurer le tremblement postural chez les PwPD, qu'il présente un potentiel limité pour mesurer la pronation/supination de l'avant-bras mais une signification statistique et clinique pour le tapotement des doigts et l'ouverture/fermeture de la main. Coton *et al.* ne préconisent pas l'utilisation du LMC dans l'analyse du mouvement des doigts (pour l'item 18 de la Mesure de la Fonction Motrice) par manque de robustesse et de précision [26].

Dans [27], G. Colombini *et al.* ont passé en revue 19 études ayant évalué objectivement l'apport du LMC dans 4 domaines psychologiques spécifiques (le trouble du spectre autistique, le trouble déficitaire de l'attention/hyperactivité, la démence et les troubles cognitifs légers). Le LMC a également été utilisé avec succès dans des séances de musicothérapie [28]. Le système proposé capture le geste de l'utilisateur via un LMC et les signaux ainsi générés sont envoyés à un outil logiciel qui convertit les mouvements en notes de musique.

Du geste manuel à la parole, de nombreuses études utilisant le LMC pour reconnaître les mouvements des doigts et de la main afin de retranscrire en texte ou en parole la langue des signes ont été listées par Galván-Ruiz *et al.* [29]. La formation du signeur est un facteur clé dans le processus de reconnaissance du signe et l'ordre dans lequel les mouvements

de signe sont effectués affecte la précision [30] (American Sign Language). Le LMC a aussi été utilisé pour la reconnaissance d'autres langues des signes [31] (Arabic Sign Language), [32] (Chinese Sign Language), [33] (Indian Sign Language). En complément de la parole, Škraba *et al.* ont utilisé le LMC pour le pilotage d'un fauteuil roulant [34].

IV. Etude 1: La souris gestuelle

A. Introduction

Comme évoqué précédemment, les fonctions attendues d'une souris gestuelle sont le survol de l'écran, le pointage, la navigation dans les menus de logiciels et toutes les activités où l'usage de la souris est inadapté. La fonction choisie pour illustrer notre propos est le dessin dans Paint mais nous aurions tout aussi bien pu générer une signature manuelle dans Acrobat.

Les caractéristiques de notre souris gestuelle doivent permettre un déplacement dans l'espace en 2D associé au déplacement du curseur de la souris dans une IHM et la définition d'un geste symbolique du « clic ». Nous nous sommes inspirés des nombreux travaux disponibles dans la littérature pour en reproduire certains éléments [35], [36], [37], [38].

B. Méthodologie

Nous avons retenu les coordonnées renvoyées dans le plan (xOy) (voir illustration Fig. 2) pour déplacer le curseur de la souris à l'écran. Si des essais ont d'abord été menés sur les coordonnées de l'index droit, nous avons finalement retenu les valeurs renvoyées par le LMC pour la paume droite après normalisation dans le plan de coordonnées de l'écran. Ce choix a été fait pour éviter des déplacements parasites du curseur de la souris alors que l'index et plus particulièrement le pincement pouce/index ont permis par la suite de matérialiser le clic gauche de la souris. L'axe z a servi pour simuler l'équivalent des « mouvements en l'air » du périphérique souris en vue de repositionner la main du signeur dans l'espace.

Une dernière manipulation nous a permis de réaliser un *multi-touch* gestuel destiné dans notre étude à redimensionner la fenêtre active à l'écran. Nous avons souhaité ici faire appel aux deux mains. Une fois le curseur de la souris positionné sur l'icône de redimensionnement, le clic souris est déclenché par le pincement du pouce et de l'index de la main secondaire. Le redimensionnement se faisant alors par simple déplacement du curseur de la souris à l'aide de la main droite.

Les deux possibilités de clic, main droite et main gauche, pourraient ainsi matérialiser les deux boutons d'une souris afin de compléter ce dispositif d'interaction « souris gestuelle ».

C. Mise en oeuvre pratique

Notre développement informatique a été réalisé à partir d'un programme d'exemple fournis par Ultraleap ainsi qu'à l'aide des API Windows de contrôle de la souris et de la structure de données `INPUT_MOUSE`. Le fonctionnement de base de l'exécutable que nous générons est de type événementiel et fait pour cela appel à des fonctions *Callback* fournies par Ultraleap. Cet exécutable s'utilise comme un

driver de souris qui permet au LMC de venir se substituer à cette dernière.

D. Résultats

Les essais ont été réalisés dans le logiciel de dessin Paint. Il a été nécessaire de filtrer les données renvoyées par le LMC. Un filtrage passe bas du flux de coordonnées sur une fenêtre glissante d'environ 15 mesures a permis de résoudre le bruit d'imprécision qui se manifestait par des tremblements parasites du curseur à l'écran (Fig. 4 gauche et droite). Comme le LMC renvoie parfois de façon erronée les coordonnées d'une « main fantôme » située en arrière-plan (Fig. 4, centre), il a aussi été nécessaire de les éliminer.

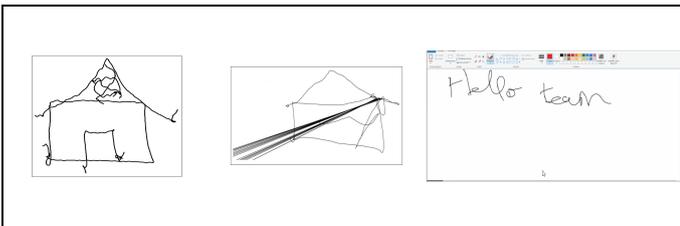


Fig. 4. Dessin dans Paint, de gauche à droite : coordonnées non filtrées, présence d'une main fantôme, coordonnées filtrées.

v. Etude 2 : geste communicant

A. Introduction

Considérer le LMC comme une simple souris gestuelle est très réducteur au regard des possibilités offertes tant par le périphérique que par une langue des signes.

La deuxième étude que nous proposons explore le pilotage d'un dispositif externe par une commande gestuelle basée sur une succession de gestes de base devenus des mots. Il n'est pas nécessaire, pour une activité de ce type, de disposer d'une modélisation aussi poussée du geste communicatif que celle rencontrée en LSF par exemple [39]. Le langage mis en œuvre tout comme la notion de grammaire sous-jacente restent très primitifs.

L'objectif visé est de permettre à une personne en situation de handicap de saisir des commandes gestuelles pour piloter un dispositif d'assistance.

B. Méthodologie de reconnaissance des formes

La problématique est ici bien différente de celle rencontrée dans le cas de la souris gestuelle. Un ordre de commande est constitué d'un clap de début, d'une suite de signes constitués de trajectoires à reconnaître individuellement et séparés d'un clap et un geste final de validation. La principale difficulté de l'opération consiste à reconnaître les signes. Nous avons pour cela fait appel à deux méthodes radicalement différentes et que nous détaillons ci-après.

C. Reconnaissance par critères géométriques

La classification par critères géométriques que nous avons mise en œuvre est une implémentation de la méthode décrite par Jorge *et al.* [40]. Elle consiste à extraire de la trajectoire du signe des critères tels que le périmètre et l'aire de son enveloppe convexe (EC) comme illustré sur la Fig. 5. D'autres critères pourraient être utilisés comme le périmètre et l'aire du

triangle de surface maximale (TSM) inscrit dans l'enveloppe convexe tel que proposé par Dobkin et Snyder [41] ou la longueur du tracé. La Fig. 6 illustre la reconnaissance par critères géométriques de trois signes distincts : une ligne et un triangle pour constituer un alphabet de base et une rature pour manifester le souhait de supprimer le dernier geste accompli.

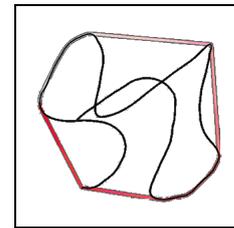


Fig. 5. Enveloppe convexe (EC) d'un tracé géométrique.

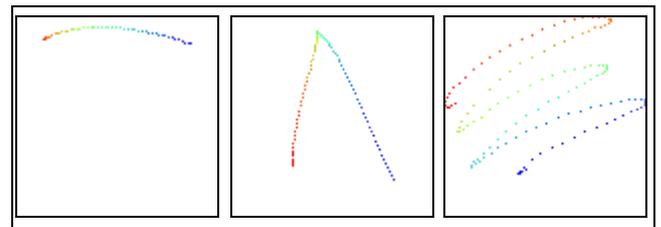


Fig. 6. Alphabet gestuel, de gauche à droite : ligne, triangle, rature.

D. Reconnaissance par Réseau de Neurons Convolutif

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont des réseaux de neurones dont le modèle s'inspire du cortex visuel des animaux vertébrés et qui s'appuient sur un empilage multicouche de perceptrons monocouches. Un CNN se distingue totalement d'un perceptron multicouche (MLP) puisque le nombre de connexions entre un neurone et ses voisins des couches adjacentes y est très réduit contrairement à ce qu'il se passe dans un MLP, réduisant ainsi drastiquement la complexité du réseau et le temps d'apprentissage. Les CNN sont généralement utilisés pour réaliser la reconnaissance d'images [42] mais aussi en traitement du langage naturel [43] où les entrées du CNN sont des mots et non plus des pixels [44]. Nous avons donc modifié le programme de contrôle du curseur de la souris pour générer des images des trajectoires dessinées à l'écran. Le réseau de neurones convolutif que nous avons implémenté a été créé autour des systèmes d'apprentissage automatique *Tensorflow* de Google [45] et *Keras* [46] d'après l'exemple fourni dans [47] et a été entraîné sur trois gestes, les mêmes que ceux de la méthode géométrique. L'ensemble de données utilisé contenait environ 60 images pour chacune de ces 3 classes.

E. Résultats, comparaison des méthodes de reconnaissance

La reconnaissance de formes sur critères géométriques est très rapide (quelques millisecondes) mais présente un désavantage, elle est peu flexible. En effet, l'utilisateur doit dessiner des formes géométriques proches de ce qui est attendu, sans quoi la forme n'est pas reconnue voire peut être confondue avec une autre. Il est possible de rendre le système plus tolérant à ce niveau mais cela augmente le risque de confusion. En pratique, il n'est pas simple d'arriver à dessiner correctement les signes pour qu'ils soient reconnus. Une autre limite est que pour ajouter un nouvel élément dans l'alphabet,

et donc une nouvelle forme, il faut trouver des critères spécifiques qui la caractérisent.

La reconnaissance de formes par réseau de neurones convolutif corrige les deux principaux inconvénients de la méthode géométrique :

- Le système peut s'adapter à l'utilisateur en mettant à jour son ensemble de données au fur et à mesure de l'utilisation. Ainsi, si l'utilisateur trouve une posture pour signer plus confortable, le modèle le suivra petit à petit,
- Il est facile d'ajouter un nouveau mot, sous réserve de créer un ensemble d'exemples d'apprentissage suffisamment fourni pour entraîner correctement le modèle, ce qui est coûteux en temps de mise en œuvre.

Cette méthode a pour désavantage d'être bien moins fiable que la précédente pour des raisons liées ici au modèle et non pas à l'utilisateur, et nécessite une base de données toujours plus conséquente à chaque geste ajouté.

VI. Conclusion et perspectives

En nous appuyant sur les exemples fournis par Ultraleap (*imagesample.c* notamment) et les API de Windows, nous avons montré que le maniement d'un logiciel grand public comme « Paint » par exemple pouvait se faire uniquement à l'aide d'un système générique d'interaction gestuelle venant se substituer à la souris de l'ordinateur. Totalement indépendante de l'application finale et facile à installer, cette interface peut représenter un mode de communication alternatif à la souris pour des personnes rencontrant des difficultés avec son maniement ou simplement pour des questions d'hygiène. Il ne faut cependant pas perdre de vue que même si une interaction gestuelle semble de, prime abord, plus naturelle que le maniement d'une souris, un périphérique de capture d'information se doit d'être adapté à ce que l'on souhaite faire et l'on ne peut pas le considérer indistinctement de l'IHM du logiciel dont on fait l'usage. Un clavier est adapté à la saisie de caractères alphanumériques, une souris permet de naviguer précisément dans des menus, le contenu d'un document texte ou d'un tableur mais l'est beaucoup moins pour écrire à la main ou dessiner à l'écran. Une tablette numérique et un stylet seraient pour cela bien plus indiqués.

On pourrait alors imaginer aller bien plus loin que le simple remplacement d'un périphérique existant et réaliser une véritable interface gestuelle conçue pour un langage naturel et donnant par conséquent accès à des gestes signifiants. Dans cette perspective, nous avons lors d'une deuxième étude proposé les éléments d'une interaction gestuelle faite sur la base d'un alphabet réduit à quelques signes « simples » exécutés dans un plan, signes dont l'assemblage permettrait de créer des ordres ou des commandes destinés à des machines d'assistance à la personne. Parmi les applications envisageables, nous pourrions citer par exemple la conduite de fauteuil roulant ou encore une insertion professionnelle facilitée des personnes en situation de handicap dans un environnement de Réalité Augmentée ou Virtuelle sinon de collaboration humain-robot [48].

Un dernier point important que nous avons observé durant nos essais pratiques concerne l'espace ou le plan d'exécution de la communication gestuelle. D'un point de vue espace et confort d'utilisation, faire appel au capteur IR 170 [49] du même constructeur et qui couvre une région de 170x170° serait beaucoup moins contraignant. En effet, avec une région de 140x120° pour le LMC, il n'est pas aisé de rester dans le champ des caméras. L'IR 170 coûte cependant plus du double du prix du LMC et n'est pas fourni dans un boîtier hermétique, ce qui peut représenter des freins à son développement. Quant à la communication gestuelle en elle-même, si elle s'avère a priori plus naturelle, son aspect contraint engendre rapidement une fatigabilité importante au niveau du bras. Une solution pourrait être apportée en faisant par exemple reposer le poignet sur une surface plane transparente comme suggéré dans [26].

Remerciements

Les travaux présentés ont été réalisés par Jean Baumann, élève ingénieur en 4^e année à Polytech Lille dans la spécialité « Systèmes Embarqués », dans le cadre d'un stage d'initiation à la recherche d'une durée de 10 semaines effectué au Laboratoire CRISAL.

References

- [1] A. Martinet, "Etude de l'influence de la séparation des degrés de liberté pour la manipulation 3-D à l'aide de surfaces tactiles multipoints," Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Lille1, Fr, 2011.
- [2] J.-P. Deblonde, "Exploitation de la dynamique du geste en IHM. Application aux fonctions de transfert pour le pointage et l'extraction d'événements discrets," Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Lille1, Fr, 2012.
- [3] J. Qinjie, "Utilisation de l'eye-tracking pour l'interaction mobile dans un environnement réel augmenté," Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Lyon, Fr, 2019.
- [4] M.B. Hoy, "Alexa, Siri, Cortana, and More: An Introduction to Voice Assistants," *Medical Reference Services Quarterly*, vol. 37(1), pp. 81-88, 2018.
- [5] K. Małeck, A. Nowosielski and M. Kowalicki, "Gesture-Based User Interface for Vehicle On-Board System: A Questionnaire and Research Approach," *Applied Sciences* 10, n°18:6620, 2020.
- [6] V. Belissen, "Sign Recognition to Automatic Sign Language Understanding : Addressing the Non-Conventionalized Units," Thèse de Doctorat en Vision Artificielle et Reconnaissance des Formes, Université Paris-Saclay, Fr, 2020.
- [7] <https://www.ultraleap.com>
- [8] P. Wozniak, O. Vauderwange, A. Mandal, N. Javahiraly and D. Curticapean, "Possible applications of the LEAP motion controller for more interactive simulated experiments in augmented or virtual reality," *SPIE Proceedings*, vol. 9946, pp: 234-245, September 2016.
- [9] <https://www.ultraleap.com/developers/>
- [10] G. Marin, F. Dominio and P. Zanuttigh, "Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices," *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 1565-1569, October 2014.
- [11] A. Borysova, "Leap Motion Controller for sign language recognition: A review of the literature," 2017.
- [12] J. Galván-Ruiz and al., "Perspective and Evolution of Gesture Recognition for Sign Language: A Review," *Sensors* 2020, vol. 20(12):3571, 2020.

- [13] L. E. Potter, J. Araullo and L. Carter, "The leap motion controller: A view on sign language," in 25th Australian Computer-Human Interaction Conference: Augmentation, Application, Innovation, Collaboration, (OzCHI 2013), pp. 175–178, November 2013.
- [14] H. Gunawardane and N. T. Medagedara, "Comparison of hand gesture inputs of leap motion controller & data glove in to a soft finger," IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), pp. 62-68, October 2017.
- [15] E.S. Silva, J. Abreu, J.H. Almeida, V. Teichrieb and G. Ramalho, "A Preliminary Evaluation of the Leap Motion Sensor as Controller of New Digital Musical Instruments," 2013.
- [16] S. Scheggi, L. Meli, C. Pacchierotti and D. Prattichizzo, "Touch the virtual reality: using the leap motion controller for hand tracking and wearable tactile devices for immersive haptic rendering," ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Posters (SIGGRAPH'15), Article 31, pp. 1, July 2015.
- [17] E. Gusai, C. Bassano, F. Solari and M. Chessa, "Interaction in an Immersive Collaborative Virtual Reality Environment: A Comparison Between Leap Motion and HTC Controllers," ICIAP Workshops, 2017.
- [18] M. Alimanova and al., "Gamification of Hand Rehabilitation Process Using Virtual Reality Tools: Using Leap Motion for Hand Rehabilitation," First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), pp. 336-339, April 2017.
- [19] J. Taylor and K. Curran, "Using Leap Motion and Gamification to Facilitate and Encourage Rehabilitation for Hand Injuries: Leap Motion for Rehabilitation," in Handbook of Research on Holistic Perspectives in Gamification for Clinical Practice, D. Novák, B. Tulu, & H. Brendryen, Eds., pp. 183-192.
- [20] E. Tarakci, N. Arman, D. Tarakci and O. Kasapcopur, "Leap Motion Controller-based training for upper extremity rehabilitation in children and adolescents with physical disabilities: A randomized controlled trial," Journal of Hand Therapy, vol. 33(2), pp. 220-228, 2020.
- [21] I. Cortés-Pérez and al., "Leap Motion Controller Video Game-Based Therapy for Upper Extremity Motor Recovery in Patients with Central Nervous System Diseases. A Systematic Review with Meta-Analysis," Sensors 2021, vol. 21(6):2065, 2021.
- [22] W. Li, C. Hsieh, L. Lin and W. Chu, "Hand gesture recognition for post-stroke rehabilitation using leap motion," International Conference on Applied System Innovation (ICASI), pp. 386-388, 2017
- [23] P. Chophuk, S. Chumpen, S. Tungjitsukulmun and P. Phasukkit, "Hand postures for evaluating trigger finger using leap motion controller," 8th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), pp. 1-4, 2015.
- [24] A.H. Butt and al., "Leap motion evaluation for assessment of upper limb motor skills in Parkinson's disease," IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 116-121, July 2017.
- [25] A.H. Butt and al., "Objective and automatic classification of Parkinson disease with Leap Motion controller," Biomedical Engineering Online, vol. 17(1):168, 12 November 2018.
- [26] J. Coton, J. Veytizou, G. Thomann and F. Villeneuve, "Etude de faisabilité de l'analyse de mouvement de doigts par le capteur Leap Motion," Conférence Handicap 2016-9ème édition, Paris, pp. 75-80, Juin 2016.
- [27] G. Colombini, M. Duradoni, F. Carpi, L. Vagnoli and A. Guazzini, "LEAP Motion Technology and Psychology: A Mini-Review on Hand Movements Sensing for Neurodevelopmental and Neurocognitive Disorders," International Journal of Environmental Reserach and Public Health, vol. 18(8):4006, April 2021.
- [28] A. Baratèlia, A. Elia, L.A. Ludovico and E. Oriolo, "The Leap Motion Controller in Clinical Music Therapy - A Computer-based Approach to Intellectual and Motor Disabilities," 10th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2018), pp. 461-469, March 2018.
- [29] J. Galván-Ruiz and al., "Perspective and Evolution of Gesture Recognition for Sign Language: A Review," Sensors 2020, vol. 20(12):3571, 2020.
- [30] L. Quesada, G. López, L.A. Guerrero, "Sign Language Recognition Using Leap Motion," International conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence, pp. 277-288, December 2015.
- [31] M. Deriche, S. O. Aliyu and M. Mohandes, "An Intelligent Arabic Sign Language Recognition System Using a Pair of LMCs With GMM Based Classification," IEEE Sensors Journal, vol. 19(18), pp. 8067-8078, September 2019.
- [32] Y. Xue, S. Gao, H. Sun and W. Qin, "A Chinese Sign Language Recognition System Using Leap Motion," International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV), pp. 180-185, October 2017.
- [33] D. Naglot and M. Kulkarni, "ANN based Indian Sign Language numerals recognition using the leap motion controller," International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), pp. 1-6, August 2016.
- [34] A. Škraba, A. Koložvari, D. Kofjač and R. Stojanović, "Wheelchair maneuvering using leap motion controller and cloud based speech control: Prototype realization," 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), pp. 391-394, 2015.
- [35] D. Bachmann, F. Weichert and G. Rinkenauer, "Evaluation of the leap motion controller as a new contact-free pointing device," Sensors 2014, vol. 15(1), pp. 214-233, December 2014.
- [36] M. C. Bessa Seixas, J. C. S. Cardoso and M. T. G. Dias, "The Leap Motion movement for 2D pointing tasks: Characterisation and comparison to other devices," 5th International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems (PECCS), pp. 15-24, January 2015.
- [37] T. Aswathi and al., "A paradigm of Sixth Sense: Finger Cursor," 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), pp. 1558-1562, 2019.
- [38] J.Y. Tung and al., "Evaluation of a portable markerless finger position capture device: accuracy of the Leap Motion controller in healthy adults," Physiological Measurement, vol. 36(5), pp. 1025–1035, May 2015.
- [39] O. Losson and J.-M. Vannobel, "Sign Language Formal Description and Synthesis," International Journal of Virtual Reality, vol. 3(4), pp. 27-34, 1998.
- [40] J.A. Jorge and M.J. Fonseca, "A Simple Approach to Recognise Geometric Shapes Interactively," Graphics Recognition Recent Advances. GREC 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol 1941, pp. 266-274, 2000.
- [41] D.P. Dobkin and L. Snyder, "On a general method for maximizing and minimizing among certain geometric problems," 20th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FSCS 1979), pp 9-17, October 1979.
- [42] I. Zafar, G. Tzanidou and R. Burton, "Hands-On Convolutional Neural Networks with TensorFlow," Packt Publishing Eds, ePub, August 2018
- [43] Y. Kim, "Convolutional Neural Networks for Sentence Classification," Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2014), pp. 1746–1751, 2014.
- [44] <https://towardsdatascience.com/nlp-with-cnns-a6aa743bdc1e?gif=true>
- [45] <https://github.com/tensorflow/tensorflows>
- [46] <https://github.com/keras-team/keras>
- [47] <https://www.tensorflow.org/tutorials/images/classification?hl=fr>
- [48] G.A. Al, P. Estrela and U. Martinez Hernandez, "Towards an intuitive human-robot interaction based on hand gesture recognition and proximity sensors," IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration, pp. 330-335, September 2020
- [49] <https://www.ultraLeap.com/product/sterEO-ir-170/>

Une nouvelle interface homme-machine pour la rééducation des personnes atteintes de la maladie de Parkinson

Camille Alves^{1,6}, Rodrigo Rosa², Júlia Tannus¹, Luanne Mendes^{2,6}, Isabela Marques^{2,6}, Luiza Luiz², Edgard Júnior³, Fábio Oliveira⁴, Marcus Vieira⁵, Adriano Alves², Guy Bourhis⁶, Pierre Pino⁶, Adriano Andrade², Eduardo Naves¹ and Yann Morère⁶

¹ Laboratory of Assisted Technology (NTA), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

² Center for Innovation and Assessment of Technologies in Health (NIATS), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

³ Computer Graphics Laboratory (CG), Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

⁴ Federal Institute of Education, Science and Technology of Brasília - Brasília Campus (IFB), Brasília, Brazil

⁵ Bioengineering and Biomechanics Laboratory, Federal University of Goiás, Goiânia, Brazil

⁶ Laboratory of Design, Optimization and Modeling of Systems (LCOMS), University of Lorraine, Metz, France

Résumé- Les interfaces homme-machine (IHM) présentent des exigences croissantes en matière de manipulation intuitive et efficace. Dans le cadre de la rééducation de personnes atteintes de la MP, et plus particulièrement du poignet, les solutions actuelles commercialisées basées sur les gants ne correspondent pas pleinement à nos besoins : nombre de mouvements détectables, cout; consommation d'énergie, puissance de calcul. Nous avons donc développé une solution ad hoc et ce travail présente le développement de deux dispositifs portables à faible coût basés sur des unités de mesure inertielle (IMU) et destinés à être utilisés comme interface pour le contrôle d'un jeu sérieux utilisé pour la rééducation du poignet des personnes atteintes de la maladie de Parkinson. Le dispositif doit suivre le mouvement de la main et envoyer ces informations à un ordinateur, exécutant un jeu sérieux, afin de contrôler un objet virtuel. L'appareil utilise des IMU pour estimer l'orientation de la main. Les résultats obtenus en laboratoire sont très prometteurs par rapport au goniomètre (référence standard), et montrent une bonne précision (Erreur d'écart type < 2°) et une exactitude modérée (erreur entre ±5°). En ce sens, nous disposons d'une solution prometteuse pour une interaction homme-machine avancée et peu coûteuse, qui peut bénéficier à des domaines diversifiés, notamment les traitements de réadaptation avec des jeux sérieux.

Mots-clés - réhabilitation, maladie de Parkinson, jeu sérieux, capteur inertiel.

I. INTRODUCTION

La maladie de Parkinson (MP) est une maladie neurodégénérative progressive qui provoque des symptômes neurologiques tels que la bradykinésie, la rigidité et le tremblement. [1]. Les traitements de la MP comportent différentes approches telles que la réadaptation fonctionnelle (par exemple, la physiothérapie), les médicaments et les interventions chirurgicales. La réadaptation peut être considérée comme une aide au traitement pharmacologique et chirurgical de la MP afin de maximiser la capacité fonctionnelle et de minimiser les complications secondaires, pour une meilleure qualité de vie [2].

La réadaptation pour la maladie de Parkinson peut être longue et fatigante, et il est difficile de maintenir la participation du patient aux programmes thérapeutiques. En ce sens, les nouvelles technologies permettent de jouer à des jeux informatiques par le biais d'interfaces naturelles [3]. La technologie, permettant d'améliorer l'expérience de réadaptation, peut apporter des sensations positives en plus de la simple amélioration des performances dans l'exécution des tâches. Ainsi; un jeu sérieux (JS) est un jeu qui peut transmettre un message, des connaissances, des compétences ou un contenu au joueur. En outre, il peut améliorer l'expérience du joueur grâce à différents types d'interaction et dans différents contextes, par exemple la santé, la formation et l'éducation [4].

Les chercheurs travaillent encore sur le traitement de la maladie de Parkinson sur la base de méthodes de traitement personnalisées. Parmi les méthodes physiothérapeutiques, l'utilisation d'appareils d'exercice intelligents est une question essentielle pour les dix prochaines années [5]. Par exemple, un système de réadaptation informatisé, intelligent et innovant basé sur l'utilisation des interfaces homme-machine (IHM) pourra être utilisé pour la réadaptation [6].

À cet égard, il y a une recherche constante de nouvelles interfaces homme-machine (IHM) pour compléter, augmenter ou remplacer les méthodes de contrôle des jeux sérieux, ainsi que la nécessité d'appliquer un contrôle simultané et proportionnel à l'aide de signaux inertiels [7]. En fonction de la réadaptation et des objectifs du jeu sérieux, un autre type d'IHM peut être choisi. Certains appareils commerciaux ont déjà été développés à cet effet, comme le Leap Motion [8]. Cependant, dans des études précédentes, il a montré des problèmes évidents de suivi de la pronation et de la supination de l'avant-bras, ce qui affecte considérablement la précision des angles d'articulation rapportés dans ce plan de mouvement [9].

Bien qu'il existe des capteurs commerciaux prêts à l'emploi avec les jeux sérieux, dans notre contexte spécifique de la rééducation de la MP, il y a certains avantages à développer un

dispositif personnalisé pour capturer le mouvement humain. La première est le coût : les systèmes de jeu commerciaux sont coûteux et développer une IHM dédiée fournissant uniquement les besoins nécessaires est souvent meilleur marché. Une autre raison est qu'avec une technologie propriétaire, il est plus facile d'obtenir un système sans limitations que connaissent les systèmes commerciaux, par exemple : ils n'exigent pas toujours une amplitude de mouvement complète ou peuvent induire une frustration, car les systèmes de jeu peuvent être trop difficiles pour une population qui a besoin de rééducation [10].

Les interfaces homme-machine ont gagné du terrain en tant que commandes de jeux sérieux pour la rééducation. Ghate et. al [11] a également proposé un dispositif de contrôle sous la forme d'un gant. Cependant, comme il s'agit d'un gant fermé, il n'est peut-être pas idéal pour les personnes atteintes de la MP, car il peut être difficile à porter pour la personne. En outre, le dispositif présentait un volume important au niveau du poignet, ce qui ajoutait du poids et nuisait à l'ergonomie de l'articulation.

Dans cet article, nous proposons deux interfaces homme-machine pour mesurer les angles de l'articulation du poignet créés par les mouvements de la main tels que la pronation/supination, l'extension/flexion et l'adduction/abduction. Les mouvements de la main pour l'interaction homme-machine ont été choisis pour un traitement spécifique des personnes atteintes de la maladie de Parkinson et sont basés sur l'échelle d'évaluation unifiée de la maladie de Parkinson (MDS/UPDRS) [12].

II. MATERIAUX ET METHODES

L'IHM est un dispositif portable, développé pour être utilisé par un jeu sérieux pour la rééducation du poignet, qui contrôlera un objet virtuel avec les mouvements de la main. Dans ce contexte, l'IHM utilisée dans ce projet est un gant qui sera utilisé pour obtenir les mouvements du poignet.

Le premier prototype mis en œuvre consiste en un gant, où les capteurs sont placés dans une boîte attachée à ce gant, les contacts pour la main fermée sont réalisés au moyen d'un fil conducteur cousu sur la paume de la main et les doigts, comme on peut le voir sur la figure 1.



Fig. 1. Prototype de gant IHM.

Cependant, cette première version présentait quelques problèmes d'ergonomie, ne s'adaptant pas correctement à tous les types et tailles de mains. De plus, il présentait un poids et un volume importants pour la main de l'utilisateur, ce qui peut rendre difficile l'exécution de certains mouvements. Enfin il y avait aussi des difficultés à nettoyer l'appareil, ce qui est très important surtout en période de pandémie. Dans ce sens, un deuxième prototype a été développé afin de résoudre ces problèmes.

Le deuxième prototype proposé est fixé sur le dos de la main, au moyen d'un bracelet, de sorte que le mouvement de la main est capté par l'IMU. Pour identifier le mouvement de la main fermée, deux capteurs de lumière (LDR) en forme d'anneaux ont été placés sur les doigts. La figure 2 montre la conception du deuxième prototype.

A. Interface homme-machine

Les deux versions de l'IHM développée comportent un microprocesseur (ESP32 dans la première version et ESP8266 dans la seconde) qui communique avec un capteur inertielle (MPU6050) via le protocole I2C. Le capteur inertielle est composé d'un accéléromètre et d'un gyroscope (MPU6050) et d'un magnétomètre (QMC5883L).

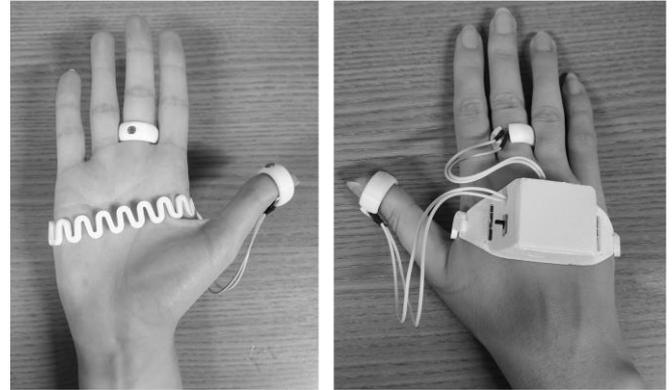


Fig. 2. Prototype de bracelet IHM.

Le MPU6050 possède un accéléromètre à 3 axes et un gyroscope à 3 axes. La fusion des données est traitée par le processeur de mouvement numérique (DMP), chargé de faire des calculs complexes avec les capteurs. Il fusionne les données de l'accéléromètre et du gyroscope afin d'obtenir l'orientation en quadrature. Le magnétomètre (QMC5883L) a été intégré au système pour mettre en œuvre une boussole électronique qui fusionne les valeurs de l'accéléromètre et du magnétomètre pour produire le nord, c'est-à-dire un angle de référence basé sur le champ géomagnétique.

Par conséquent, ce nord est utilisé pour corriger l'erreur dans l'angle estimé autour de l'axe z. La configuration du DMP (sur MPU6050) a été définie avec une sensibilité de $\pm 2g$ (accéléromètre) et $\pm 2000dps$ (gyroscope), un filtre numérique passe-bas de 184Hz (accéléromètre) et 188Hz (gyroscope). Le filtre passe-bas numérique est intrinsèque au DMP et une bande passante plus élevée a été choisie pour cette première approche. La sensibilité du magnétomètre externe est de $\pm 8G$. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 100 Hz.

Les quaternions sont utilisés pour obtenir les angles de tangage et de roulis, et ces informations sont regroupées via le protocole de communication UDP et envoyées de l'IHM vers un ordinateur exécutant le jeu sérieux via une liaison Wi-Fi. La figure 3 montre le schéma complet du système. Les données sont normalisées puis interpolées linéairement. L'interpolation est effectuée pour ajuster les données dans le temps et construire les angles de rotation.

B. Étalonnage

Le dispositif d'acquisition a été fixé sur un cadre, assemblé en laboratoire afin de simuler précisément des rotations. Pour les axes x et y, la rotation était de -90° à +90° et pour l'axe z, la plage de rotation était de -50° à +50°. Ces plages ont été définies sur la base des angles maximaux du poignet dans les mouvements de flexion/extension, supination/pronation et abduction/abduction définis dans la pratique de la goniométrie [13].

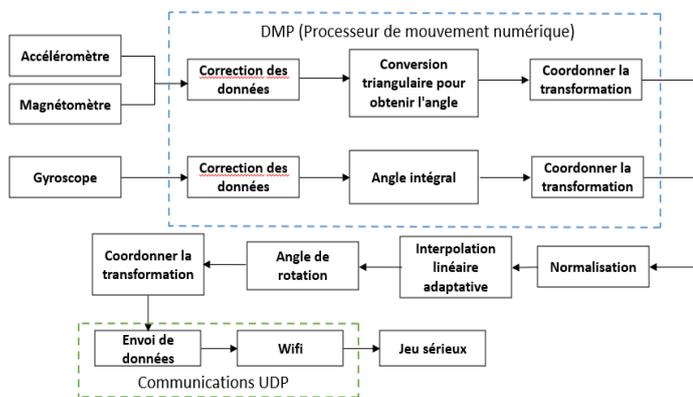


Fig. 3. Schéma du système complet.

Les angles estimés à partir de l'IHM ont ensuite été comparés avec les angles mesurés par un potentiomètre (standard). Une régression linéaire a été effectuée pour ajuster le modèle linéaire et étudier la relation entre les mesures.

C. Validation

Afin de valider notre système d'acquisition, nous avons utilisé une structure de banc d'essai qui faisait pivoter l'IHM dans les axes x, y et z. Cette structure a été assemblée pour obtenir une référence dans les mouvements de rotation. Le banc d'essai expérimental a été réalisé en positionnant le capteur dans un prototype, comme le montre la figure 4, qui comporte un servomoteur avec contrôle de position, responsable de la flexion dynamique. La réponse du capteur a été comparée à celle d'un potentiomètre. Comme il s'agit du même capteur inertiel, la validation a été effectuée une seule fois pour les deux versions de l'IHM.

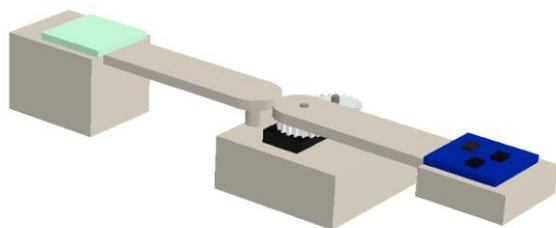


Fig. 4. Banc de test utilisé pour les essais.

Deux tests ont été effectués, l'un pour obtenir l'exactitude et la précision par rapport à une norme et l'autre pour définir les performances du système. Pour le test d'exactitude et de précision, l'IHM a été tournée d'abord autour de l'axe x, puis

autour de l'axe y, et enfin autour de l'axe z. A chaque rotation, le dispositif couvre la plage de -90° à +90° (-50° à +50° pour l'axe z) par pas de 10°.

Dix essais ont été réalisés pour chaque axe, nous avons donc obtenu 190 mesures (scores) pour les axes x et y et 110 mesures pour l'axe z. Les angles mesurés par le système ont été comparés aux angles du potentiomètre. L'erreur (angle du système - angle standard) entre les angles du goniomètre et les angles de l'IHM a été calculée.

D. Jeu sérieux

Outre les essais au banc, les dispositifs proposés ont été utilisés comme interface de contrôle du jeu sérieux ReaBEElitation pour la rééducation du poignet des personnes atteintes de la maladie de Parkinson.

Pour atteindre les objectifs du jeu, l'utilisateur doit contrôler les mouvements d'une abeille dans un environnement en 3D, qui avance en permanence. Les tâches du jeu ont été conçues pour tenir compte des mouvements suivants présents dans l'outil de référence pour l'évaluation des personnes atteintes de la MP (MDS-UPDRS Partie III) : ouverture et fermeture de la main, extension et flexion de la main, adduction et abduction, et supination et pronation du poignet.

La figure 5 montre l'abeille dans les différents scénarios proposés. L'utilisateur peut déplacer l'abeille en fonction des mouvements effectués par la main. Vous pouvez voir la relation de ces mouvements dans le tableau 1.

Le test de Shapiro Wilk a été effectué pour confirmer une distribution normale des données, puis une statistique de distribution de probabilité a été calculée pour déterminer l'exactitude et la précision de l'appareil. Pour les tests de performance, l'IHM a subi des rotations de 0 à +90° (axe x et y) et de 0 à +50° pour l'axe z plus de trente fois pour chaque axe. Le but de ce test était d'évaluer si notre système permet d'enregistrer de manière fiable le mouvement.



Fig. 5. Objet (abeille) à contrôler dans différents scénarios.

TABLE I. MOUVEMENTS DES MAINS ET DES ABEILLES DANS LA SCENE

Mouvement de l'IHM	Mouvement des abeilles
repos	Avance
Extension	en Haut
Flexion	en Bas

Mouvement de l'IHM	Mouvement des abeilles
Abduction	A gauche
Adduction	A droite
mouvement de pince pouce/index	Collecte du nectar
Pronation	Augmente la vitesse des ailes
Supination	Diminue la vitesse des ailes

III. RESULTATS

A. Exactitude et précision

L'analyse des données a été effectuée en langage R. Le test de Shapiro Wilk a confirmé la normalité des données (axe des x : valeur p = 0,1929 ; axe des y : valeur p = 0,5161 ; axe des z : valeur p = 0,3770) à $\alpha = 0,05$. Les erreurs calculées par rapport à la référence standard ont signalé une bonne précision, un écart-type (SD < 2°).

Une distribution de probabilité normale a été calculée. La probabilité d'une erreur égale ou supérieure à +5° ou -5° s'est avérée très faible, pour chaque axe, rapportant une précision (erreur entre ±5°). Le tableau 2 présente la moyenne, l'écart-type et la probabilité des erreurs dans les axes x, y et z.

TABLE II. ERREURS MOYENNES (SD).

Axe	Moyenne (degrés)	SD (degrés)	Prob. d'une erreur de +5°/-5°.
x	0.4295	1.6512	0.0028/0.0005
y	0.2937	1.8234	0.0049/0.0018
z	0.2221	1.9560	0.0073/0.0038

B. Performance

Afin d'observer la répétabilité du capteur, un seuil a été défini en fonction de l'angle maximal atteint au premier cycle de rotation. Pour les axes x et y, un seuil a été fixé à 95% de l'angle maximal et pour l'axe z à 85% (Le seuil était plus petit, puisque l'angle initialement atteint était plus petit.). Ces seuils ont été déterminés en observant le signal. Ainsi, il a été possible d'observer et d'analyser les performances du capteur pendant 30 cycles de rotation dans les trois axes. La figure 6 montre le signal mesuré lorsque l'IHM se déplaçait de 0° à +90° (+50° pour l'axe z) plus de trente fois, pour les axes x, y et z.

Tous les angles en fin de mouvement ont été estimés au-dessus du seuil, de plus, le signal présenté a montré une bonne répétabilité, avec cela on peut observer que le capteur présente de bonnes performances. Pour l'axe z, les performances (seuil à 85%) étaient moins bonnes, du fait de la présence de bruit dans le signal.

C. Jeu sérieux

Après avoir été validé lors d'essais au banc, le dispositif a été appliqué comme organe de commande du jeu sérieux RehaBEElitation. Les deux prototypes de gants ont été capables d'estimer l'orientation de la main.

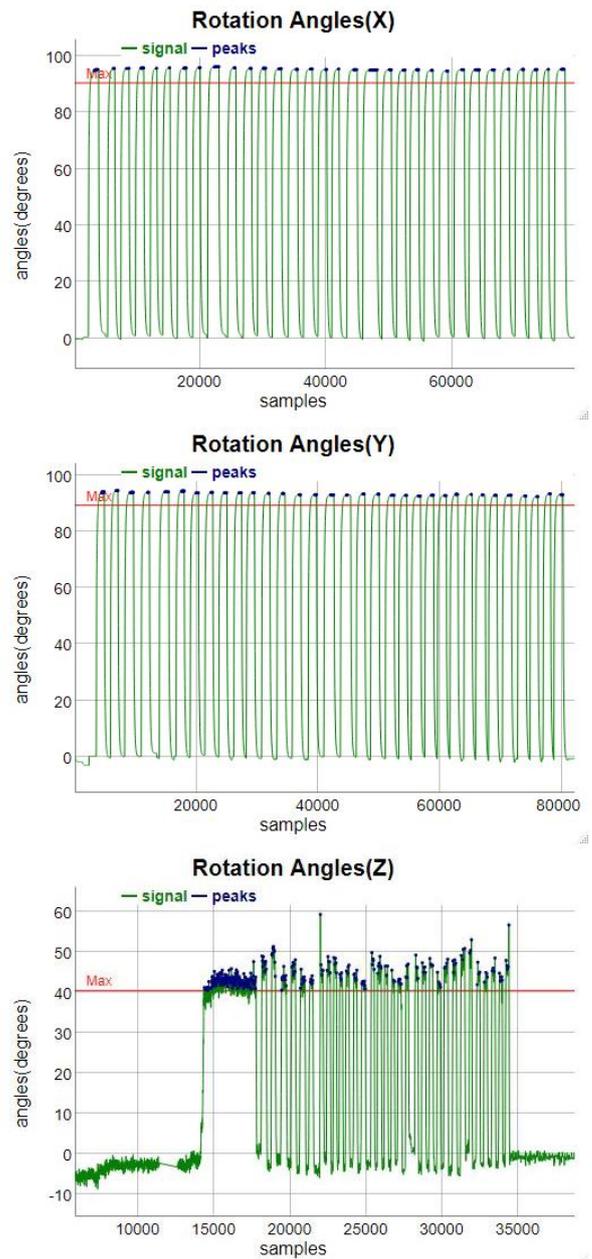


Fig. 6. Performances du suivi des mouvements de l'IHM sur les axes x, y et z.

Cependant, la première version présentait une plus grande difficulté d'adaptation à la main, le gant ne s'adaptant pas correctement à tous les types et tailles de mains. Les contacts réalisés au moyen de lignes conductrices ont présenté de bons résultats lors de l'ouverture et de la fermeture de la main. Cependant, le port du gant peut poser des problèmes aux personnes atteintes de la MP, car une grande partie de ce public cible présente une raideur du poignet, ce qui peut rendre le mouvement encore plus difficile avec le port du gant. En outre, le premier prototype présentait un volume et un poids plus importants, ce qui pouvait rendre difficile l'exécution des tâches après un certain temps de jeu, augmentant une éventuelle fatigue du membre.

Les problèmes cités ci-dessus ont été résolus par la conception du second prototype. Le design proposé rend le système plus léger et plus petit, tout en étant également adaptable facilement à la main de n'importe quel individu grâce au bracelet en matière flexible. En outre, des capteurs de lumière incorporés dans les bagues de doigts permettent d'estimer avec précision les mouvements spécifiques de pincement pouce-index ainsi que la fermeture de la main.

En ce sens, le second prototype a réussi à résoudre les problèmes de conception et d'ergonomie contenus dans la première version. En outre, il a un coût de production plus faible, car il utilise des matériaux qui peuvent être imprimés par des imprimantes 3D, et les capteurs de luminosité, qui ont un faible coût par rapport aux lignes conductrices. L'ergonomie proposée dans la seconde conception permet limiter une éventuelle fatigue pendant le jeu, et n'interfère pas dans les mouvements naturels du poignet, ce qui peut être un problème lors de l'utilisation du gant.

Un autre point qui peut être discuté est le nettoyage de l'appareil, puisqu'il serait nécessaire de le nettoyer après une utilisation constante. Le premier modèle en tissu présente un contact plus important avec la main ce qui le rend plus difficile à nettoyer. Le deuxième modèle est plus facile à nettoyer, car tous les composants électroniques sont protégés et le plastique est plus facile à nettoyer que le tissu.

IV. DISCUSSION

Ce travail a décrit le développement d'une IHM portable bas coût pour mesurer l'orientation de la main avec une précision et une fiabilité satisfaisantes. Ensuite, cette IHM spécifique peut être utilisée avec un jeu sérieux pour effectuer une tâche de rééducation de la Maladie de Parkinson.

Pour une distribution normale de la probabilité d'erreur, il a été constaté qu'une probabilité d'erreur supérieure à $\pm 5,0^\circ$ est presque nulle et cette performance a été confirmée comme étant suffisante pour contrôler l'objet virtuel en jeu avec des résultats satisfaisants. Ces résultats sont en accord avec ceux d'un système basé sur l'estimation de l'angle du genou à l'aide de capteurs inertiels [14]. En outre, des algorithmes comme le filtre de Kalman peuvent être utilisés pour réduire les erreurs dans les données émises par le système.

En moyenne, il a été observé que les estimations de l'IMU montraient peu de variation tout au long des tests de répétabilité et de performance. Bien qu'elles ne soient pas directement comparables, ces estimations de déplacement angulaire observées dans la composante laboratoire de cette étude étaient raisonnablement similaires à celles rapportées dans plusieurs autres études en laboratoire qui ont développé l'IHM à l'aide de capteurs inertiels [11], [15], [16].

Alexandre et al [10] ont également proposé un gant pour le contrôle du jeu sérieux. Cependant, la grande différence de notre travail réside dans la conception proposée, qui est peu coûteuse et facile à adapter à tout type et taille de main. En plus de proposer un système de nettoyage facile. Dans ce travail, une attention particulière a été accordée à l'exactitude et à la précision des mesures effectuées par les capteurs.

La limite de cette recherche est qu'une étude plus complète comparant les performances des deux dispositifs n'a pas été réalisée. Pour les travaux futurs, il est également prévu de mettre en œuvre une expérience avec un nombre suffisant de participants utilisant les deux interfaces. Après une analyse détaillée des données et des conclusions tirées, nous pourrions élaborer des éléments pour la conception de dispositifs plus robustes pour le contrôle de jeux sérieux destinés à la réadaptation des personnes atteintes de la maladie de Parkinson.

V. CONCLUSION

Ce travail a présenté le développement et l'application de deux modèles de gants pour la rééducation à l'aide d'un jeu sérieux. Il a également été possible de vérifier les performances du capteur par rapport au potentiomètre, l'étalon-or pour cette mesure. Les premiers résultats des données montrent que notre dispositif a une bonne précision et une bonne stabilité pour la rééducation.

En outre, il a été possible de comparer l'ergonomie des deux conceptions proposées. Ainsi, en raison de sa portabilité, de son faible coût et de sa fiabilité dans les analyses, le dispositif constitue une alternative intéressante pour le contrôle de jeux sérieux dans le cadre de la rééducation du poignet.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé avec le soutien du Conseil national pour le développement scientifique et technologique (CNPq), Coordination pour l'amélioration du personnel de l'enseignement supérieur (CAPES) (CAPES - Programme CAPES/DFATD-88887.159028/2017-00, Programme CAPES/COFECUB-88881.370894/2019-01) et la Fondation pour le soutien à la recherche de l'État de Minas Gerais (FAPEMIG). A. O. Andrade est boursier du CNPq, Brésil (304818/2018-6) ; et L. C. Mendes, I. A. Marques, C. M. Alves et Y. Morère est boursier du Programme CAPES/COFECUB (88887.612297/2021-00, 88887.628121/2021-01, 88887.662002/2022-00 et MA957/20 2019-2023 respectivement).

REFERENCES

- [1] W. Poewe *et al.*, "Parkinson disease," *Nat. Rev. Dis. Prim.* 2017 31, vol. 3, no. 1, pp. 1–21, Mar. 2017, doi: 10.1038/nrdp.2017.13.
- [2] G. Kwakkel, C. J. T. de Goede, and E. E. H. van Wegen, "Impact of physical therapy for Parkinson's disease: A critical review of the literature," *Parkinsonism Relat. Disord.*, vol. 13, no. SUPPL. 3, pp. S478–S487, Jan. 2007, doi: 10.1016/S1353-8020(08)70053-1.
- [3] A. A. Foletto, M. C. d'Omellas, and A. L. C. Prado, "Serious Games for Parkinson's Disease Fine Motor Skills Rehabilitation Using Natural Interfaces," *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 245, pp. 74–78, 2017, doi: 10.3233/978-1-61499-830-3-74.
- [4] S. McCallum, "Gamification and Serious Games for Personalized Health," *undefined*, vol. 177, pp. 85–96, 2012, doi: 10.3233/978-1-61499-069-7-85.
- [5] M. M. Kilic, O. C. Muratli, and C. Catal, "Virtual reality based rehabilitation system for Parkinson and multiple sclerosis patients," *2nd Int. Conf. Comput. Sci. Eng. UBMK 2017*, pp. 328–331, Oct.

- 2017, doi: 10.1109/UBMK.2017.8093401.
- [6] J. H. Lee *et al.*, “A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living,” *Cyberpsychol. Behav.*, vol. 6, no. 4, pp. 383–388, Aug. 2003, doi: 10.1089/10949310332278763.
- [7] V. Ravindra and C. Castellini, “A comparative analysis of three non-invasive human-machine interfaces for the disabled,” *Front. Neurobot.*, vol. 8, no. JAN, p. 24, 2014, doi: 10.3389/FNBOT.2014.00024/BIBTEX.
- [8] Ultraleap, “Tracking | Leap Motion Controller | Ultraleap,” *Ultraleap*, 2019. <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/> (accessed May 18, 2022).
- [9] A. H. Smeragliuolo, N. J. Hill, L. Disla, and D. Putrino, “Validation of the Leap Motion Controller using marked motion capture technology,” *J. Biomech.*, vol. 49, no. 9, pp. 1742–1750, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2016.04.006.
- [10] R. Alexandre and O. Postolache, “Wearable and IoT Technologies Application for Physical Rehabilitation,” 2018, doi: 10.1109/ISSI.2018.8538058.
- [11] S. Ghate, L. Yu, K. Du, C. T. Lim, and J. C. Yeo, “Sensorized fabric glove as game controller for rehabilitation,” *Proc. IEEE Sensors*, vol. 2020-October, Oct. 2020, doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278938.
- [12] C. G. Goetz *et al.*, “MDS-UPDRS,” 2008, Accessed: Aug. 05, 2021. [Online]. Available: www.movementdisorders.org/info@movementdisorders.org.
- [13] A. A. Mohamed, “Comparison of Strain-Gage and Fiber-Optic Goniometry for Measuring Knee Kinematics During Activities of Daily Living and Exercise,” *J. Biomech. Eng.*, vol. 134, no. 8, p. 084502, 2012, doi: 10.1115/1.4007094.
- [14] J. Favre, R. Aissaoui, B. M. Jolles, J. A. de Guise, and K. Aminian, “Functional calibration procedure for 3D knee joint angle description using inertial sensors,” *J. Biomech.*, vol. 42, no. 14, pp. 2330–2335, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.06.025.
- [15] M. C. Schall, N. B. Fethke, H. Chen, S. Oyama, and D. I. Douphrate, “Accuracy and repeatability of an inertial measurement unit system for field-based occupational studies,” <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1079335>, vol. 59, no. 4, pp. 591–602, Apr. 2015, doi: 10.1080/00140139.2015.1079335.
- [16] F. Wittmann *et al.*, “Assessment-driven arm therapy at home using an IMU-based virtual reality system,” in *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Aug. 2015, pp. 707–712, doi: 10.1109/ICORR.2015.7281284.

Vers des représentations multimodales de peintures pour leur accessibilité inclusive

Lilia Djoussouf

Université de Rouen Normandie
Saint Étienne du Rouvray, France
LITIS
lilia.djoussouf@univ-rouen.fr

Edwige Pissaloux

Université de Rouen Normandie
Saint Étienne du Rouvray, France
LITIS
edwige.pissaloux@univ-rouen.fr

Ngoc Tan Truong

Université de Rouen Normandie
Saint Étienne du Rouvray, France
LITIS
ngoc-tan.truong@univ-rouen.fr

Katerine Romeo

Université de Rouen Normandie
Saint Étienne du Rouvray, France
LITIS
katerine.romeo@univ-rouen.fr

Simon Gay

Université Grenoble Alpes,
Valence, France
LCIS
Simon.gay@lcis.grenoble-inp.fr

Son Duy Dao

Université de Rouen Normandie
Saint Étienne du Rouvray, France
LITIS
son-duy.dao@univ-rouen.fr

Abstract— L’accessibilité des personnes présentant une incapacité visuelle (PPIV) aux arts (e.g. peintures, sculptures) est un enjeu important pour une société inclusive. Cette communication propose une approche pour résoudre ce problème. Cette approche, qui s’appuie sur un concept de gist, passe par un ensemble de règles de réalisation pratique de représentations bimodales (audio et tactile) de peintures. Ces règles ont été appliquées pour réaliser des représentations bimodales de certaines scènes de la tapisserie de Bayeux. Ces nouvelles représentations sont accessibles via la tablette tactile à retour d’effort F2T (Force Feedback Tablet), spécialement conçue pour cet affichage bimodal. La communication propose des exemples de telles représentations qui ont été très bien accueillies par les PPIV lors des évaluations préliminaires.

Mots-clé— accès aux peintures, format multimodal, gist tactile, tablette à retour d’effort (F2T), images virtuelles, perception, Personnes Présentant une Incapacité Visuelle (PPIV).

I. CONTEXTE SOCIÉTAL ET DÉFICIENCE VISUELLE

D’après l’OMS [1] (Organisation Mondiale de la Santé) au moins 2.2 milliards de personnes ont des troubles visuels impactant la vision de près ou de loin. La majorité des PPIV (personnes aveugles incluses) ont plus de 50 ans, cependant, la perte de la vision peut atteindre toutes les classes d’âges.

La proportion de déficience de vision de près non traitée est de 10% en Europe de l’est, Amérique du Nord, Australie et l’Asie pacifique ; alors qu’en Afrique, cette proportion avoisine 80%. Avec l’augmentation de l’espérance de vie, l’OMS prévoit le doublement de la population présentant une incapacité visuelle dans les 25 prochaines années.

Les troubles de la vue impactent la qualité de la vie quotidienne rendant difficile, voire impossible, le déplacement (autonome). Cela entraîne souvent une dégradation de la santé, à une isolation sociale et la non accessibilité de différents lieux culturels comme les musées.

En effet, la vue est le principal sens exploité dans les musées. Aujourd’hui, peu d’expositions permettent aux PPIV d’utiliser

le toucher pour percevoir des œuvres d’arts et les dispositifs des musées destinés aux visiteurs sont conçus avec l’approche dite « oculo-centrée » [2] : ils sont conçus par et pour les personnes sans déficience visuelle, et conviennent très peu aux PPIV. Par ailleurs, à présent, la législation requiert, pour de nombreux musées dans le monde, de fournir aux visiteurs avec une incapacité (visuelle) quelconque un accès équitable à leurs collections artistiques.

Aussi, les musées ont besoin de répondre à deux problématiques principales [3,4] : a) l’accès à l’espace muséal (bâtiments et espaces intérieurs) ; et b) l’accès informationnel à leurs collections et aux œuvres détenues (peintures et sculptures) ; en bref, les musées doivent proposer une approche qui « dé-visualise » les visites muséales, c.à.d. une approche qui permet d’accéder aux œuvres d’art par d’autres sens que la vue [5] rendant ainsi les musées inclusifs.

Cependant, notre état de l’art [cf. §2], montre que bien que quelques grands musées puissent mettre à disposition des audiodescriptions (AD) pour des visites spécialisées, il n’y a pas de guides de musées qui permettent aux visiteurs PPIV de profiter en autonomie de leur visite au musée.

Cette communication vise donc à présenter une réponse technologique possible pour rendre les musées inclusifs. Ainsi, §II présente un bref état de l’art sur les représentations de peintures offertes aujourd’hui par les musées aux PPIV. Le §III introduit notre approche de réalisation de représentations bimodales de peintures fondée sur le concept de gist (tactile), tandis que le §IV propose un ensemble de règles de réalisation pratique de représentations s’appuyant sur le gist, et la méthode de leur évaluation avec les PPIV. Le §V applique ces règles pour réaliser des représentations multimodales (bimodales) d’images de deux scènes de la tapisserie de Bayeux via notre tablette tactile F2T (Force Feedback Tablet). La conclusion (§VI) rappelle les principales contributions de cette communication et propose quelques prolongements potentiels de ce travail.

II. REPRESENTATIONS DE PEINTURES POUR LES PPIV : UN ETAT DE L'ART.

La perception d'un objet d'art dépend de plusieurs éléments, et notamment de la (re-)présentation de l'œuvre (mono- ou multimodale), et les procédures de son exploration.

L'audiodescription et les représentations tactiles (2D, 2.5D, 3D) (statiques) sont des représentations monomodales les plus classiques de l'information visuelle 2D [6,7].

Edman [8], indique diverses méthodes existantes pour la création de dessin tactile par des professionnels, notamment l'utilisation de papier embossé, thermoformage, et thermogonflage. La technique de papier embossé permet de mettre en relief des éléments sur du papier braille. C'est une technique utilisée pour aider les PPIV à comprendre des schémas, ou des dessins non complexes avec peu de détails. Le thermoformage est une technique utilisant la chaleur pour obtenir une copie en relief à partir d'un patron réalisé (manuellement ou à l'aide d'un logiciel d'édition). Elle a l'avantage de permettre une production en masse de dessins tactiles. Le thermogonflage permet de mettre en relief des contours dessinés en noir sur une image. Le principal inconvénient de ces représentations est leur dégradation rapide après multiples usages.

La figure 1 donne deux exemples de représentations tactiles sur les différents supports à destination des PPIV, l'un venant de la collection du British Museum et l'autre du Musées des Beaux-Arts à Rouen.

Le British Museum a fait le choix de présenter une scène de la frise du Parthénon sous deux formes, une moulure (Fig.1.a) et une représentation en relief par thermoformage sous deux projections : fronto-parallèle et orthographique (Fig. 1.b). La représentation sous projection orthographique a pour but d'identifier les différentes profondeurs d'éléments de la scène considérée. Il est ainsi possible de voir la distance supposée qui sépare les deux cavaliers, et de percevoir ainsi la profondeur de la scène. Cependant, il est difficile de confirmer que la distance, entre les cavaliers, supposée par le créateur de représentation thermoformée correspond à la distance réelle que le créateur de la moulure a figée.

Le Musée des Beaux-Arts à Rouen (Fig. 1.c et 1.d) propose une représentation thermogonflée de la peinture de Sisley dans une projection fronto-parallèle. Les textures utilisées dans la figure 1.d permettent de coder les informations de la figure 1.c., e.g. le feuillage de l'arbre à droite de l'image ou les buissons de l'autre côté de la Seine ou les nuages. En effet, selon Costes [9], la texture est considérée comme un indice tactile permettant de distinguer le fond de la forme étudiée. Cependant, l'analyse plus attentive de la figure 1.d (cercles rouges), permet de constater que des espaces ou des « zones blanches », dites espaces de confort ont été ajoutés entre les objets.

Des supports technologiques divers ont aussi été conçus pour améliorer l'expérience d'une visite d'un musée (la prégnance) des PPIV, notamment, dans les représentations statiques monomodales d'œuvres d'art 3D (e.g. sculpture). Vaz *et al.* [10] étudient les retours d'expériences des PPIV en récapitulant les principaux projets de dispositifs haptiques, face à leur implantation dans l'espace muséal. Ils retiennent alors un besoin

existant de technologies multimodales pour la création d'images mentales des PPIV.

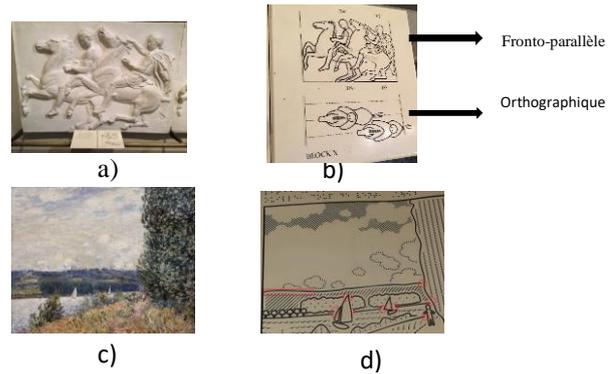


Fig. 1. Différentes représentations tactiles « statiques », (a) photo de la moulure d'une scène de la frise du Parthénon, British Museum ; (b) représentation de a) en relief (projections fronto-parallèle et orthographique avec indications supposées de distance entre les cavaliers) ; (c) La « Seine à la Bouille, coup de vent » d'Alfred Sisley, Musée des Beaux Arts de Rouen ; (d) représentation en relief par thermo gonflage de (c) avec en rouge les zones de confort ajoutées pour faciliter l'exploration tactile.

Reichinger et al. [11] proposent une méthode de construction de représentations multimodales qui couplent des représentations tactiles en bas-relief (réalisées par usinage, thermoformage) et une caméra. La caméra permet de suivre les mouvements des mains pour intégrer des audiodescriptions qui décrivent en détail l'élément exploré lorsqu'il est touché. Les études de Reichinger pointent aussi en avant les techniques d'exploration d'une représentation tactile en deux étapes : exploration globale et exploration locale (plus ciblée sur les détails). Ce résultat rejoint les travaux de Hatwell [13], qui mettent en avant, parmi les différentes procédures d'exploration [13], le suivi de contours (précis mais lent), et l'enveloppement, (moins précis car plus global, mais rapide).

Cantoni et al. [14] proposent des représentations tactiles de la peinture de « la Bataille de Pavie » exposée à la pinacothèque de Brera à Milan et réalisée en 2D (et de certains objets de la peinture en 3D). Les trois niveaux de relief utilisés permettent d'identifier un personnage ou un élément en particulier. L'utilisation de la profondeur, par la mise en relief de contours pour isoler des éléments selon leur niveau d'importance, est un point intéressant pour pouvoir mettre en avant l'information sémantique (visée) de l'œuvre. Néanmoins, bien des œuvres, comme la Bataille de Pavie, renferment de trop nombreuses informations ; cette concentration d'informations variées nuit à la perception haptique de l'œuvre et à la création rapide d'une impression artistique qui inciterait à l'étudier en détail. En effet, les études de l'exploration de représentations tactiles (statiques) montrent que celles-ci sont surtout réalisées de façon séquentielle en suivant les contours [15,16,17,18,19]. Cependant, quel que soit le type d'exploration (séquentielle, manuelle, bi-manuelle, etc.), la reconnaissance d'un objet représenté tactilement doit passer par deux étapes : l'extraction de la forme de l'objet et son traitement (cognitif) fondé sur des connaissances de l'utilisateur [12]. Aussi, les codes de représentations des informations visuelles doivent faciliter (et non alourdir) l'intégration cognitive des différentes informations

représentées tactilement, et une représentation haptique d'un objet d'art ne doit pas être une simple « copie » de celui-ci sur un autre support, surtout si elle doit solliciter l'imagination et la créativité de tout visiteur d'un musée.

Pour répondre à ces nouvelles fonctions des arts, nous proposons une représentation multimodale de peintures par le « gist ».

III. VERS UNE NOUVELLE REPRESENTATIONS HAPTQUES D'UNE SCENE : GIST TACTILE.

Le concept de « gist » a été introduit par les Grecs (Socrate, Aristote, Platon). Dans le contexte de perception visuelle, il signifie une impression première globale d'une scène [20, 21] induite par quelques objets importants, une « carte topologique d'une image » très approximative.

Ainsi, la représentation d'une image/scène par un « gist visuel » correspond à l'information globale minimale d'une image, où des éléments de tailles importantes et de couleurs contrastantes sont perçus par notre cerveau « en un clin d'œil » [20,21,22]. Aussi, le gist permet, à partir d'un minimum d'éléments, de comprendre la sémantique globale d'une image visuelle [23]. La résolution d'informations perceptibles par le sens du toucher est beaucoup plus faible que l'information perceptible par le sens de la vue [24]. Une représentation tactile via un gist tactile devrait donc être adaptée à nos capacités de discrimination de stimuli et à leur interprétation cognitive.

La représentation par 'gist tactile' proposée ici est une étape qui précède celle du regroupement cognitif/sémantique de Rastogi *et al.* fondé sur le zoom dynamique [25]; notre représentation permet d'extraire uniquement les éléments globaux (« faire un plan imparfait ») de la scène sans une opération préalable quelconque appliquée à l'image.

La figure 2.a présente une scène extraite de la tapisserie de Bayeux (inscrite sur la liste de Monuments Historiques en 1840) et au registre "Memory of the World" d'UNESCO (insc. 2007) [26], « Corbeau et renard », tandis que la figure 2.b propose sa représentation par le gist composé de 4 éléments entourés de cercles.

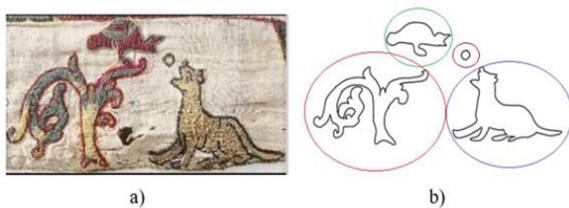


Fig. 2. Exemple de représentation en gist à partir d'une image issue de la Tapisserie de Bayeux. a) image originale [21] b) représentation en gist avec les 4 éléments principales de l'image

La représentation via le gist vise donc trois objectifs, à savoir :

1. une représentation synthétique d'une image,
2. une « carte approximative » pour la localisation (relative) des éléments constituant une image,
3. une aide dans la prise de décision d'explorer ou non l'image (ou une sous-image) en détail.

A partir de ce concept de gist tactile, et des résultats de leur évaluations avec les PPIV (et/ou les participants aux yeux bandés) [27, 28, 29], il est possible d'établir des règles permettant des réalisations pratiques de représentations haptiques.

IV. REGLES PRATIQUES DE CREATION DE REPRESENTATIONS HAPTQUES ET METHODOLOGIE ASSOCIEE.

Les règles de création (génération) de représentations haptiques présentées ici découlent de l'analyse de résultats de plusieurs séries d'expérimentations auxquels ont participé des PPIV et des participants à la vue normative aux yeux bandés [27, 28, 29]. Les buts de ces expérimentations ne visaient pas la découverte de règles mais simplement l'évaluation de la pertinence de nos représentations (par gist). Le résultat de l'analyse ultérieure, plus détaillée, de ces résultats collectés avec les questionnaires semi-structurés est présentée ici.

La figure 3 rappelle notre approche méthodologique d'expérimentations. Deux méthodes d'évaluation y sont indiquées selon le support tactile visé : une représentation thermogonflée (voie A) ou une représentation haptique affichée sur notre tablette à retour d'effort F2T, Force Feedback Tablet (voie B, [24]).

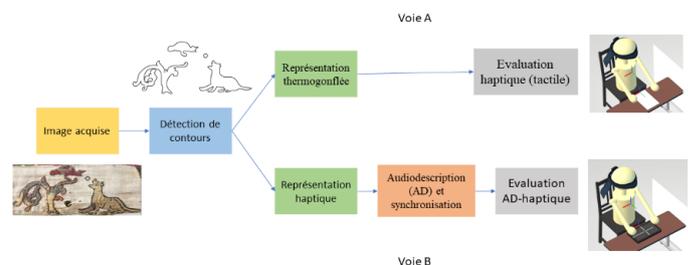


Fig. 3. Processus d'évaluation de représentation d'images par le gist tactile (exemple, d'une scène de la Tapisserie de Bayeux)

Voici notre première liste des règles déterminées expérimentalement via les campagnes d'expérimentations menées :

1. Le gist tactile correspond à l'extraction de régions qui ont une valeur perceptuelle significative de l'image étudiée ; chaque 'région' constitue un élément du gist.
2. Un élément du gist peut être défini par son enveloppe englobante (au sens du traitement d'image) : un gist d'un élément/d'un objet.
3. Les gists de différents objets d'une même scène devraient être clairement spatialement séparés les uns des autres afin de pouvoir extraire leur sémantique durant l'exploration tactile ; des espacements entre les gists devraient être introduites, si nécessaire.
4. Le seul gist tactile n'est pertinent que pour des éléments simples (e.g. les figures géométriques de base) et isolés.
5. La représentation tactile seule n'est pas suffisante pour la compréhension d'éléments complexes.
6. Le gist tactile devrait être complété par une audiodescription *ad hoc*.
7. La représentation par gist tactile devrait être co-créeé par un groupe avec différentes perceptions/capacités.

Il est à remarquer que notre règle 3 est conforme à la représentation de la figure 1d), et confirme les résultats de Costes [9] qui introduit la notion de « bonnes lisibilité et compréhension tactile » pour des maquettes qui accompagneraient des représentations tactiles.

Quant à la *méthodologie* de création de représentation, Costes souligne la nécessité de plusieurs itérations d'évaluations des représentations tactiles ainsi que la nécessité de réaliser un « recueil des données sur la perception de l'espace et des objets » afin de faciliter leur reconnaissance.

Nos évaluations permettent d'affirmer la nécessité de co-crée (avec les PPIV) des représentations tactiles ; deux groupes de participants aux évaluations sont nécessaires : l'un qui co-crée et l'autre qui évalue (et ne crée pas) ; le retour des évaluations du deuxième groupe doit être intégré dans la représentation à réaliser lors de l'itération suivante ; L'évaluation finale (devant aboutir à l'acceptation par tous) de représentations proposées doit se faire dans des environnements écologiques (e.g. les musées) et avec toutes les parties prenantes. Ainsi la co-création et l'évaluation (formative) sont continuellement présentes dans le processus et permettent d'attendre une grande acceptabilité des représentations co-crées, contribuant ainsi à une plus grande accessibilité aux œuvres.

Le paragraphe suivant donne des exemples de génération de représentations respectant les règles identifiées jusque-là.

V. EXEMPLES DE REPRESENTATIONS HAPTIQUES

Ce paragraphe propose deux représentations d'une même scène de la tapisserie de Bayeux (« Corbeau et renard ») fondées sur le concept de gist, mais affichées sur des supports différents : un papier thermogonflé et sur la tablette tactile à retour d'effort F2T.

A. Représentation thermogonflée d'images via le gist tactile

La figure 4 présente deux représentations thermogonflées issues d'une même scène. Dans la figure 4a), les simples contours de l'image de la Tapisserie ont été dessinés (et simplifiés manuellement), tandis que dans l'image 4b) la règle 3 ci-dessus (l'insertion des espaces additionnels entre les éléments du gist de la scène entière) a été appliquée pour obtenir l'image finale. Ainsi les espaces additionnels ajoutés facilitent l'exploration entre les différents éléments principaux de la scène.

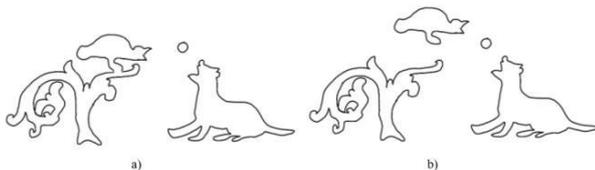


Fig. 4. Représentations du « Corbeau et du Renard » (Tapisserie de Bayeux). (a) Représentation des contours ; (b) Représentation en gist des contours.

L'utilisation d'un procédé comme le thermogonflage nécessite un travail en amont manuel pour la simplification et la segmentation d'images en contours. Cette méthode demande un temps important pour une seule image. Un autre inconvénient de

cette méthode est la nécessité de disposer d'imprimantes spécifiques et l'impossibilité de modifier l'image après son impression sur le papier non-modifiable.

Aussi, la technologie haptique, comme la tablette tactile F2T (F2T = Force Feedback Tablet), permet de dépasser ces inconvénients. En effet, la F2T offre la possibilité d'intégrer directement des représentations haptiques modifiables (elle est programmable) avec des audiodescriptions.

B. Représentation haptiques d'images via le gist tactile

La F2T (tablette tactile à retour d'effort, [29]) est dédiée à la mise en œuvre de représentations haptiques d'images via le gist.

F2T est aussi une architecture et un support de représentations d'éléments visuellement dynamiques de peintures.

La figure 5 présente le modèle et le prototype actuel, toujours en cours de développement à l'université de Rouen Normandie. La F2T acquiert l'intention de mouvement induit par l'utilisateur via le joystick, indépendamment du mouvement en cours de l'effecteur final (Fig.5b). Cette spécificité permet l'implantation d'une large gamme d'effets haptiques dynamiques et interactifs, utiles pour la représentation de données 2D par le gist (effets de contour et de relief, des effets d'écoulement, des effets de rail, etc. [29])

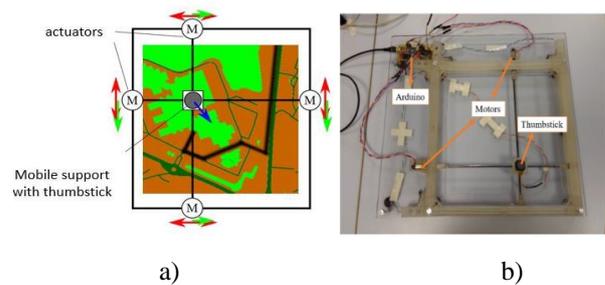


Fig. 5. Le prototype de la tablette tactile F2T en développement à l'Université de Rouen Normandie. [29]

C. F2T : modes d'exploration du gist.

La F2T offre deux modes d'exploration du gist de l'image affichée sur l'écran auquel la F2T est attachée (cf. figure 5 : l'exemple de la carte de campus de l'Université de Rouen) : l'exploration libre et l'exploration guidée. L'exploration libre est un mode « importé » des représentations thermogonflées. En ce mode d'exploration active le PPIV déplace le joystick de la F2T avec son doigt en explorant le gist qui guide la progression de sa compréhension (sa présentation mentale) de la scène en revenant à tout moment à l'élément qui a attiré son attention afin de confirmer ou d'infirmer les percepts extraits se basant sur les mouvements de sa main/de son bras.

La figure 6b donne une partie (pour la lisibilité) du graphe d'exploration (1 → 2 → 3 → 4) de gist de la scène 6.a) entière (Scène 4 de la tapisserie de Bayeux : le duc Harold embarque pour sa traversée de la Manche vers la Normandie). On peut y observer que la PPIV a fait deux « allers-retours » entre le faucon et le personnage (duc Harold) avant de passer à l'exploration détaillée du bateau.

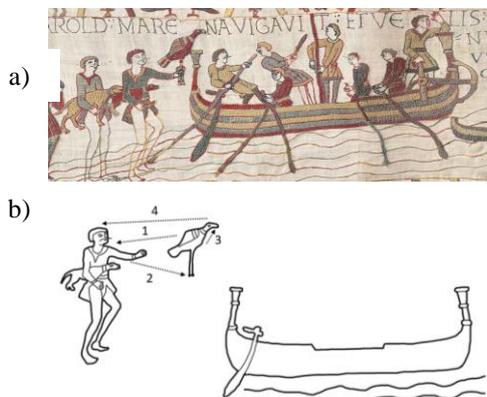


Fig. 6. Illustration de la représentation d'une scène de la Tapisserie de Bayeux; (a) image originale tirée de la Tapisserie de Bayeux [26], (b) une représentation par gist de la scène de (a).

L'exploration guidée permet d'explorer le gist (d'une scène entière ou de ses sous-parties) de manière passive, par le suivi de contours fixé par le système de contrôle de la F2T (un logiciel dédié qui parcourt un fichier-texte). Le PPIV pose son doigt sur le joystick et se laisse emporter par le logiciel. Cette méthode séquentielle permet l'exploration des détails d'une image en déplaçant le doigt le long des contours formant le gist. La PPIV peut revenir à un élément déjà exploré en parcourant le graphe associé au gist en sens inverse ou en forçant délibérément la nouvelle position initiale de son parcours. La figure 7 donne un exemple de graphe de parcours réalisé dans le cadre d'exploration guidée de la scène « Corbeau et renard » de la tapisserie de Bayeux. Le logiciel de contrôle traite le fichier texte ad hoc contenant les points de passages du gist (points verts); la vitesse de déplacement du joystick est adaptée à chaque PPIV (mémoire dans son fichier « profil »).



Fig. 7. Exemple de graphe (en vert) de parcours de l'image du « Corbeau et le renard » extrait de la Tapisserie de Bayeux [26].

Le mode d'exploration guidé d'une représentation en gist tactile pourrait être considéré comme une méthode de base pour la représentation multimodale d'une image. Cette représentation multimodale peut alors être désignée comme étant un *format inclusif de représentation d'une information 2D* (le mode guidé peut être utilisé par tout visiteur d'un musée).

D. Vers le format inclusif (multimodal) d'une image.

L'exploration haptique apporte des informations syntaxiques sur la scène étudiée, et comme toute exploration, elle est entachée de l'ambiguïté de son interprétation. Il s'agit en effet des « illusions haptiques » (phénomène équivalent et bien connu en vision, où il est désigné sous le terme « illusion visuelle »).

Aussi, pour lever cette ambiguïté nous proposons d'utiliser la multimodalité : haptique d'une part et les effets audios (texte, musique, sons divers) d'autre part. La représentation (le format) multimodale peut être créée à partir de gists d'objets de la scène ou à partir de la scène entière.

Format multimodal d'un gist de l'objet.

L'exploration guidée se prête naturellement à la création de ce nouveau format d'une image : les points de passages du gist (points verts, cf. figure 7), judicieusement choisis, peuvent déclencher l'exécution d'un fichier sonore ad hoc.

Format multimodal de l'image entière.

La scène est partitionnée en sous-images où différents effets originaux de la F2T (primitives programmables) (cf. §V.2.1) et différents effets sonores peuvent être associés. Le partitionnement et l'association des effets haptiques et sonores sont faits via un logiciel interactif (les deux provenant des bibliothèques de ce logiciel). La figure 8 illustre l'utilisation des différents effets haptiques que nous avons associés à la scène 34 de la tapisserie de Bayeux : le vent, élément physique dynamique, est simulé par l'effet d'écoulement, et il est appliqué sur la région ad hoc (la voile cf. fig. 8.b et c). Les vagues sont d'autres éléments physiques considérés comme dynamiques sur cette scène ; ils sont simulés à partir d'une sinusoïde (effet « haptique ») (Fig. 8.b) et le bruit de chocs de vagues contre la coque du bateau est importé de la bibliothèque d'effets sonores.

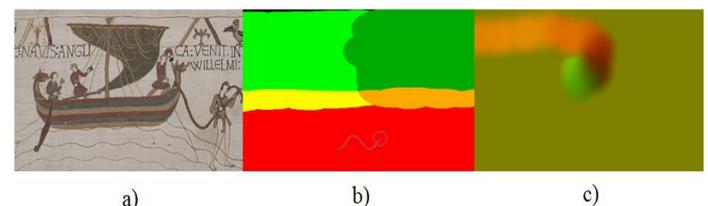


Fig. 8. Illustration de la représentation de la scène 34 de la Tapisserie de Bayeux; (a) image originale tirée de la Tapisserie de Bayeux [26], (b) Régions de couleurs associées à des fonds sonores et utilisation d'une fonction sinusoïdale pour simuler les vagues, (c) effet d'écoulement du vent.[29]

VI. CONCLUSION

Cette communication a introduit le concept de gist haptique, et a proposé un ensemble de règles de base de réalisation de représentations du gist tactile, et a proposé un nouveau format multimodal, inclusif, pour représenter des images accessibles à tous. La possibilité de créer, par toute personne, des représentations multimodales via le logiciel ad hoc brièvement introduit ici, constitue un moyen pour éveiller la créativité chez tout utilisateur de notre tablette tactile F2T. La nouvelle représentation multimodale des peintures, utilisée ici pour représenter les scènes diverses de la tapisserie de Bayeux, permet donc d'adapter et de « dé-visualiser » la peinture et de créer de nouvelles impressions esthétiques chez tout visiteur de

musées. Des exemples de représentations haptiques de certaines scènes de la tapisserie de Bayeux ont été proposés. Ces représentations ont été accueillies avec intérêt lors de leurs évaluations avec les PPIV. Nos recherches futures s'articuleront autour de la F2T (e.g. recherche de nouvelles primitives pour simuler les effets visuellement dynamiques, des opérations de l'affichage d'images fondées sur le changement d'échelle, etc.) de l'affinement des règles et de la génération automatique de représentations haptiques à partir des images d'une part, et de la place relative du tactile et audio dans le format multimodal d'images et de l'adaptabilité des descriptions audios aux PPIV d'autre part.

REMERCIEMENTS.

Cette étude a été soutenue financièrement par différents organismes, la CCAH (Comité National Coordination Action Handicap), la Région Normandie, la Commission Européenne (FEDER) (projet « Guide muséal », guide-museal.univ-rouen.fr) et l'ANR (le projet « Inclusif Museum Guide »). Nous remercions les étudiants et le personnel de l'Université de Rouen Normandie, les PPIV, membres de notre équipe de recherche ou d'associations pour les malvoyants, pour leur participation à nos évaluations.

REFERENCES

- [1] WHO (World Health Organization), "Blindness and vision impairment," 14-Oct-2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/blindness-and-visual-impairment>. [Dernier accès: 14-Feb-2022].
- [2] Ceyte H., « Perception visuelle de l'espace égocentré: Contribution différenciée des informations sensorielles à la localisation et l'orientation du plan médian corporel », Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2006.
- [3] Raffi, F., "Full Access to Cultural Spaces (FACS): Mapping and evaluating museum access services using mobile eye-tracking technology", *Ars Aeterna: Literary Studies and Humanity*, vol. 9, no. 2, 2017, pp. 18-38. doi:10.1515/aa-2017-0007
- [4] Mesquita, S., Carneiro M. J., "Accessibility of Europ. museums to visitors with visual impairments", *Disability & Society*, 2016, 31(3), 373-388
- [5] Eardley, A., Thompson, H., Fineman, A., Hutchinson, R., Bywood, L. & Cock, M., « Devisualizing the Museum: from Access to Inclusion », *J. of Museum Education (2022)* (ID: 2077067 DOI:10.1080/10598650.2022.2077067)
- [6] Pissaloux, E., Thompson, H., Eardley, Chottin, M., « Multimodal (inclusive) digital technologies for heritage : state of the art and challenges », J. Nationale du NORMAStic, CNRS webinar, May 27, 2021. <http://www.normastic.fr/event/journee-de-laxe-image/>
- [7] Thompson, H., « Blindness Arts » (co-ed. V. Warne), *Disability Studies Quarterly*, vol. 38, no.3, 2018
- [8] Edman, P., *Tactile graphics*. American Foundation for the Blind, 1992
- [9] Costes, E., « Prise en compte de la perception tactile dans la conception de représentations d'œuvres d'art pour les personnes en situation de handicap visuel », Thèse de doctorat, Arts et Métiers Paristech, Paris, 2012
- [10] Vaz, R., Freitas, D., Coelho, A., 2020. "Blind and Visually Impaired Visitors' Experiences in Museums: Increasing Accessibility through Assistive Technologies." *The Int. J. of the Inclusive Museum* 13: 57-80. doi:10.18848/1835-2014/CGP/v13i02/57-80.
- [11] Reichinger, A., Fuhrmann A., Maierhofer S., Purgathofer W., 2016. "Gesture-Based Interactive Audio Guide on Tactile Reliefs." In *Proc. of the 18th Int. ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Eds. by Jinjuan Heidi Feng and Matt Huenerfauth, 91-100. New York: ACM. <https://doi.org/10.1145/2982142.2982176>.
- [12] Hatwell, Y., « Toucher les livres tactiles », Actes du colloque « Texte et image : transcription et adaptation », 2007, p. 52-55.
- [13] Lederman S.J., Klatzky R.L., « Hand movements: A window into haptic object recognition », *Cognitive psychology*, Elsevier, 1987
- [14] Cantoni V., Dondi P., Lombardi L., Nugrahaningsih N., Porta M., Setti A., « A Multi-Sensory Approach to Cultural Heritage: The Battle of Pavia Exhibition », IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 364, Florence Heri-Tech - *The Future of Heritage Science and Technologies* 16–18 May 2018,
- [15] Cattaneo, Z., Vecchi, T., Cornoldi, C., Mammarella, I., Bonino, D., Ricciardi, E. et Pietrini, P., "Imagery and Spatial Processes in Blindness and Visual Impairment". *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 32, 2008, p. 1346-1360.
- [16] Gentaz E., Hatwell Y., chapitre 5 : le traitement haptique des propriétés spatiales et matérielles des objets, *Toucher pour connaître*, Ed. PUF, 2000 p.129-162
- [17] Hatwell, Y., Martinez-Sarocchi, F., « La lecture tactile des cartes et dessins, et l'accès des aveugles aux oeuvres d'art ». In Hatwell Y., Streri A. et Gentaz E. *Toucher pour connaître*. Ed. PUF, 2000, p. 267-282.
- [18] Cornoldi, C., Vecchi, T., « Cécité précoce et images mentales spatiales ». In Hatwell Y., Streri A., Gentaz E. *Toucher pour connaître*. Ed. PUF, 2000, p. 175-186.
- [19] Richard, F., Vaz-Cerniglia, C., Portalier, S., « Évolution des procédures haptiques chez des sujets voyants, aveugles tardifs et aveugles précoces ». *Revue européenne de psychologie appliquée* 54, 2004, p. 227-236.
- [20] Potter, M. C. (1976). Short-term conceptual memory for pictures, *J. of Experimental Psychology: Human Learning and Memory* 2, 509-522.
- [21] Groen I.I.A., Ghebreab S., Prins H., Lamme V.A., Scholte H. S., From Image Statistics to Scene Gist : Evoked Neural Activity Reveals Transition from Low-Level Natural Image Structure to Scene Category, *J. of Neuroscience*, 2013, 33(48), pp. 18814-18824.
- [22] Oliva, A., « Gist of the Scene », *Neurobiology of Attention*, Elsevier, 2005, pp.251- 258.
- [23] Pissaloux E., Velazquez R., Maingreud F., « A New Framework for Cognitive Mobility of Visually Impaired Users and Associated Tactile, Device », *IEEE Trans. Human-Machine Systems*, vol. 47 Issue 6, pp.2168-2291, Dec 2017
- [24] Way, T. P., Barner, K. E. « Automatic visual to tactile translation. i. human factors, access methods and image manipulation », *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, vol. 5, n° 1, p. 81-94, 1997.
- [25] Rastogi, R., Pawluk, T. D., Ketchum, J. « Intuitive tactile zooming for graphics accessed by individuals who are blind and visually impaired », *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 21, n° 4, p. 655-663, 2013.
- [26] "Tapisserie de Bayeux – Visite de la tapisserie de Bayeux," *Bayeux Museum*, 31-Jan-2022. [Online]. Available: <https://www.bayeuxmuseum.com/en/the-bayeux-tapestry/>. [Dernier accès: 14-Feb-2022].
- [27] Romeo K., Chottin, M., Ancet, P., Pissaloux, E., « Access to Artworks and its Mediation by and for Visually Impaired Persons », *ICCHP 2018*, July 9-13, 2018, Linz, Austria, LNCS II 233-236
- [28] Romeo K., Chottin, M., Ancet, P., Pissaloux, E., « Simplification of Painting Images for Tactile Perception for Visually Impaired Persons », *ICCHP 2018*, July 9-13, 2018, Linz, Austria, LNCS II 250- 257
- [29] Gay, S., Pissaloux, E., Romeo, K., Truong, N.T., F2T: « A Novel Force-Feedback Haptic Architecture Delivering 2D Data to Visually Impaired People », *IEEE Access*, page(s): 1-11, Print ISSN: 2169- 3536, Online ISSN: 2169-3536, DOI:10.1109/ACCESS.2021. 3091441

Session 4 : Méthodologies Inclusives

Présidentes de session : Edwige Pissaloux & Katerine Romeo

Conception participative d'une maquette 3D interactive avec les Instructrices de Locomotion pour des utilisateurs avec déficiences visuelles.

Etude de cas.

Elen Sargsyan
Université de Toulouse 3, IRIT
Toulouse, France
elen.sargsyan@irit.fr

Bernard Oriola
CNRS, IRIT
Toulouse, France
bernard.oriola@irit.fr

Christophe Jouffrais
CNRS, IRIT
Toulouse, France
christophe.jouffrais@irit.fr

Marc Macé
IRIT
Toulouse, France
marc.mace@irit.fr

Marcos Serrano
Université de Toulouse 3, IRIT
Toulouse, France
marcos.serrano@irit.fr

Résumé—L'acquisition et la compréhension des connaissances spatiales est l'un des facteurs clés de la mobilité autonome d'une personne avec déficience visuelle. Dans cette étude, nous avons travaillé sur la conception participative d'une maquette 3D interactive et innovante d'un bâtiment en collaboration avec des instructrices de locomotion, dans le but de répondre à leurs besoins lors de leurs séances avec des personnes déficientes visuelles. L'objectif de ce travail est de créer une preuve de concept d'un dispositif interactif représentant un bâtiment existant en se basant sur le prototypage rapide et à faible coût et de définir ses avantages et inconvénients. Les résultats montrent que le dispositif est considéré comme utile et utilisable, et procure une grande satisfaction chez les professionnels concernés. Au cours de séances préliminaires avec ce dispositif, les instructrices de locomotion remarquent déjà une amélioration de l'orientation spatiale chez des enfants déficients visuels après l'exploration de la maquette interactive.

Mots-clés—Déficience visuelle, connaissances spatiales, conception participative, prototypage à faible coût, impression 3D, technologie d'assistance, interface utilisateur tangible

I. INTRODUCTION

La déficience visuelle est un terme qui décrit une perte de vision en raison de nombreuses pathologies, allant de la malvoyance jusqu'à la cécité¹. Une personne est considérée comme déficiente visuelle quand elle présente une acuité visuelle très basse après correction, moins de 3/10 dans le cas de

la malvoyance et moins de 1/20 dans le cas de la cécité. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé², il y a environ 1.3 milliard de personnes avec déficiences visuelles (PDV) au monde. L'autonomie des PDV est fortement impactée par leurs capacités en orientation et mobilité. De fait, une mobilité autonome est cruciale pour l'autonomie personnelle d'une PDV ainsi que pour la prévention de l'isolement social [1,2]. L'enseignement des connaissances spatiales repose principalement sur les instructeurs de locomotion (IL) et leurs outils d'éducation spécialisée. L'objectif des instructeurs de locomotion est en général double : enseigner des compétences pour se déplacer de façon fiable et sûre en général ; mais aussi fournir suffisamment d'informations concernant un lieu en particulier pour que les PDV puissent y naviguer de manière autonome.

L'apprentissage de l'orientation et de la mobilité est un défi pour les PDV et leurs enseignants spécialisés, notamment en raison du manque de technologies d'assistance adaptées. L'outil le plus utilisé pendant les séances de locomotion est la carte tactile aussi appelée dessin en relief (DER). Les DER permettent à une PDV d'explorer avec ses doigts les zones en relief sur un papier thermogonflé (lignes, symboles, textures, etc.). L'utilité et l'utilisabilité des DER ont été mis en évidence par plusieurs recherches. Il a été montré que les DER aident à acquérir des connaissances spatiales [2]. Espinosa et Ochaita ont montré que les personnes non-voyantes réalisaient avec plus de précision des exercices d'orientation où les instructions étaient données par un instructeur, lorsqu'ils portaient également avec eux un

¹ De la malvoyance à la cécité, disponible sur : <https://www.unadev.com/le-handicap-visuel/les-principales-pathologies/>

² Cécité et déficience visuelle (26 février 2021), disponible sur : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>

DER [2]. Ces résultats sont en accord avec plusieurs autres études [3,4] qui ont mis en évidence le potentiel des cartes tactiles à transmettre une image claire de la disposition d'un environnement [5,6], pouvant être bénéfique aux PDV aussi bien à courts termes que longs termes [7,8]. Cependant, les DER comportent plusieurs limitations. Ils sont encombrants car le texte en braille est de 30 à 50 fois plus large qu'un texte en noir et blanc, et, en raison des spécificités de l'interaction tactile, la quantité d'information présente sur les DER est limitée. De plus, seulement 10 à 15% des PDV sont lectrices du braille, ce qui explique que les DER ne soient pas accessibles à toutes les PDV. Une autre limitation des DER est l'aller-retour permanent entre la légende et le dessin qui divise l'attention et surcharge la mémoire de travail [9].

Les DER ne bénéficient pas de l'évolution rapide des nouvelles technologies, et notamment des méthodes de prototypage peu coûteuses, rapides et faciles à mettre en œuvre. Ces outils et méthodes devraient pourtant être bénéfiques dans le milieu de la déficience visuelle, notamment pour la conception de technologies d'assistances (TA). Une TA se définit comme « Tout article, pièce d'équipement ou système de produit... qui est utilisé pour augmenter, maintenir ou améliorer les capacités fonctionnelles d'une personne en situation de handicap » [10]. Il y a de plus en plus d'articles qui montrent les avantages des TA lorsqu'elles sont créées en appliquant des méthodes de la « Do-It-Yourself culture » (DIY, en français : « faites-le par vous-même ») [11–15], certains auteurs parlent même de DIY-TA [15]. En effet, la DIY culture met en avant le prototypage rapide et à faible coût, grâce notamment à des outils tels que l'imprimante 3D ou la découpeuse laser. Ces outils et méthodes assurent une personnalisation élevée et permettent la possibilité de modification, de réajustement et d'amélioration d'une TA [13].

Dans cette étude, en collaboration avec des instructrices de locomotion, nous avons créé une maquette 3D interactive d'une structure complexe (gare ferroviaire d'une grande ville), en nous appuyant sur la DIY culture. Le but de notre étude était de créer un outil éducatif interactif spécialisé permettant la transmission des notions spatiales et plus particulièrement la notion de verticalité (compréhension des étages) qui est apparue comme très problématique lors de nos séances de brainstorming, en nous basant sur les techniques de prototypage rapide. En cohérence avec les observations faites dans le milieu de la déficience visuelle par Giraud *et al*, et Metatla *et al* [16], [17], nous avons opté pour une conception participative avec des instructrices de locomotion d'un centre d'éducation spécialisée. Nous avons analysé les besoins des instructrices afin de créer un outil d'assistance qui réponde à leur besoin, qui soit acceptable et qui procure de la satisfaction. Dans ce cadre, nous avons mené plusieurs entretiens, groupes de discussions et itérations de conceptions. Les résultats préliminaires sont prometteurs et montrent que ce type d'outil a le potentiel d'améliorer la qualité d'enseignement des connaissances spatiales par les instructrices de locomotion. Leurs observations réalisées sur deux jeunes déficients visuels ont également montré des résultats prometteurs concernant le transfert de connaissances spatiales entre l'apprentissage sur la maquette et le site de navigation.

II. CONTEXTE

A. L'apprentissage spatial chez les personnes avec déficiences visuelles

L'apprentissage spatial se définit comme « le processus par lequel les individus établissent et affinent leurs connaissances sur les points d'intérêt dans l'environnement et leurs relations spatiales, comme les itinéraires et les repères de navigation » [traduit de 8]. Contrairement aux personnes avec une vision correcte ou corrigée, les PDV doivent acquérir ou compléter leurs compétences et connaissances spatiales de façon séquentielle [11,19] par le biais des modalités tactile, proprioceptive et auditive. Les informations auditives acquises au fur et à mesure des déplacements permettent la formation d'une image mentale de l'environnement qui facilite la mobilité et l'orientation [9,21]. La perception haptique remplace la vision pour élaborer des représentations mentales de l'espace à partir de dessins en relief, mais implique un coût cognitif élevé [21]. En effet, la perception haptique couvre un champ perceptif petit et divisé (la pointe des dix doigts), ce qui conduit à une forte mobilisation des ressources cognitives pour intégrer et mémoriser l'information spatiale [22]. Actuellement, dans les centres d'éducation spécialisée, les connaissances spatiales sont principalement enseignées à l'aide de technologies telles que les DER (Figure 1.a), les cartes aimantées (Figure 1.b) et les modèles 3D en carton ou bois (Figure 1.c).

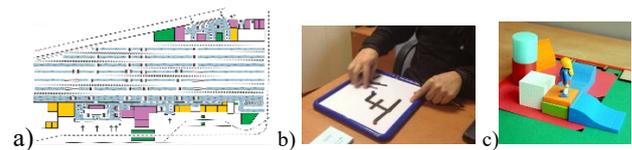


Figure 1 a) DER b) Carte aimantée c) Modèle 3D en bois

En plus des limitations citées précédemment, les DER sont en général créés par des adaptateurs de document, ce qui demande du temps et une certaine organisation. Une fois imprimés, les DER ne peuvent pas être mis à jour et doivent être refaits. Les modèles en 3D en carton ou en bois sont également employés mais, de la même façon, sont très spécifiques d'un lieu et ne peuvent pas être mis à jour facilement. Les cartes aimantées sont souvent utilisées pendant les séances de locomotion sur site. Elles sont construites sur un tableau magnétique avec des aimants dans le but de transmettre une idée très générale d'une structure spatiale (une intersection par exemple). Toutes ces contraintes limitent l'autonomie des instructrices de locomotion dans leur travail.

B. Dispositifs Interactifs

Brock et al, ont montré que l'interactivité d'un DER améliore l'utilisabilité des cartes géographiques chez les PDV [23]. En effet, une étude comparative a été menée afin d'évaluer les avantages d'un DER interactif (la carte est posée sur un écran tactile et fournit des retours sonores lorsque l'utilisateur touche des points interactifs) comparé à un DER classique avec légende. Les résultats montrent que les DER interactifs offrent une meilleure efficacité (en termes de temps d'apprentissage), une meilleure satisfaction des utilisateurs et également une meilleure efficacité en termes d'apprentissage spatial.

Holloway et al ont comparé des DER d'un parc et d'une station de train à leurs maquettes 3D chez les PDV. Les auto-évaluations montrent un meilleur modèle mental suite à l'exploration des modèles 3D, ainsi qu'un meilleur score de mémoire à court terme [24]. Les chercheurs suggèrent que la compréhension des maquettes 3D pourrait être plus facile comparée à leurs équivalents en 2D, ainsi que la compréhension de la hauteur relative à des objets 3D, et pourrait offrir des avantages concernant des activités où la compréhension d'une hauteur est importante.

C. Dispositifs Interactifs Tangibles

Des articles récents mettent en évidence le potentiel des Interfaces Utilisateurs Tangibles (IUT) pour améliorer la qualité de l'apprentissage grâce notamment à la manipulation de dispositifs physiques manipulables [25] car la matérialisation (parfois appelée « physicalisation ») pourrait faciliter la compréhension de la nature de l'objet (par exemple les objets 3D manipulables sont compris avec plus de facilité que leurs représentations numérique ou 2D) [26]. De plus, l'utilisation d'IUT est considérée comme plus efficace comparée à d'autres techniques d'interaction (physique ou interface graphique seule) [25,26]. Ainsi, les IUT pourraient être plus accessibles, plus efficaces et plus engageantes pour les enfants avec déficiences visuelles [29].

Il y a un nombre important d'études qui mettent en évidence les avantages des IUT pour l'apprentissage des connaissances spatiales chez les PDV. Giraud *et al*, ont montré que les maquettes interactives permettent une meilleure mémorisation spatiale et textuelle concernant des contenus historiques et géographiques, comparée à de simples DER [30]. Brulé *et al* ont conçu une carte interactive multisensorielle. L'étude a montré non seulement une amélioration dans la compréhension et mémorisation spatiale, mais également une amélioration dans l'engagement et la satisfaction chez les élèves DV et leurs enseignants spécialisés [31]. Palivcová et al ont également montré qu'une carte interactive qui aide l'utilisateur à s'orienter avec des retours sonores, permet de construire une meilleure image mentale d'un environnement inconnu chez les personnes âgées avec DV [32]. Holloway *et al* ont réalisé une étude de cas d'un modèle 3D interactif qui représente un campus universitaire [24]. Ils observent également des résultats encourageants concernant la transmission des informations spatiales et de recherche de trajet (« pathfinding »).

III. OBJECTIFS DE L'ETUDE

A la lumière de la littérature, nous observons que les dispositifs tangibles et interactifs, issus des techniques de prototypage rapide et à faible coût, ont le potentiel de révolutionner le domaine de l'accompagnement des PDV dans l'acquisition des compétences et connaissances spatiales et, par conséquent, d'améliorer leur autonomie lors des déplacements. Il y a un nombre considérable d'articles sur les avantages de l'application des outils de prototypages rapides (notamment

l'impression 3D) dans la création des technologies d'assistance pour les PDV. Cependant, la plupart des recherches se focalisent sur les matières telles que les sciences, les mathématiques, la technologie et l'ingénierie (STEM) [33,34]. De plus, la plupart des études portent sur l'acquisition des compétences et connaissances par les PDV sans systématiquement se concentrer sur les besoins des professionnels et les outils d'enseignement pour y répondre.

Lors de nos séances préparatoires de discussion avec les professionnels de la DV, et notamment les instructeurs de locomotion, nous avons identifié une lacune en termes d'outil adapté pour l'apprentissage des notions spatiales et notamment l'introduction à des structures complexes et la notion de verticalité chez les PDV. Certaines initiatives portées par des professionnels montrent d'ailleurs tout l'intérêt qu'ils portent à ces outils³. En se basant sur les résultats prometteurs des avantages des IUT, des méthodes de prototypages rapides et à faible coût, nous avons réalisé une étude de cas menant à une preuve de concept pour répondre aux besoins de deux IL d'un centre d'éducation spécialisée. Finalement, nous avons mesuré l'utilisabilité, l'utilité et la satisfaction apportés par ce dispositif aux IL. Une étude complémentaire en cours permettra de vérifier que ces outils sont aussi bénéfiques pour leurs élèves déficients visuels.

Dans cette étude, nous avons posé les questions de recherche (QR) suivantes :

QR1 : Quels sont les besoins des enseignants spécialisés en termes d'outil adapté pour travailler des structures complexes et la notion de verticalité (superposition des étages) ?

QR2 : Peut-on s'appuyer sur les méthodes de conception issues du mouvement des « makers » pour répondre au mieux aux besoins de ces enseignants spécialisés ?

QR3 : Ces méthodes permettraient-elles de répondre aux besoins des instructrices de locomotion en validant les contraintes d'utilité, d'utilisabilité et de satisfaction ?

IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES

A. Méthode expérimentale

Afin de connaître les besoins des enseignants spécialisés et de leurs étudiants déficients visuels, nous avons opté pour la conception participative, qui est une méthode collaborative entre les chercheurs, les professionnels du domaine et les utilisateurs finaux. Les méthodes de conception participative aident à mieux identifier les besoins, et à se concentrer sur des propositions de solutions adaptées ; elles permettent également d'évaluer les solutions proposées pendant l'étude [35]. Les professionnels sont invités à partager leurs expériences et les problèmes liés au sujet. Ainsi, cela permet une détection fiable des besoins réels (mesures objectives et subjectives). Il est important de souligner que les méthodes de conception participative conduisent à des concepts et des idées plus innovants, tout en augmentant l'acceptation de la technologie par les utilisateurs finaux ciblés, ainsi que son utilisation et son adoption à long terme [36,37]. De

³ Maquette d'un métro sur 3 niveaux par l'INLB, disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=BpXFPCqPyaY&ab_channel=AMI-t%C3%A9%C3%A9

façon complémentaire, plusieurs résultats ont montré qu'une des causes du rejet des technologies d'assistance est l'absence de conception participative avec des professionnels du domaine et des utilisateurs finaux [38,39].

B. Participants

Dans cette étude, nous avons collaboré avec deux IL d'un centre d'éducation spécialisée dans l'accompagnement des enfants et adolescents avec déficience visuelle, avec ou sans troubles associés. L'une des IL est psychomotricienne de formation, spécialisée dans la mobilité et l'orientation (M&O) depuis 12 ans ; l'autre est ergothérapeute de formation, spécialisée dans la M&O depuis 6 ans. Un adulte non-voyant, spécialiste de la recherche en interaction humain-machine, a participé à toutes les étapes de ce projet en tant qu'expert.

C. Procédure de co-conception

Nous avons mené 5 groupes de discussion avec les deux instructrices de locomotion, qui ont duré entre 1h et 2h30 chacun. Nous avons également échangé par messages, courriels et appels téléphoniques tout au long de la conception afin d'accélérer les itérations et d'améliorer la conception.

Afin de répondre à la première question de recherche, nous avons organisé un groupe de discussion, pendant lequel les instructrices de locomotion étaient invitées à nous décrire leurs façons de travailler. L'analyse des échanges montre que les instructeurs et instructrices de locomotion sont des enseignants spécialisés dans la M&O. Ils apprennent aux PDV à se déplacer en autonomie, en sécurité et avec confiance. Les sessions de M&O consistent en de nombreuses répétitions d'itinéraires et d'identification de points d'intérêt sur site. Les séances sur site sont généralement précédées de séances dans le centre d'éducation, avec du matériel adapté tels que des DER, des maquettes en carton ou des cartes aimantées. Un des points les plus difficiles à enseigner concerne les bâtiments complexes avec plusieurs étages. L'exemple de la gare proche du centre-ville a été donné comme un lieu à connaître, mais très difficile à enseigner. L'apprentissage des bâtiments complexes et de la « verticalité » a été jugé comme un excellent exemple dans lequel illustrer l'importance des maquettes interactives.

Lors du second groupe de discussion, nous avons abordé leurs besoins en termes d'outil adapté, qui permettrait d'enseigner plus efficacement la mobilité et l'orientation dans un bâtiment complexe, et qui permettrait de travailler, de façon plus générale, sur l'organisation verticale des bâtiments et la superposition des étages. Actuellement, l'enseignement des bâtiments complexes se réalise grâce à plusieurs DER, chaque DER représentant un étage du bâtiment. Dans ce cas, les DER ne sont pas très opérants car il est très difficile de comprendre les correspondances entre les étages (escaliers, escalators, ascenseurs). De plus, la charge cognitive liée aux allers-retours entre la carte et la légende devient trop lourde puisqu'il existe plusieurs DER, avec éventuellement plusieurs légendes. Les chercheurs ont décrit des exemples de réalisations tangibles interactives (notamment un film⁴) et ont expliqué l'hypothèse selon laquelle ces outils pourraient être utiles et utilisables. Les

échanges montrent que les deux professionnelles sont convaincues que ces outils pourraient avoir des vertus en termes d'apprentissage, notamment en raison de l'autonomie qu'ils pourraient procurer aux élèves mais aussi en raison de leur aspect engageant et ludique. Cependant, elles se demandent comment elles pourraient posséder de tels outils car elles n'ont ni les connaissances, ni les moyens de les réaliser. L'objectif de concevoir ensemble une preuve de concept et de se questionner sur les étapes de fabrication a été validé. Plusieurs exemples de bâtiments ont été considérés et elles ont finalement décidé que le plus pertinent serait la maquette de la gare Saint-Jean de Bordeaux, proche du centre qui avait été citée en exemple lors du premier groupe de discussion.

La figure 2 récapitule les grandes étapes du projet.

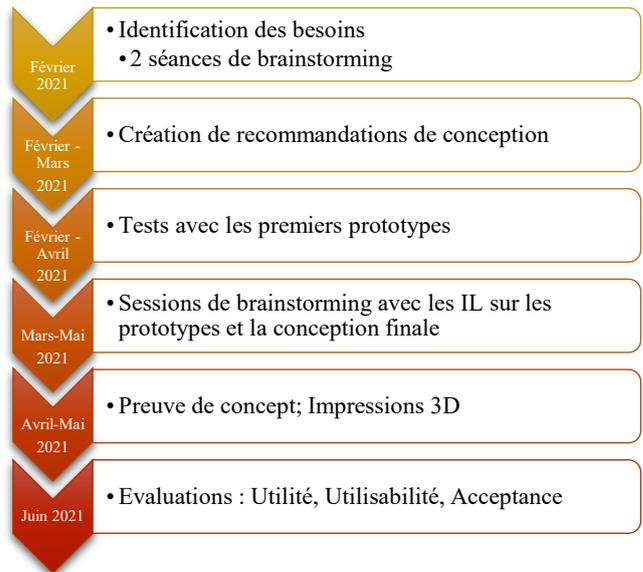


Figure 2 Procédure de conception participative

Les IL se sont montrées toujours disponibles pour répondre à nos questions. Par exemple, lors de la phase de modélisation, nous avions la possibilité de leur envoyer des photos pour avoir leur validation ou bien de les appeler si une question urgente se posait. Elles nous ont également accueilli au centre, malgré leurs emplois du temps surchargés et les conditions liées au Covid-19, afin de faire les vérifications et discuter des réajustements nécessaires ou valider les différents prototypes (pour la hauteur, largeur, texture etc). Ces séances de discussion nous ont permis d'identifier les recommandations de conception suivantes :

- La gare étant très grande, la maquette interactive ne doit contenir que les informations essentielles pour une PDV, c'est-à-dire les acheminements (murs, voies de train et moyens d'accès aux voies (escaliers, ascenseurs, escalators, rampes d'accès, ascenseurs) et les points d'intérêts. Les points d'intérêt de la gare de Bordeaux ont été décrits et repérés sur un plan avec les IL (Figure 3).

⁴ Maquette d'un métro sur 3 niveaux par l'INLB, disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=BpXFPCqPyaY&ab_channel=AMI-t%C3%A9l%C3%A9

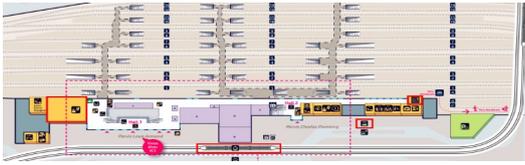


Figure 3 Certains points d'intérêts entourés en rouge

- Les éléments doivent respecter la taille minimale pour être compréhensibles et identifiables au toucher. Les IL ont demandé une hauteur de 6 cm et une largeur de 1.5 cm minimum pour les moyens d'accès afin qu'ils soient facilement identifiables au toucher. Cela induit à une augmentation significative de la taille de la gare si on prend en compte le nombre de ces derniers (48).
- La maquette ne doit pas être trop encombrante. Prenant en compte la recommandation précédente, nous avons décidé de concevoir une maquette assemblable en faisant en sorte que chaque sous-partie puisse être explorée séparément. Cela permettrait aux IL de réaliser un enseignement progressif avec les élèves.
- La maquette doit permettre une exploration isolée des 2 étages (sous-sol, qui donne accès aux voies et rez-de-chaussée). Si possible, les éléments constitutifs de la maquette doivent être dissociables, afin de permettre l'exploration de certaines parties isolément.
- Un espace suffisant pour passer les mains entre les éléments constitutifs doit être respecté pour permettre l'exploration tactile.
- Les IL ont aussi suggéré de créer la maquette avec un système coulissant permettant de régler la hauteur entre les étages et donnant la possibilité de passer les mains entre les étages facilement.
- Les IL ont souhaité que les moyens d'accès aux voies (comme les escalators) soient séparés en deux morceaux attachés aux 1^{er} et 2^{ème} niveaux respectivement. Ainsi, lorsque chaque étage est exploré isolément, l'utilisateur peut percevoir la moitié de l'escalier sur un niveau et retrouver la moitié correspondante sur le 2^{ème} niveau. D'après les IL, cela est crucial pour comprendre le passage d'un niveau à un autre et ainsi l'organisation verticale.
- Le contraste des couleurs doit être pris en compte lors de l'impression, car il s'agit d'un important élément d'identification et de repérage pour les personnes ayant des résidus visuels.
- Les descriptions interactives fournies par la maquette doivent être adaptées en fonction de la déficience visuelle des élèves et leur niveau en mobilité et orientation. Nous avons créé 2 modes d'exploration interactive ; un mode général avec les informations de base, et un autre mode avec plus de détails.
- Les interactions de chacun des deux modes d'exploration doivent être facilement modifiables par les IL.

Les groupes de discussion suivants ont porté sur la réalisation de la maquette et de ses éléments constitutifs.

V. RESULTATS

A. Prototype

En accord avec notre objectif et afin de répondre à notre 2^{ème} question de recherche, nous nous sommes basés sur un prototypage haute-fidélité qui permet de réaliser des dispositifs utilisables, tout en maintenant un faible coût de réalisation. Au niveau logiciel, nous avons utilisé la version gratuite du logiciel Fusion 360 Autodesk pour la modélisation des éléments de la maquette. Au niveau matériel, nous avons utilisé une imprimante 3D Creality CR10-v2 pour les impressions et du filament PLA qui coûte aux alentours de 15€/kg. Le coût de revient matériel de la maquette est aux alentours de 60€ au total. Le prix peu élevé du filament nous a permis de réaliser de nombreux prototypes d'éléments constitutifs de la maquette dans des délais courts. Nous avons réalisé plusieurs dizaines de prototypes afin de valider des caractéristiques techniques et opérationnelles de la maquette. Nous avons observé avec notre participant expert (adulte non-voyant) que 4 marches n'étaient pas suffisantes pour facilement reconnaître la moitié d'un escalier en 3D, nous avons donc doublé le nombre de marches et validé les tailles finales avec les IL. Nous avons procédé de la même façon pour la hauteur et l'épaisseur des murs, car il fallait garder une hauteur suffisante entre les murs et les escaliers pour que l'exploration et la reconnaissance des objets soient faciles. Nous avons proposé aux IL de créer une texture spécifique pour les zones non accessibles de la gare. L'idée a été validée et plusieurs prototypes ont été imprimés afin de trouver la texture qui correspond à nos attentes. Nous avons également réalisé des impressions pour valider la solidité des pièces (comme les queues d'arondes qui servent à assembler deux éléments entre eux).

Lors des dernières itérations de la conception, nous avons le défi d'optimiser le temps d'impression, car les imprimantes 3D sont lentes et chaque couche d'impression rajoute du temps supplémentaire à la conception. Nous avons donc trouvé les tailles minimales nécessaires pour le support (5 mm), pour la profondeur (4 mm) et la hauteur (24 mm) des cylindres qui servent de support, le diamètre du cylindre (12 mm), l'écart pour les queues d'arondes (0.25 mm) etc.

a) Maquette

La maquette est faite de 11x2 éléments assemblables. Nous l'avons découpée de telle sorte que chaque élément ait un intérêt s'il est utilisé séparément. Il y a deux formats d'exploration : le premier format mesure 10 cm de haut et les éléments (comme les moyens d'accès) peuvent tous être assemblés. Le second format repose sur l'ajout de piliers entre les deux étages. Ce second format a une hauteur de 20 cm et permet une exploration plus facile car il y a 15 cm de hauteur entre les 2 étages.

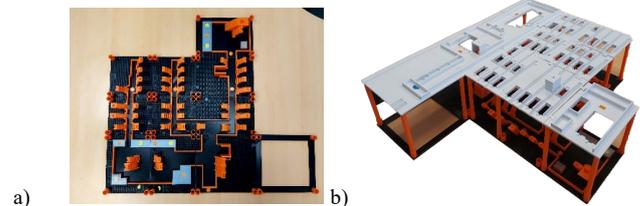


Figure 4 a) Sous-sol de la gare b) Maquette au format « élevé »

b) Les interactions

En ce qui concerne les interactions sonores, les instructrices de locomotion ont décidé d'utiliser le lecteur d'étiquettes PenFriend ; un outil facile à utiliser et peu coûteux qui offre un système d'étiquetage pratique d'enregistrement et réenregistrement pour les PDV. La détection d'une étiquette lance le son correspondant enregistré sur le PenFriend. Les étiquettes sont auto-adhésives, colorées et facilement identifiables par le toucher. Comme ces étiquettes sont très facilement manipulables, les spécialistes envisagent d'ajouter des interactions en fonction des besoins et des compétences spatiales de l'utilisateur déficient visuel. Les IL envisagent également de demander aux utilisateurs d'ajouter eux-mêmes des interactions, car l'effet de génération (en anglais « generation effect ») permet de mieux mémoriser le contenu lorsqu'il est produit par l'utilisateur [40].

Nous avons réalisé des tests pour nous assurer que les espacements sont adaptés au PenFriend, ainsi que les étiquettes sont identifiables sur la texture plastique (PLA). Le coût d'un PenFriend avec 138 étiquettes est de 149€. Le coût de 400 étiquettes est aux alentours de 24€.

c) Adaptabilité de la maquette aux besoins

En réponse à la demande des IL, nous avons créé deux niveaux de difficulté tactile sur la maquette, en ajoutant ou enlevant des couvercles (Fig 5). Le premier niveau de difficulté (avec les couvercles) présente les informations essentielles (acheminements et points d'intérêts, figure 5a). Le deuxième niveau (couvercles retirés, figure 5b) permet à l'utilisateur d'explorer le modèle plus en détail.

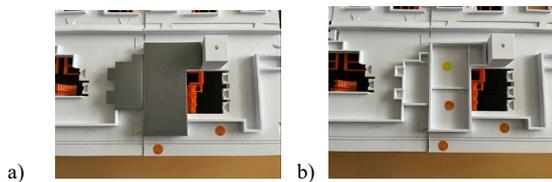


Figure 5 a) Exploration des éléments essentiels de la gare. Certains détails sont masqués par des couvercles b) Les couvercles sont retirés. La maquette présente plus de détails (configuration des salles par ex)

B. Utilité, Utilisabilité et Acceptabilité

Afin de répondre à notre et 3^{ème} question de recherche nous devons évaluer l'utilité, l'utilisabilité, l'acceptation et la satisfaction des IL concernant la maquette réalisée. Nous avons réalisé un entretien semi-dirigé avec les IL, préparé et adapté à partir d'un questionnaire de Venkatesh et d'un questionnaire d'expérience utilisateur de meCUE⁵ [41,42]. Le questionnaire a été envoyé aux professionnels par courriel à l'avance afin qu'elles puissent réfléchir aux réponses, car aucune d'entre elles n'exigeait de réponse spontanée. Le groupe de discussion a duré près de 2 heures pendant lesquelles nous avons été autorisés à enregistrer les réponses.

L'entretien a permis de tirer des conclusions intéressantes et constructives. Les IL ont confirmé que la maquette sera utile

non seulement pour les préparations des séances de locomotion à la gare, mais également pour introduire des notions spatiales complexes à des PDV, telles que « directions de circulation horizontale et verticale, différence entre escalator et ascenseur, ascenseur qui s'ouvre de côtés différents sur chaque niveau, etc. ».

Les IL aiment lorsque les outils permettent une adaptation, un choix des niveaux d'information, de construction et d'interaction (beaucoup ou peu d'éléments interactifs) car « les interactions permettent de proposer la maquette à un maximum d'enfants et d'adultes selon leurs âges et leurs niveaux en M&O ». Elles ont confirmé qu'au vu de la superficie de la gare, la taille de la maquette est très bien puisqu'elle permet de l'explorer correctement : « plus petit, on n'aurait pas pu avoir les détails dont on a besoin et plus grand on ne verrait pas la globalité de l'environnement ». De plus, elles trouvent qu'il est très important de passer de la maquette aux déplacements car l'organisation de l'espace se réalise par expérience corporelle mais la découverte corporelle n'est pas suffisante. En effet, certains PDV pensent que lorsqu'elles se déplacent, le bâtiment bouge avec eux, or « sur la maquette on peut se positionner sur les 2 étages et comprendre que le bâtiment est fixe ».

Les instructrices trouvent l'utilisation de la maquette interactive simple et l'utilisent déjà dans leur pratique professionnelle. En se basant sur les réponses au questionnaire, nous pouvons confirmer que la maquette est utile, utilisable et acceptable de la part des deux instructrices de locomotion.

VI. DISCUSSION

Le but de notre étude était d'observer les besoins des instructrices de locomotion en termes d'enseignement des connaissances spatiales, et de répondre à ces besoins avec des méthodes basées sur le DIY.

Dans une première phase, nous avons observé un manque d'outils adaptés pour les instructrices de locomotion afin qu'elles puissent enseigner les notions d'orientation et de mobilité complexes (comme les étages) et être autonomes dans leur travail. Nous avons également remarqué que les IL manquent de méthodes de conception adaptées pour répondre à leurs besoins. Dans le passé, il y avait des ateliers qui réalisaient des maquettes en carton mais cela est moins fréquent aujourd'hui. L'une des instructrices de locomotion était informée sur la modélisation 3D et l'impression additive, et elle était intéressée par l'apprentissage de ces outils même si cela implique un temps de travail supplémentaire. L'autre instructrice trouvait la modélisation 3D trop compliquée pour s'y pencher. Ce résultat va dans le sens de la recherche de Buenhler *et al*, qui indique que certains professionnels pensent que la modélisation n'est pas leur travail alors que d'autres sont intéressés à se familiariser et acquérir des compétences dans les techniques d'impression 3D [12].

La maquette interactive que nous avons conçue et évaluée est une preuve de concept en réponse à un besoin spécifique. Nos résultats montrent qu'elle est utile, utilisable, et acceptable mais aussi qu'elle procure de la satisfaction chez les IL et les élèves.

⁵ [Modular evaluation of key Components of User Experience](#)

Les résultats suggèrent que ce type d'outil a le potentiel d'améliorer la qualité d'enseignement des connaissances spatiales, d'autant plus qu'elle entre dans un cadre de conception rapide et à faible coût.

Les instructrices nous ont également fait part d'observations préliminaires obtenues avec deux élèves malvoyants du centre avec lesquels elles ont réalisé des séances. Elles notent que la maquette a suscité beaucoup d'intérêt, et donc un plus grand engagement de la part des élèves pendant les séances. De plus, les instructrices observent que les élèves ont eu de meilleurs résultats lors des exercices d'orientation dans la gare après avoir travaillé sur la maquette en classe.

VII. LIMITATIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons mené les évaluations auprès des instructrices qui étaient impliquées dans les phases de conception de l'outil. Notre objectif était de répondre à leur besoin et nous avons suivi leurs recommandations pour la conception, ce qui introduit un biais dans les évaluations. En effet, cette approche a permis de réaliser un outil qui répond à la demande mais ne nous permet pas de généraliser quant à la pertinence de l'approche. Dans la suite de l'étude, nous allons reproduire ce type de conception participative avec d'autres professionnels de la déficience visuelle afin d'avoir plus de recommandations et plus d'observations, ce qui nous permettra de vérifier que les résultats obtenus sont reproductibles. Nous échangerons aussi les dispositifs conçus afin d'avoir des expertises croisées.

Dans cette étude, nous nous sommes basés sur la culture du DIY et des « makers » afin de réaliser un prototype rapidement et à moindre coût. Nous pouvons confirmer que le coût du dispositif en matériel est très bas. Cependant, les impressions 3D sont longues et il nous a fallu entre 2-3 semaines pour imprimer la maquette finale. De plus, le coût de l'imprimante n'est pas rentable si elle n'est pas utilisée régulièrement dans la pratique professionnelle ou personnelle. Il faudra donc vérifier que cette approche peut s'intégrer dans les organisations de travail des centres d'éducation spécialisée. Nous souhaitons notamment proposer des méthodes simplifiées permettant la conception de ces outils par les professionnels eux-mêmes. En effet, la culture du DIY encourage le partage des idées, des modèles, et des méthodes [43]. Nous allons donc proposer des outils de partage de ces méthodes et de ces outils, notamment par la création d'une bibliothèque d'objets constitutifs (escalier, escalator, etc.) qui pourrait permettre d'envisager de faciliter et de réduire le temps nécessaire à la conception.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Centre de Soins et d'Éducation Spécialisée de Alfred Peyrelongue et notamment les deux instructrices de locomotion Carine Briant et Isabelle Campaignolle. Nous tenons également à remercier Théophile Vier, ainsi que le laboratoire Cherchons pour Voir.

REFERENCES

- [1] T. M. Aciem and M. J. da S. Mazzotta, "Personal and social autonomy of visually impaired people who were assisted by rehabilitation services," *Revista Brasileira de Oftalmologia*, vol. 72, no. 4, pp. 261–267, Aug. 2013, doi: 10.1590/S0034-72802013000400011.
- [2] M. A. Espinosa and E. Ochaíta, "Using Tactile Maps to Improve the Practical Spatial Knowledge of Adults who are Blind," *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 92, no. 5, pp. 338–345, 1998, doi: 10.1177/0145482X9809200512.
- [3] S. Ungar, M. Blades, and C. Spencer, "The role of tactile maps in mobility training," *British Journal of Visual Impairment*, vol. 11, no. 2, pp. 59–61, 1993, doi: 10.1177/026461969301100205.
- [4] S. Ungar, "Cognitive mapping without visual experience," *Kitchin, R. & Freundschuh, S. (eds) Cognitive Mapping: Past Present and Future. London: Routledge*, pp. 221–248, Oct. 2000, doi: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9781315812281/cognitive-mapping-rob-kitchin-scott-freundschuh>.
- [5] B. L. Bentzen, "Production and testing of an orientation and travel map for visually handicapped persons.," *New Outlook for the Blind*, vol. 66, pp. 249–255, 1972.
- [6] M. Brambring and C. Weber, "Taktile, verbale und motorische Informationen zur geographischen Orientierung blinder. (Tactile, verbal and motor information on the geographic orientation of the blind).," *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, vol. 28, no. 1, pp. 23–37, 1981.
- [7] S. Millar, "Understanding and Representing Space : Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children," *Understanding and Representing Space Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children*, Apr. 1994, doi: 10.1093/ACPROF:OSO/9780198521426.001.0001.
- [8] S. Millar, "Understanding and representing spatial information: Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted children," <http://dx.doi.org/10.1177/026461969501300102>, vol. 13, no. 1, pp. 8–11, Jun. 1995, doi: 10.1177/026461969501300102.
- [9] N. Lewi-Dumont, *Enseigner à des élèves aveugles ou malvoyants*. 2016. Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://www.firah.org/fr/notice/791/enseigner-a-des-eleves-aveugles-ou-malvoyants.html>
- [10] M. E. Bausch, J. E. Mittler, T. S. Hasselbring, and D. P. Cross, "The Assistive Technology Act of 2004: What Does It Say and What Does It Mean?," *Physical Disabilities: Education and Related Services*, vol. 23, no. 2, pp. 59–67, 2005.
- [11] C. F. Karbowski, "See3D: 3D Printing for People Who Are Blind," *Journal of Science Education for Students with Disabilities*, vol. 23, no. 1, p. 6, Feb. 2020, doi: 10.14448/jesed.12.0006.
- [12] E. Buehler et al., "Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education," *ACM Transactions on*

- Accessible Computing (TACCESS)*, vol. 8, no. 3, pp. 1–28, Mar. 2016, doi: 10.1145/2870640.
- [13] A. Hurst and S. Kane, “Making ‘Making’ accessible,” *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 635–638, 2013, doi: 10.1145/2485760.2485883.
- [14] E. Brule and G. Bailly, “Beyond 3d printers: Understanding long-term digital fabrication practices for the education of visually impaired or blind youth,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pp. 1–15, May 2021, doi: 10.1145/3411764.3445403.
- [15] A. Hurst and J. Tobias, “Empowering individuals with do-it-yourself assistive technology,” *ASSETS’11: Proceedings of the 13th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 11–18, 2011, doi: 10.1145/2049536.2049541.
- [16] S. Giraud and C. Jouffrais, “Empowering Low-Vision Rehabilitation Professionals with ‘Do-It-Yourself’ Methods,” in *International Conference on Computers for Handicapped Persons*, 2016, vol. 7382, pp. 61–68. doi: 10.1007/978-3-319-41267-2_9.
- [17] O. Metatla, S. Bardot, C. Cullen, M. Serrano, and C. Jouffrais, “Robots for Inclusive Play: Co-designing an Educational Game With Visually Impaired and sighted Children,” 2020. doi: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376270>.
- [18] N. Banovic, R. L. Franz, K. N. Truong, J. Mankoff, and A. K. Dey, “Uncovering information needs for independent spatial learning for users who are visually impaired,” *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS 2013*, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1145/2513383.2513445/FORMAT/PDF.
- [19] A. E. Bigelow, “Blind and Sighted Children’s Spatial Knowledge of Their Home Environments,” *International Journal of Behavioral Development*, vol. 19, no. 4, pp. 797–816, Jun. 1996, doi: 10.1177/016502549601900407.
- [20] W. R. Wiener, R. L. Welsh, and B. B. Blasch, “Foundations of orientation and mobility, 3rd ed. History and theory, Instructional strategies and practical applications.,” vol. 1, 2010.
- [21] Y. Hatwell, “Appréhender l’espace pour un enfant aveugle,” *Enfances et Psy*, vol. 33, no. 4, pp. 69–79, 2018, doi: 10.3917/ep.033.0069.
- [22] J. Mulet *et al.*, “Évaluation d’un dispositif audio-tangible pour l’apprentissage spatial chez les enfants déficients visuels,” pp. 157–162, Nov. 2020, Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02926462>
- [23] A. M. Brock, P. Truillet, B. Oriola, D. Picard, and C. Jouffrais, “Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People,” *Human-Computer Interaction*, vol. 30, pp. 156–194, 2014.
- [24] L. Holloway, K. Marriott, and M. Butler, “Accessible Maps for the Blind: Comparing 3D Printed Models with Tactile Graphics,” *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1145/3173574.3173772.
- [25] M. D. Lozano, V. M. R. Penichet, B. Leporini, and A. Fernando, “Tangible user interfaces to ease the learning process of visually-impaired children,” *Proceedings of the 32nd International BCS Human Computer Interaction Conference, HCI 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.14236/EWIC/HCI2018.87.
- [26] S. R. Klemmer, B. Hartmann, and L. Takayama, “How Bodies Matter: Five Themes for Interaction Design,” *Proceedings of the 6th ACM conference on Designing Interactive systems - DIS ’06*, pp. 140–149, 2006, doi: 10.1145/1142405.
- [27] P. Dourish, *Where the action is: the foundations of embodied interaction*. MIT Press, 2001. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/513034>
- [28] R. J. K. Jacob, H. Ishii, G. Pangaro, and J. Patten, “A Tangible Interface for Organizing Information Using a Grid,” *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems Changing our world, changing ourselves - CHI ’02*, pp. 339–346, 2002, doi: 10.1145/503376.
- [29] P. Marshall, “Do tangible interfaces enhance learning?,” *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI ’07*, pp. 163–170, 2007, doi: 10.1145/1226969.
- [30] S. Giraud, A. M. Brock, M. J. M.-M. Macé, and C. Jouffrais, “Map learning with a 3D printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students,” *Frontiers in Psychology*, vol. 8, p. 10, Jun. 2017, doi: 10.3389/fpsyg.2017.00930.
- [31] E. Brulé, G. Bailly, A. Brock, F. Valentin, G. Denis, and C. Jouffrais, “MapSense: Multi-Sensory Interactive Maps for Children Living with Visual Impairments,” in *International Conference for Human-Computer Interaction (CHI 2016)*, 2016, pp. 445–457. doi: 10.1145/2858036.2858375.
- [32] D. Palivcová, M. Macík, and Z. Míkovec, “Interactive tactile map as a tool for building spatial knowledge of visually impaired older adults,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pp. 1–9, Apr. 2020, doi: 10.1145/3334480.3382912.
- [33] P. Boytchev and S. Boytcheva, “Designing 3D-printer Models for Students with Vision Impairment or Low Vision,” *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, pp. 227–230, Sep. 2021, doi: 10.1109/ICAI52893.2021.9639556.
- [34] N. Al-Rajhi, A. Al-Abdulkarim, H. S. Al-Khalifa, and H. M. Al-Otaibi, “Making linear equations accessible for visually impaired students using 3D printing,” *Proceedings - IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies: Advanced*

- Technologies for Supporting Open Access to Formal and Informal Learning, ICALT 2015*, pp. 432–433, Sep. 2015, doi: 10.1109/ICALT.2015.46.
- [35] F. Kensinger and J. Blomberg, “Participatory Design: Issues and Concerns,” *Computer Supported Cooperative Work*, vol. 7, no. 3–4, pp. 167–185, 1998, doi: 10.1023/A:1008689307411.
- [36] V. Mitchell, T. Ross, A. May, R. Sims, and C. Parker, “Empirical investigation of the impact of using co-design methods when generating proposals for sustainable travel solutions,” *CoDesign*, vol. 12, no. 4, pp. 205–220, Oct. 2015, doi: 10.1080/15710882.2015.1091894.
- [37] J. Trischler, S. J. Pervan, S. J. Kelly, and D. R. Scott, “The Value of Codesign: The Effect of Customer Involvement in Service Design Teams,” *Journal of Service Research*, vol. 21, no. 1, pp. 75–100, Feb. 2018, doi: 10.1177/1094670517714060.
- [38] J. Howard, Z. Fisher, A. H. Kemp, S. Lindsay, L. H. Tasker, and J. J. Tree, “Exploring the barriers to using assistive technology for individuals with chronic conditions: a meta-synthesis review,” <https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1788181>, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1080/17483107.2020.1788181.
- [39] B. Phillips and H. Zhao, “Predictors of assistive technology abandonment,” *Assistive technology : the official journal of RESNA*, vol. 5, no. 1, pp. 36–45, Jun. 1993, doi: 10.1080/10400435.1993.10132205.
- [40] S. Bertsch, B. J. Pesta, R. Wiscott, and M. A. McDaniel, “The generation effect: a meta-analytic review,” *Memory & cognition*, vol. 35, no. 2, pp. 201–210, 2007, doi: 10.3758/BF03193441.
- [41] V. Venkatesh, M. G. Morris, G. B. Davis, and F. D. Davis, “User acceptance of information technology: Toward a unified view,” *MIS Quarterly: Management Information Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 425–478, 2003, doi: 10.2307/30036540.
- [42] C. Lallemand and V. Koenig, “‘How could an intranet be like a friend to me?’ - Why standardized UX scales don’t always fit,” *ACM International Conference Proceeding Series*, vol. Part F131193, pp. 9–16, Sep. 2017, doi: 10.1145/3121283.3121288.
- [43] P. Baudisch and S. Mueller, “Personal fabrication: State of the art & future research,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, vol. 07-12-May-2016, pp. 936–939, May 2016, doi: 10.1145/2851581.2856664.

Préserver le self et l'autonomie des personnes atteintes par une maladie neuro-évolutive à travers le construit socio-technique de médiation Mementop

Julie Golliot

Smart Macadam & Laboratoire IMSIC
Nantes & Toulon, France
julie.golliot@smartmacadam.com

Laurent Maury

Smart Macadam
Nantes, France
laurent.maury@smartmacadam.com

Abstract— La préservation de l'autonomie des personnes atteintes par une maladie neuro-évolutive telle que la maladie d'Alzheimer ainsi que le soulagement de la charge mentale pesant sur leurs aidants représente un enjeu sociétal éthique, économique et social. Pour contribuer à y répondre, un consortium interdisciplinaire impliquant experts médicaux, chercheurs et utilisateurs finaux a été créé afin de co-spécifier et de développer le construit socio-technique Mementop. S'adressant à l'intégralité de l'écosystème aidé (patient) – aidants – professionnels de santé, il rassemble au sein d'une expérience utilisateur unifiée l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à ces acteurs tout en permettant à l'aidé de rester acteur de son quotidien. Mementop est un dispositif médical certifié qui s'articule autour d'une application pour smartphone partagée entre tous les acteurs de cet écosystème centré sur l'aidé, un produit presse imprimé multi-sensoriel et personnalisable ainsi qu'un service d'assistance aux utilisateurs. Si la première version de ce dispositif est disponible, la recherche se poursuit autour de l'acceptabilité par les seniors, les évolutions de l'interface ainsi qu'autour des techniques avancées en IA pour aboutir à un compagnon intelligent basé sur un modèle prédictif de l'évolution des MNE.

Keywords—Maladies neuro-évolutives; Autonomie; Charge mentale ; Construit socio-technique ; Stimulation ; Lien social.

I. INTRODUCTION & CONTEXTE

Selon l'OMS, d'ici 2030, plus d'un milliard de personnes dans le monde seront âgées de 65 ans et plus. Le *ministère des Solidarités et de la Santé* affirme que la France comptait en 2021 2,5 millions de personnes âgées en situation de perte d'autonomie, ce chiffre devant en toute vraisemblance passer à 3 millions de personnes d'ici 2030, date à laquelle les plus de 60 ans représenteront 21 millions d'individus, contre 18,5 millions aujourd'hui. 1,4 millions de français sont touchés par une maladie neuro-évolutive (MNE) telle que la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer et les maladies apparentées. Chaque année, 250.000 nouveaux cas de la maladie d'Alzheimer sont diagnostiqués. Selon *France Alzheimer*, 51% des personnes malades vivent à leur domicile et 30% supplémentaires sont hébergées par un proche aidant. Ainsi, moins de 25% des sujets concernés sont hospitalisés ou

accueillis en milieu spécialisé, à l'instar des EHPADs. Aucun traitement médical curatif n'a prouvé une quelconque efficacité clinique. Les traitements médicamenteux disponibles exercent pourtant une pression considérable sur les systèmes de santé ; en France, ces traitements ont été *déremboursés* en août 2019.

Bien que les étiologies diffèrent, les différentes MNE ont quelques symptômes en commun. L'amnésie se présente notamment sous trois formes. Les troubles de la mémoire épisodique tout d'abord, concernent les événements vécus et apparaissent souvent en premier. Le sujet oublie ce qu'il a fait récemment, ce qu'il a mangé à midi ou encore ce qu'il a prévu de faire dans l'après-midi. Les troubles de la mémoire de travail ensuite, témoignent généralement d'une atteinte précoce. Les patients éprouvent des difficultés à retenir un numéro de téléphone le temps de le noter, à mémoriser des indications pour trouver leur chemin ou encore à faire du calcul mental. Enfin, les troubles de la mémoire sémantiques apparaissent la plupart du temps à un stade plus avancé de la maladie. Cela concerne les automatismes gestuels permettant par exemple d'ouvrir une porte, d'enfiler un pull ou de s'alimenter correctement.

D'autres symptômes sont à considérer. Nous citerons l'aphasie progressive, touchant la connaissance des mots, la syntaxe et l'élocution, ce qui nuit à la communication. L'apraxie, ou difficultés motrices, cause des maladrotes gestuelles, l'oubli de la manière dont manipuler un objet ou encore la perte de sensation. Les gestes de la vie quotidienne en sont considérablement complexifiés. Enfin, l'agnosie se présente sous forme de confusion mentale provoquant une non-reconnaissance des visages ou des objets, entraînant des postures d'indifférence, de mutisme ou d'agressivité.

Les contraintes et difficultés d'ordres psychologique et affectif vécues par les personnes concernées découlent de ces troubles cognitifs et mnésiques : (1) Diminution sensible et progressive de l'estime de soi (honte, gêne, auto-dévalorisation); (2) Sentiment de perte de contrôle, de décrochage et d'inconfort (je ne sais plus rien faire seul, je me sens dépassé et blessé, etc.); (3) Sentiment de dépendance (au moins dans les premiers stades de développement de la

maladie) vis-à-vis d'autres personnes, notamment des proches-aidants du sujet concerné.

Selon la Haute Autorité de Santé, plus de 80% des personnes atteintes de MNE en France souffrent de solitude ou d'isolement, tandis que 75% d'entre elles expriment le souhait de rester le plus longtemps possible à leur domicile. Les attentes communément exprimées par les sujets concernés peuvent être factorisées. Il s'agit du souhait de demeurer à son domicile le plus longtemps possible ; du souhait de préserver son indépendance le plus longtemps possible et de ne pas dépendre totalement des proches-aidants bien qu'une aide au quotidien puisse être nécessaire ; du souhait de ne pas blesser ses proches-aidants, notamment les membres de la famille et les amis proches ; du souhait d'occuper son temps libre.

Les troubles liés aux MNE, tant cognitifs que mnésiques, ont ainsi un retentissement fort sur le quotidien des patients et nuisent à leur autonomie. Les proches et les aidants dénoncent fréquemment un sentiment d'épuisement. Le bouleversement familial systémique conduit désormais à considérer le tandem aidant/aidé et non uniquement le patient.

Le succès du développement d'initiatives qualifiées de numériques – c'est-à-dire, s'appuyant sur des dispositifs logiciels et/ou matériels – et la conduite de nombreux travaux de recherche mettent en évidence l'intérêt qui résulte de l'utilisation d'outils numériques pour compenser la perte d'autonomie, notamment par le biais de dispositifs de transpositions sensorielles, pour les personnes souffrant d'un handicap ou caractérisées par une autonomie diminuée [1]. La recherche de solutions adaptées aux problèmes liés à la compensation du handicap ou à la perte d'autonomie mobilise plusieurs dizaines de laboratoires en France. De grands progrès ont été réalisés ces dernières années en nanoélectronique et dans le domaine de l'apprentissage profond, notamment en ce qui concerne les algorithmes mathématiques permettant d'accroître la vitesse d'apprentissage de réseaux de neurones. Bien que les utilisateurs âgés puissent éprouver des difficultés, de la peur ou du rejet concernant l'utilisation des technologies numériques, une forte valeur ajoutée d'usage et une parfaite cohérence d'expérience entre chaque fonction permet de faire appel à ces outils [2], [3]. En 2021, 78% des 60-69 ans et 59% des 70 ans possèdent un smartphone.

Agir sur la préservation de l'autonomie ou encore sur le retardement de l'apparition d'une situation de dépendance impose de travailler autour de six axes : la préservation de la santé ; la préservation de la mémoire ; la préservation de la sécurité ; la préservation de l'estime de soi ; la préservation du lien social avec les proches ; le maintien de la mise en place de projet, le fait de demeurer actif.

La voie médicamenteuse ne semblant pas constituer une solution adaptée dans un avenir proche, il convient d'explorer d'autres voies, notamment en exploitant des dispositifs numériques capables d'impliquer les sujets malades, leurs proches-aidants et, le cas échéant, les personnels de santé. L'objet du programme de recherche baptisé Mementop est de

spécifier une solution utilisant l'intelligence permise par le numérique et permettant :

- Au patient de rester autonome, actif, en sécurité, en lien avec ses proches et à domicile le plus longtemps possible ainsi que de préserver, voire de renforcer le lien social au sein de la dyade (aidé-aidants) ;
- De soutenir les aidants et de réduire la charge mentale qui pèse sur eux ;
- D'informer les professionnels de santé pour améliorer l'efficacité leur prise en charge et les soins de support.

II. MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à cette problématique interdisciplinaire, un consortium a été formé. Il impliquait deux chercheurs internes à l'entreprise portant le projet, un comité scientifique composé de deux gériatres, de deux neurologues, d'un mathématicien et d'un expert en IHM, six laboratoires pluridisciplinaires (Data Science, Informatique, Neuropsychologie, Sciences de l'Information et de la Communication, Design) ainsi que des utilisateurs potentiels (associations, familles, malades).

Le Comité Scientifique a pris part à l'indispensable effort d'idéation caractérisant tout projet de recherche. Cet espace privilégié de partage des savoir-faire et expertises de chaque contributeur a permis la contribution à la recherche de solutions spécifiques, en fonction de l'avancement des travaux. La validation et l'amélioration des solutions envisagées, notamment en matière de création de dispositifs de stimulation des facultés cognitives et mnésiques des sujets malades, ont également eu lieu dans ce cadre. Le comité a de plus contribué à la définition d'une méthodologie d'étude et de test de certaines hypothèses de travail, grâce notamment à la contribution bénévole et délibérée de certains sujets malades. Enfin, il a facilité et encadré la conduite, le suivi et l'interprétation de ces mêmes tests.

L'inclusion des usagers dans la conception d'une telle solution était indispensable, notamment dans l'identification des questions relatives à l'ergonomie des solutions envisagées, à l'instar du choix des modes de commandes des dispositifs numériques. De telles méthodes de recherche, incluant les usagers dans une démarche interdisciplinaire de conception, favoriseraient l'adéquation entre les perceptions et envies d'amélioration de l'innovateur avec celles des usagers ciblés. Elles garantiraient une innovation qui se mettrait effectivement à leur service (et par rebond, au service de tous) [4].

Menée depuis 2017, la recherche s'est déroulée en deux phases : la première consistant en des observations et études préalables et aboutissant à une conception théorique ; la deuxième, itérative, se présentant sous forme d'une conception initiale puis d'un nombre arbitraire de conceptions intermédiaires.

A. Phase 1

1) Observations et études préalables

a) *État de l'art* : Un corpus de textes et de documents de référence a été établi, le recueil de données étant effectué sur

différentes plateformes de partage et de diffusion des connaissances notamment CAIRN, ERUDIT, PERSEE, WORDCAT, le catalogue SUDOC et la plateforme ISIDORE. Les données collectées ont été classifiées et structurées en arbres thématiques et partagées avec le consortium afin d'y être débattues en sessions plénières ou par groupe en fonction des sujets traités. Les recherches dans ce domaine sont nombreuses mais peu ont pour objectif ou parviennent à aboutir à une solution commercialisée ou encore mise à disposition des patients ou de leurs proches. Les solutions sur le marché existent néanmoins mais il est rare qu'elles fassent l'objet d'une validation scientifique. Nous pouvons notamment citer les agendas et les coffres-forts numériques, non spécifiquement adaptés aux personnes touchées par une MNE ; les solutions d'information et d'accompagnement des aidants (Tylia, Lilismart) parcellaires et limités aux aidants ; de nombreuses offres de stimulation des fonctions cognitives (MindMate, Luminosity, AmuseIT, Exostim) aucune n'offrant de preuve d'efficacité clinique ; des chatbots se substituant pour les questions triviales à un aidant épuisé (Alzh Calls, EbnBot). Aucune solution ne s'adresse toutefois au malade et à ses aidants, ne propose un périmètre fonctionnel étendu ou encore ne propose un compagnon intelligent et personnalisé mettant en œuvre le calcul d'indicateurs cliniques de santé (isolement social, dénutrition, estime de soi, etc.). Enfin, l'importance de la réflexion autour des interactions hommes-machines (IHM) et de l'ergonomie des interfaces pour une population âgée a été longuement analysée.

b) Recensement des besoins et attentes de la personne fragilisée : Entre 2017 et 2018, les attentes des sujets touchés par la maladie d'Alzheimer ou par la maladie de Parkinson ont été cartographiées en fonction du stade de la maladie. Au stade 1, les patients sont enclins à « *refuser de se laisser dominer par la maladie, à rester actifs* » et se tournent vers les dispositifs de stimulation cognitive et mnésique. Au stade 2, ils demandent en plus une aide autonome, n'impliquant aucun tiers, leur permettant de pallier les risques d'oublis de tâches ou d'actions, ainsi qu'un dispositif de stockage d'informations qu'ils jugent susceptibles d'oublier et qui contribuent à la préservation de leur autonomie (codes, mots de passe, recette de cuisine, modes d'emploi d'appareils électroménagers, etc.). Aux stades 3, 4 et 5, représentant la cible principale de cette recherche, une analyse poussée à l'aide de *personae* a été effectuée. Elle révèle des attentes similaires bien qu'acruées avec une appétence plus ou moins prononcée pour les technologies numériques et l'appui plus ou moins fort des proches aidants. Enfin, au-delà du stade 5, les risques d'aphasie et/ou d'apraxie constituent de sérieux obstacles quant à l'utilisation d'un dispositif digital. L'apport des fonctions proposées touche alors essentiellement des proches-aidants pour contribuer à leur simplifier la tâche tout en améliorant l'efficacité de leurs contributions individuelles et collectives.

c) Recensement des besoins et attentes des parties prenantes intervenant dans l'accompagnement de la personne fragilisée : En France, près de 3,5 M de personnes assument un rôle de proche-aidant auprès d'au moins une personne malade ou dépendante. En moyenne, chaque proche-aidant consacre

6,5 heures par jour aux sujets dont il s'occupe. Le stress, une impression de solitude et une impression d'impuissance sont décrits de manière récurrente par les proches-aidants de personnes atteintes d'une MNE. Deux sessions de focus-group menées auprès de quatre groupes d'aidants ont été réalisées. Leurs attentes sont déclinées autour de cinq axes : se rassurer et gérer son stress ; localisation du proche ; communication avec le proche ; porter assistance au proche ; possibilité de mettre en place une organisation collective.

d) Identification des processus et cartographie des interactions existantes : Une cartographie des inter-relations existantes a été établie. Nous pouvons citer la relation (1) réflexive de l'aidé et son rapport au self, reflétant en partie son bien-être, son sentiment, sa confiance de soi et la notion active de conscience de l'être. Elle englobe également les possibilités d'actions thérapeutiques sur les aptitudes de l'aidé. La relation (2) entre un aidé et un aidant est au cœur des interpellations sociétales sur la situation du patient. Elle contribue à l'indispensable maintien du lien social. Culturellement dominante, elle provoque une assimilation simpliste de la parole de l'aidant à celle de l'aidé. La relation (3) avec le professionnel de santé comprend trois processus. Le premier est sociétal, avec une attente envers le professionnel à qui un certain confort de vie est confié. Le deuxième est psychologique, résultant des relations familiales. Le dernier est socio-professionnel, la formation du soignant n'étant pas toujours suffisante ainsi que sujette à des maladroites et à des incompréhensions.

2) Conception théorique :

a) Hypothèses et définition des protocoles de collecte et d'interprétation des données : Les données sociographiques et anthropologiques recueillies au cours des expérimentations permettent d'envisager de nouvelles hypothèses et de réviser les modèles théoriques en matière d'accompagnement des personnes fragiles. La mise en perspective de ces données et des potentialités technologiques permettent également de faire évoluer les outils et services intégrés à l'environnement. Le respect de la RGPD par l'ensemble des composants et des processus mis en œuvre constitue de plus une obligation primordiale et prioritaire [5]. Un hébergement de type « *Hébergement de Données de Santé* » (HADS) est impératif.

b) Modélisation théorique : Sept principaux cas d'usage ont été identifiés pour la conception d'une plateforme numérique dynamiquement évolutive et adaptable, tant centrée sur le patient que sur ses proches-aidants. L'identification du premier périmètre fonctionnel a permis d'émettre des hypothèses de solutions technologiques à expérimenter. L'accessibilité est également un élément déterminant et doit être hautement considéré dans l'évaluation d'une application pour smartphones [6]. Les normes et travaux de recherche menés dans le contexte de la maladie d'Alzheimer et des recommandations du WCAG permettent une évaluation des paramètres d'accessibilité des fonctionnalités d'une application destinée à un groupe d'utilisateurs clairement défini à l'aide d'un prédicat collectivisant. L'accessibilité a été évaluée dès que possible. L'utilisabilité a ensuite été étudiée à travers une

évaluation experte basée sur un ensemble d'heuristiques d'utilisation comprenant cinq composantes principales [7] : apprenabilité ; mémorabilité ; efficacité ; erreurs ; satisfaction. Ces évaluations furent menées en partenariat étroit avec des associations, des familles et des personnes fragiles, notamment atteintes de la maladie d'Alzheimer.

c) *Expérimentations et analyse* : Les différentes hypothèses ont été expérimentées auprès du comité scientifique ainsi que des patients et de leurs proches-aidants. L'analyse des résultats a permis d'ajuster tant le périmètre fonctionnel que les IHM envisagées.

B. Phase 2

Une série d'itérations a eu lieu, chacune suivant la même logique et donnant naissance à une version enrichie du dispositif. Dans un premier temps, les hypothèses et la définition des protocoles de collecte et d'interprétation des données étaient effectuées. Elles permettaient la spécification et la modélisation des nouvelles fonctionnalités ou des ajustements nécessaires pour les fonctionnalités existantes. Le prototype était alors développé, testé en interne, soumis au comité scientifique puis expérimenté auprès de patients et de leurs proches-aidants. Les résultats étaient analysés et lorsqu'ils étaient satisfaisants l'implémentation finale était faite pour que la version enrichie soit mise à la disposition des utilisateurs.

III. RÉSULTATS

Cette recherche a donné naissance à un Dispositif Médical Certifié CE baptisé Mementop, s'intéressant à l'écosystème formé par un malade (aidé), ses aidants et les professionnels de santé impliqués dans sa prise en charge ou son suivi [8].

Mementop est un construit socio-technique qui s'articule autour de trois composantes :

- Une application pour smartphones, centrée sur l'aidé et partagée avec un nombre arbitraire d'aidants ;
- Un produit presse imprimé bimensuel, personnalisable par les aidants ;
- Un service d'assistance aux utilisateurs, librement accessible à chacun des membres de l'écosystème.

Afin de valoriser le statut « d'acteur » de l'aidé, chaque écosystème {Aidé A, Aidants, Professionnels de Santé} est appelé *tribu de A*. Une tribu s'articule ainsi autour de la personne aidée (A), que l'on nomme *chef de tribu*, et de ses aidants, baptisés *veilleurs de A*, Mementop permettant d'accueillir un nombre arbitraire de ces derniers. Le chef de tribu A peut alors gérer sa tribu, c'est-à-dire inviter les aidants de son choix ou de les révoquer. Le chef de tribu est libre de promouvoir un veilleur au grade d'*éclaireur*. Les éclaireurs de A disposent de privilèges spécifiques en matière d'accès aux informations publiées au sein de la tribu de A et peuvent ainsi consulter les éléments confidentiels.

A. Description de l'application Mementop

La première version de Mementop a vu le jour fin 2021. Elle propose, via une expérience utilisateur unifiée, les fonctions clés apportant des réponses pratiques aux enjeux fonctionnels identifiés (figure 1). Chacun des éléments contenus dans

l'application repose sur les règles de confidentialité décrites plus haut.

1) *L'agenda partagé d'activités* contient des événements. Ceux-ci sont partagés par les membres de la tribu et synchronisés instantanément. L'agenda permet une visualisation des activités de la journée avec des repères temporels simplifiés. L'aidé peut s'organiser, communiquer avec ses proches, demeurer actif, être guidé ou accompagné et être rassuré. Un fil dédié d'une messagerie instantanée intégrée est adossé à chaque événement afin de faciliter la communication tribale et d'éviter toute déperdition d'informations.

Chaque événement possède les caractéristiques suivantes : *Confidentialité* : {privé – confidentiel – non marqué} ; *Titre* ; et *Moment* : Date et {Heure de début, durée} ou plage horaire, la récurrence étant également programmable. Sont optionnels l'*Adresse* (guidage possible jusqu'au lieu indiqué), la *Description*, le *Marquage* (permet d'indiquer que le chef de tribu doit affirmer qu'un événement a bien été réalisé) et le *Rappel* (Par défaut 10 minutes avant le début de l'événement). Exemples : rendez-vous, prise de médicaments, anniversaires, visites prévues, appels téléphoniques à passer ou à recevoir.

2) *Les mémos* constituent un coffre-fort numérique partagé, dédié au stockage sécurisé d'informations dont la perte serait préjudiciable à l'autonomie de l'aidé. Ils sont ainsi utilisables à tout moment et simples à retrouver. Une taxonomie rudimentaire est proposée : codes, mots de passe, prescriptions médicales, notes, modes d'emploi. Chaque mémo peut contenir une séquence (liste ordonnée) d'items ou d'étapes, à l'instar d'une recette de cuisine ou du mode d'emploi d'une machine à café. Deux modes de consultation des mémos sont proposés. Le mode classique permet d'accéder au détail du mémo. Le mode « jouer » permet de parcourir une à une les étapes associées au mémo, chacune d'elle étant présentée en plein écran, le passage à l'étape n+1 (si elle existe) n'étant possible qu'après confirmation de prise en compte (de réalisation) de l'étape n par l'utilisateur. Particulièrement utile pour un mémo de type « mode d'emploi », cette option de visualisation facilite la réalisation d'activités procédurales qui posent parfois des difficultés aux personnes en situation de déclin cognitif.

Chaque mémo est caractérisé par les informations suivantes : *Confidentialité* : {privé – confidentiel – non marqué} ; *Titre* ; *Étapes* : séquence ordonnée contenant un nombre arbitraire (1-n) d'éléments de type : *Texte* ou *Image*.

Exemples : mot de passe, code d'un digicode, mode d'emploi d'une cafetière ou d'un lave-linge, liste des courses.

3) *L'album de souvenirs* est un espace de stockage et de partage de médias (photos datées, associées à un lieu et à une légende) entre les membres de la tribu. Il permet de partager des instants de vie, des émotions, des souvenirs, des événements, des passions, etc.

Chaque souvenir est caractérisé par les éléments suivants : *Confidentialité* : {privé – confidentiel – non marqué} ; *Photo* ; *Description* ; Identité du contributeur. La *Date* est optionnelle.

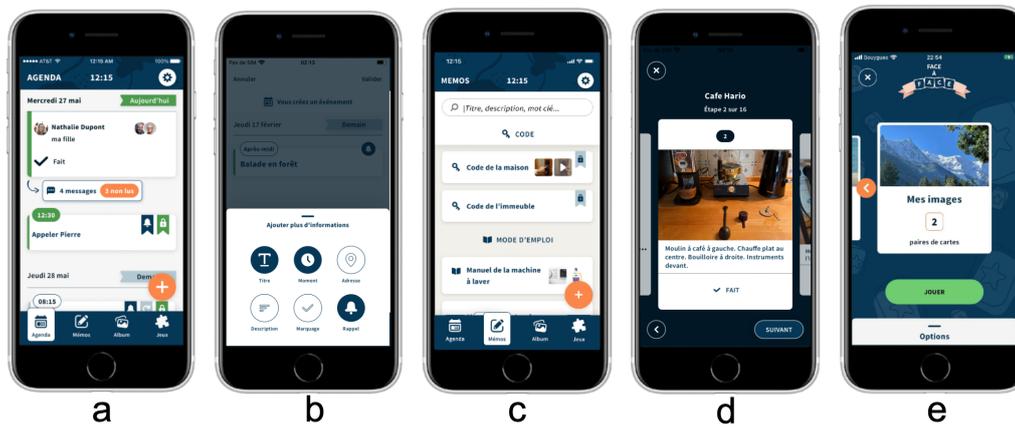


Figure 1 : Espaces fonctionnels de Mementop. a : Agenda d'activités ; b : Tiroir de configuration ; c : Détails d'un mémo ; d : Album de souvenirs ; e : Jeux

4) Les jeux ont été conçus avec l'aide de neurologues et d'experts des MNE pour optimiser le niveau d'engagement de l'utilisateur tout en stimulant sa mémoire et ses capacités cognitives et en évitant toute situation d'échec. Ils prennent en compte les références culturelles et les centres d'intérêt des utilisateurs. Le niveau de jeu est ajustable.

Deux jeux sont disponibles dans la version 1 de l'application. Le Mot à mot est une adaptation du célèbre jeu de lettre « Boggle ». Il s'agit de trouver un maximum de mots en formant des chaînes de lettres à partir d'un plateau contenant 16 dés. Le Face à face est une adaptation du jeu de mémoire des paies « Memory ». Il s'agit de reformer des paires d'images identiques. L'application propose de nombreux thèmes et permet également de jouer avec les images réunies par la tribu dans son album de souvenirs. Cette option maximise l'empreinte émotionnelle du jeu.

B. Description du produit presse imprimé : gazette Mementop

La gazette papier bimensuelle vise à procurer des repères temporels, à favoriser le lien social et à stimuler l'aidé (et ses aidants) au travers d'activités spécifiquement étudiées pour l'engager et lui permettre d'être actif au quotidien, tout en participant à la préservation de l'autonomie. À travers les activités proposées, l'ambition est de valoriser les compétences de l'aidé et de lui procurer des moments de plaisir tout au long de la semaine. Le papier, élément connu, rassurant et apprécié des séniors, favorise une sollicitation tactile et le partage entre les membres de la tribu. Chaque numéro de 16 pages de la gazette Mementop est déclinée autour d'une thématique spécifique proche des aidés.

1) Pour guider le chef de tribu (aidé) et accroître son autonomie, une demie-page par journée est dédiée à l'indication de repères spatio-temporels à savoir la date du jour en toutes lettres (nom du jour de la semaine + dd mm aaaa), l'éphéméride, les heures de lever et de coucher du soleil, le temps de jour en plus ou en moins, la phase de la lune et deux colonnes à compléter avec les activités : une pour le matin et l'autre pour l'après-midi. Une activité de gymnastique douce est également proposée pour prendre soin de son corps. Enfin, une recette de

cuisine est spécifiquement formulée de manière à permettre à l'aidé de la réaliser malgré ses troubles neuro-évolutifs.

2) Pour apaiser le chef de tribu et accroître le lien social, des photos peuvent être personnalisées par les aidants directement via l'application Mementop. Une activité de réminiscence encourage le partage de souvenirs. Enfin, la recette de cuisine est familiale pour un partage du plat réalisé en famille.

3) Pour stimuler l'aidé de manière multisensorielle différents éléments sont présents. Le contenu proposé est relatif au thème pour stimuler la mémoire de manière passive. Les activités ludiques sont adaptées à l'aidé pour le stimuler au mieux de manière active (une cinquantaine d'activités ont été identifiées autour de lettres, de chiffres, de logique, visuels, etc.). Une activité créative (dessin, mandala, peinture sur bois, réalisation d'objets, etc.) est également déclinée. Enfin, la recette de cuisine est présentée de manière à ce que l'aidé puisse la réaliser malgré ses troubles neuro-dégénératifs.

C. Description du service d'assistance aux utilisateurs

Afin d'accompagner chaque utilisateur, qu'il soit aidé ou aidant, un ensemble d'éléments a été mis en place tant pour faciliter la prise en main de l'application que pour guider son utilisation. Ceci est d'autant plus important étant donné la littéracie numérique parfois limitée des utilisateurs, notamment âgés. Des humains sont disponibles par téléphone et par mail pour répondre à toutes les sollicitations et guider chaque utilisateur pour vivre au mieux chaque situation se présentant au quotidien. Un livret d'accueil destiné à l'aidé est envoyé à l'inscription. Il détaille pas à pas la marche à suivre pour utiliser chaque fonctionnalité de l'application. Des tutoriels vidéo sont mis à disposition pour illustrer les principales actions réalisables sur l'application. Un forum est mis à disposition des utilisateurs pour la constitution d'une communauté et permettre des échanges autour de leurs problématiques et de leurs astuces.

IV. ANALYSE ET DISCUSSION

Le construit socio-technique Mementops cible en priorité les séniors en GIR 4, 5 ou 6, c'est-à-dire étant autonomes ou

nécessitant une aide ponctuelle ou non pour la toilette, la préparation des repas et le ménage [9].

Dans le cadre d'une MNE, la déclaration d'une aphasie marquera certainement une limite définitive en termes de capacités à utiliser Mementop par les sujets concernés. Elle apparaît en général en phase 6 (sur 7) du développement de la maladie. Une autre recherche est donc à mener pour des stades plus avancés de dépendance.

Si l'ergonomie et l'accessibilité du construit socio-technique ont été travaillés et testées tout du long de la conception, des limites subsistent et doivent faire l'objet d'ajustements. Nous citerons l'exemple du *tiroir* permettant la création et la modification de chaque élément. Si son ouverture ne pose pas de difficultés aux utilisateurs, sa fermeture en revanche (par un « tap » sur la partie supérieure de l'écran) n'est pas intuitive.

Les données collectées par le dispositif Mementop, résultant des différentes actions des membres de chaque tribu, permettent par ailleurs le calcul d'indicateurs cliniques de santé à savoir Nutrition ; Hygiène ; Qualité du sommeil ; Comportement social ; Estime de soi ; Autonomie générale. À partir d'un volume critique de données, il sera possible de représenter les évolutions au fil du temps de chaque indicateur clinique de santé (étude de leurs gradients) à l'aide de techniques issues de l'Intelligence Artificielle pour prédire l'évolution de l'autonomie de l'aidé. Il sera dès lors possible d'anticiper un besoin de prise en charge spécifique, résultant par exemple d'un risque détecté de dénutrition ainsi que de tenter de contrarier cette évolution estimée, en sollicitant les membres de la tribu et, le cas échéant, en alertant des professionnels de santé. La collecte de données peut également permettre d'accentuer la personnalisation en fonction du profil de l'utilisateur (attentes, besoins, préférences culturelles, habitudes de vie, etc.).

L'Expérience Utilisateur doit également évoluer pour renforcer l'engagement de chaque membre de la tribu. Les recherches se poursuivent pour améliorer :

- La motivation intrinsèque, obtenue par le sens donné aux interactions, par l'intégration d'éléments de gamification ainsi que par la valorisation de chacun ;
- La stimulation cognitive et sociale, à l'échelle individuelle ainsi qu'à travers une dynamique inter et intra tribu(s) notamment à travers d'activités ludiques ;
- La personnalisation dynamique de l'expérience grâce à l'IA et l'intégration d'un agent conversationnel empathique ;
- La mémoire somatique pour sécuriser les utilisateurs, et faciliter la transmission, le partage et le soutien.

Enfin, la validation clinique du construit socio-technique Mementop reste à démontrer à travers une vaste étude clinique planifiée sur la période 2023-2025. Elle inclura 220 triades chef de tribu atteint par une MNE – veilleurs – professionnel de santé référent réparties sur l'ensemble du territoire français. Cette étude visera à étudier les aspects médicaux (préservation de l'autonomie des patients ; soulagement de la charge mentale des veilleurs ; amélioration de l'efficacité de la prise en charge par les professionnels de santé) ainsi que les aspects économiques

concernant chaque tribu (coûts exogènes liés aux visites médicales, aux hospitalisations et aux traitements médicaux ; coûts endogènes liés aux dépenses relatives à l'état de santé du chef de tribu et de ses veilleurs).

V. CONCLUSION

Cette recherche innovante et interdisciplinaire a abouti à une première version du construit sociotechnique Mementop. Basé sur du numérique comprenant de l'IA, du papier et des interactions humaines, il présente un enjeu majeur pour la préservation de l'autonomie des personnes atteintes par une MNE, pour le soulagement de la charge mentale pesant sur leurs aidants ainsi que pour l'amélioration de l'efficacité de la prise en charge par les professionnels de santé. La recherche se poursuit autour de l'accessibilité du numérique par les séniors, des évolutions des interfaces ainsi que des techniques avancées en IA pour faire évoluer le dispositif médical Mementop en un compagnon intelligent en capacité de prédire les évolutions de la maladie, de soulager les aidants et de prodiguer des conseils personnalisés pour retarder les situations de dépendance.

ACKNOWLEDGMENT

Les auteurs remercient les membres du comité scientifique pour leur expertise, les laboratoires partenaires pour leur contribution, l'Association France Alzheimer pour son soutien, la BPI pour son aide au financement ainsi que les malades et leurs familles qui ont participé cette recherche.

REFERENCES

- [1] D. Thierry, "Evaluation socio-environnementale de dispositifs domotiques associés à la téléassistance destinés à la prévention des chutes au domicile de personnes âgées en perte d'autonomie en Creuse," 2012.
- [2] Y. Barnard, M. D. Bradley, F. Hodgson, and A. D. Lloyd, "Learning to use new technologies by older adults: Perceived difficulties, experimentation behaviour and usability," 2013, doi: 10.1016/j.chb.2013.02.006.
- [3] L. Genaro Motti, N. Vigouroux, and P. Gorce, "Ease-of-Use of Tactile Interaction for Novice Older Adults," pp. 463–474, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-20892-3_45.
- [4] G. Ben-Sadoun, G. Berrut, and V. Bernat, "Longévité et Métropole : Innovation pour les seniors, de quoi parlons-nous ?," 2018.
- [5] D. Le Métayer and C. Lazaro, "Le consentement au traitement des données personnelles. Perspective comparative sur l'autonomie du sujet," 2015, Accessed: Feb. 12, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/12524523/Le_consentement_au_traitement_des_donnees_personnelles_Perspective_comparative_sur_l'autonomie_du_sujet.
- [6] M. Billi *et al.*, "A unified methodology for the evaluation of accessibility and usability of mobile applications," *Univers. Access Inf. Soc.*, vol. 9, no. 4, pp. 337–356, 2010, doi: 10.1007/S10209-009-0180-1.
- [7] A. D. Fisk, S. J. Czaja, W. A. Rogers, N. Charness, S. J. Czaja, and J. Sharit, "Designing for Older Adults: Principles and Creative Human Factors Approaches," *Des. Older Adults*, Nov. 2009, doi: 10.1201/9781420080681.
- [8] L. Collet, M. Durampart, A. Gagnebien, and V. Lépine, "Dispositif de prise en charge de patients atteints de dégénérescence cognitive : enjeux communicationnels et redéfinition des rôles aidés, aidants, soignants," 2021, doi: 10.3917/ga.141.0195.
- [9] C. Benaim, J. Froger, B. Compan, and J. Pélissier, "Évaluation de l'autonomie de la personne âgée," *Ann. Readapt. Med. Phys.*, vol. 48, no. 6, pp. 336–340, Jul. 2005, doi: 10.1016/J.ANNRMP.2005.04.005.

Intérêt d'une démarche pluridisciplinaire en matière d'accessibilité : exemple de l'étude pilote du campus de la Garde

VIGIÉ Opale
Doctorante CNRS
Laboratoire GREDEG, CNRS UMR 7321
Université Côte d'Azur - Nice, France
opale.vigie@etu.unice.fr

FAUPIN Arnaud
Maître de conférence - HDR
Laboratoire IAPS, Université de Toulon
Toulon, France
faupin@univ-tln.fr

PRADON Didier
Ingénieur de Recherche, PhD HDR biomécanique
Pôle parasport ISPC Synergies
CHU Raymond Poincaré, APHP, Garches, France
didier.pradon@aphp.fr

WATELAIN Eric
Maître de conférence - HDR
Laboratoire IAPS, Université de Toulon
Toulon, France
eric.watelain@univ-tln.fr

NGO Mai-Anh
Ingénieure de recherche CNRS-HDR droit privé
Laboratoire GREDEG, CNRS UMR 7321
Université Côte d'Azur, Nice, France
mai-anh.ngo@gredeg.cnrs.fr

Résumé

Objectif : Proposer une démarche d'évaluation de l'accessibilité des établissements de l'enseignement supérieur public applicable par la suite à l'ensemble des campus universitaires. **Méthodes** : Il s'agit dans un premier temps d'effectuer un diagnostic d'accessibilité du campus de La Garde à l'aide d'un questionnaire. La seconde étape concerne l'évaluation de l'accessibilité actuelle par une grille de déclaration d'obstacles lors de déplacement en fauteuil roulant manuel par des usagers du campus en situation de handicap. **Résultats** : Lors de l'exploration du campus de la Garde, les sujets ont relevé 24 obstacles à la circulation. La difficulté technique moyenne des parcours est évaluée à 5,5 (± 1.64) sur 10. La perception de l'effort moyen sur les parcours équivaut à 6,83 (± 0.75) sur 10. **Discussion & conclusion** : Il est primordial de cartographier l'accessibilité des établissements de l'enseignement : cet élément ayant un impact fort sur le choix des cursus, mais également dans le déroulé des études des personnes en situation de handicap. Il semble aussi pertinent de s'intéresser à des approches quantitatives de l'accessibilité, permettant ainsi l'évaluation objective de ces établissements recevant du public.

Mots clés — *Enseignement supérieur, autonomie, accessibilité, personne à mobilité réduite.*

I. INTRODUCTION

La loi du 11 février 2005 a profondément modifié les perspectives concernant les personnes en situation de handicap. Son intitulé révélateur : loi pour « l'égalité des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées ». Sous l'impulsion de ce texte, l'accessibilité est devenue obligatoire et fondamentale.

Cette accessibilité concerne tous les aspects de la vie, en particulier l'accessibilité du cadre bâti, mais aussi des études supérieures ou encore l'accessibilité des équipements sportifs. Pour preuve, l'article L. 123-4-2 du Code de l'éducation stipule que « les établissements d'enseignement supérieur inscrivent les étudiants en situation de handicap ou présentant un trouble de santé invalidant, dans le cadre des dispositions réglementant leur accès au même titre que les autres étudiants, et assurent leur formation en mettant en œuvre les aménagements nécessaires à leur situation dans l'organisation, le déroulement et l'accompagnement de leurs études ». Ainsi rédigée, cette disposition implique l'accessibilité du bâti des établissements, mais également l'accessibilité pédagogique pour les étudiants en situation de handicap. Il s'agit de la considération de leurs besoins spécifiques [1].

À la rentrée 2019, les établissements d'enseignement supérieur publics comptaient 37502 étudiants en situation de handicap (ESH). Cela correspond à 1,69 % de la population étudiante totale [2]. Cette proportion est le résultat d'une forte progression des inscriptions : en 2005 il n'y avait que 5 930 étudiants en situation de handicap au sein de l'EESP.

Parallèlement à l'affirmation de droits spécifiques, les établissements d'enseignement supérieur publics (EESP) ne doivent pas faire l'objet de discrimination. En ce sens, l'article L123-2 du Code de l'éducation précise que le service public de l'enseignement supérieur « favorise l'inclusion des individus, sans distinction d'origine, de milieu social et de condition de santé ».

L'université de Toulon, concernée par l'ensemble de ces obligations, s'implique au quotidien pour une amélioration des conditions de vie et d'étude pour tous avec une attention particulière portée à l'accessibilité. Au sein du campus de La Garde, sur 10 719 étudiants inscrits sur l'année 2019 – 2020, 270 déclaraient être en situation de handicap.

Le campus se répartit sur 35 hectares avec trois unités de formations et de recherche (UFR), un institut universitaire de technologie (IUT), une école d'ingénieur et une école doctorale. La très grande superficie du campus induit un calendrier des travaux de mise en accessibilité plus étendu. Cela est accentué par le fait qu'aujourd'hui certains édifices bâtis dans les années 1970, encore utilisés, sont vétustes, amiantés et ne respectent pas les normes d'accessibilité.

Avec l'objectif de remédier à ces problématiques en respectant le cadre légal, l'Agenda d'Accessibilité Programmée (Ad'AP) progresse chaque année. En 2019 plusieurs travaux de mise en accessibilité ont été réalisés : le vestiaire du service des sports au bâtiment EVE a subi des modifications. Aussi pour les bâtiments C (cursus technique de commercialisation) et D (cursus génie mécanique et productique), un budget de 1,1 million d'euros est alloué afin de réaliser les travaux nécessaires.

La démarche d'évaluation d'accessibilité a été imaginée par la Direction du Patrimoine et des Services Techniques (DPST), la mission handicap de l'université de Toulon et en collaboration avec le laboratoire « Impact de l'Activité Physique sur la Santé » (IAPS).

Cette démarche de mise en accessibilité menée par des services techniques, mais aussi un laboratoire de recherche lui confère un caractère novateur qu'il convient de détailler car elle fonde la présente étude. Ce travail s'inscrit dans cette démarche d'accessibilité en associant l'expertise des usagers et l'analyse descriptive de parcours types. Cette évaluation est structurée en deux étapes.

La première concerne le diagnostic d'accessibilité du campus de La Garde. Afin de faire un état des lieux et de prioriser les chantiers de mise en accessibilité. La seconde étape concerne l'évaluation de l'accessibilité actuelle par une grille de déclaration d'obstacles lors de déplacement en fauteuil roulant manuel (FRM).

L'originalité de cette étude pilote réside dans l'utilisation de données biomécaniques pour aider la prise de décision en matière d'accessibilité grâce au concours du laboratoire IAPS spécialisée dans ce domaine.

L'intérêt des données biomécaniques a notamment été souligné par le *modèle de Chow* [3] qui démontre un lien entre l'amélioration de l'accessibilité et la qualité de vie des usagers grâce à la diminution du stress physique lié à la propulsion [Figure 1]. C'est ce lien qui a inspiré la méthodologie de recherche de cette étude qui a pour fonction d'organiser les travaux de mise en accessibilité du campus de l'université de Toulon.

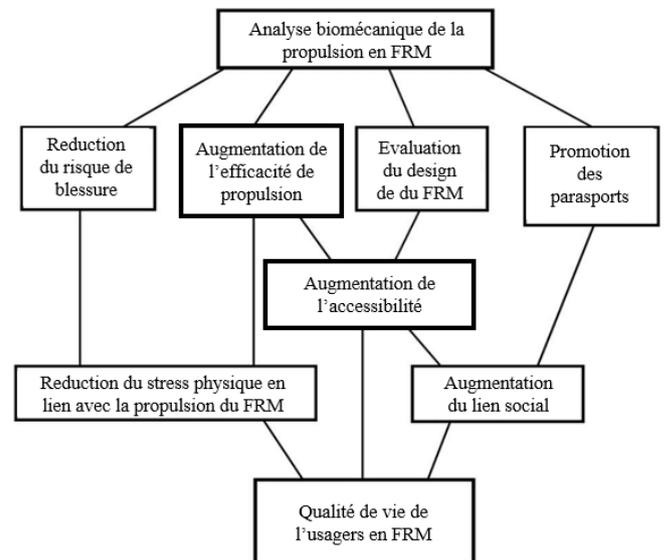


Figure 1 : Modèle de Chow (2011), traduit en français.

II. METHODOLOGIE

La méthodologie de ce projet décrit le processus d'évaluation de l'accessibilité de l'université de Toulon par le biais d'une co-construction active (questionnaire) et de l'usage des données descriptives de déplacements (parcours tests).

A. Questionnaire « accessibilité de l'université de Toulon » : mise en œuvre d'une co-construction de l'accessibilité

Afin de questionner les étudiants et les personnels en situation de handicap sur le besoin de mise en accessibilité, la direction du patrimoine et des services techniques ont commandé au laboratoire IAPS l'élaboration d'un questionnaire. L'objectif principal de ce dernier est de recenser les axes d'amélioration prioritaires identifiés par les usagers du campus, directement impacté par la difficulté de circulation sur leur lieu d'étude. Cet outil a été conçu en novembre 2021.

Le questionnaire contient dix-huit questions structurées en dans 2 catégories. La première porte sur les besoins d'accessibilité sur le campus et la seconde se focalise plus spécifiquement sur l'accessibilité et les pratiques sportives universitaires. La diffusion électronique ou papier de ce questionnaire a été effectuée par le service communication de la mission handicap de l'université de Toulon auprès de l'ensemble des usagers de l'université, personnels et étudiants en situation de handicap. Un délai de 15 jours a été observé avant la fin des relevés des réponses.

B. Diagnostics de pénibilité : l'intérêt des données biomécaniques pour effectuer la mise en accessibilité.

En complémentarité avec le questionnaire délivré au mois de novembre et pour parfaire l'évaluation de l'accessibilité du campus de La Garde, le projet a été étoffé par des expérimentations de terrain. La première étape de ce diagnostic est l'identification des itinéraires empruntés. La représentativité du parcours quotidien d'un étudiant fut un critère important dans le choix des itinéraires pris en compte dans cette étude.

L'objectif principal est le réalisme des conditions de circulation afin de respecter au mieux la réalité du terrain. Trois parcours de déplacements types entre les bâtiments du campus ont été imaginés :

Le parcours 1 correspond aux déplacements entre le bâtiment A et le bâtiment L, simulant le trajet d'un étudiant souhaitant se rendre sur un lieu de pratique sportive.

Le parcours 2 correspond aux déplacements entre le bâtiment T1 et bâtiment RU, simulant le trajet d'un étudiant souhaitant se rendre sur un lieu de restauration.

Le parcours 3 correspond aux déplacements entre de l'entrée piétonne du parking Nord et le bâtiment BU, simulant le trajet d'un étudiant qui souhaite se rendre à la bibliothèque universitaire.

Deux sujets ont accepté de participer à l'étude. Ils ont été sollicités pour leurs qualités physiques et leur expérience au sein de ce campus. En effet, il s'agit d'usagers en fauteuil roulant manuel ayant fait leur cursus d'enseignement supérieur au sein de l'université de Toulon. Leur habileté d'usage du fauteuil roulant a été évaluée par la version française de la Wheelchair Skills tests (WST-F, formulaire version 5.1.) [4]. Pour être inclus, les participants devraient obtenir un score minimum de 50%.

Après la signature d'un document attestant leur consentement éclairé à la participation à cette étude, une demi-journée de diagnostic de pénibilité de circulation a été organisée pour chaque participant. Les conditions météorologiques ont été relevées.

Sur ces trois parcours distincts reflétant le déplacement quotidien des étudiants, les participants ont décrit le niveau de difficulté de déplacement. Pour tout obstacle déclaré, le sujet spécifie l'intensité d'effort physique nécessaire pour le franchir ainsi que le niveau d'habileté motrice minimum requis. La cotation a été effectuée grâce à « l'échelle de la Note de Catégorie-10 », utilisée dans l'évaluation de la perception de l'effort. [5]

Dans un second temps, cette expérimentation de terrain a pour vocation d'approfondir le constat déjà illustré par le travail d'identification des difficultés de cheminement. Les relevés de terrain concernent des données biomécaniques acquises par l'utilisation de centrales inertielles¹.

Les mesures de la fréquence cardiaque grâce à une ceinture « Polar » ou la saturation d'oxygène musculaire (SmO₂) avec l'outil « Moxy Monitor » sont également envisagées.

Les expérimentations ont été planifiées au mois d'avril, les conditions météorologiques sont favorables au déroulé de nos prises de mesure à cette période de l'année.

III. RESULTATS

Cette étude pilote propose des résultats combinant différentes approches pour une vision plus exhaustive de l'accessibilité.

Ainsi, le questionnaire à l'intention des étudiants et du personnel en situation de handicap communique des informations sur les besoins prioritaires et permet de concevoir une planification des travaux à mener à bien. Le diagnostic de pénibilité, réalisé par les sujets utilisateurs de fauteuil roulant manuel confortent ou non le diagnostic posé par le questionnaire et nous confirme jusqu'à présent la difficulté de la mise en accessibilité pour les lieux ouverts au public d'une telle dimension.

Il convient à présent de détailler les résultats des deux volets de cette étude.

A. Questionnaire « accessibilité de l'université de Toulon »

Au total 17 personnes en situation de handicap ont répondu au questionnaire. Certains individus n'ont pas complété l'ensemble du questionnaire. Les 17 participants sont : 7 personnes à mobilité réduite, dont 2 utilisateurs de fauteuil roulant manuel et un utilisateur de fauteuil roulant électrique. Des difficultés d'apprentissage touchent 2 personnes ayant répondu au questionnaire. On retrouve également 2 personnes souffrant de maladies invalidantes, ainsi qu'une personne possédant des troubles sensoriels. Quatre personnes sont classées dans la catégorie « autre – valides ».

Concernant le questionnement portant sur les besoins en signalétique sur le campus, nous obtenons au total 11 réponses. 7 personnes interrogées considèrent qu'il faut ajouter de la signalisation afin d'indiquer les meilleurs cheminements. Seulement 2 individus ne sont pas favorables à l'accroissement de la signalisation. S'ajoutent à cela 2 personnes en ne souhaitant pas se prononcer à ce sujet.

En ce qui concerne la répartition des besoins de mise en accessibilité selon les usagers en situation de handicap, il est possible de les classer par catégorie. Tout d'abord on recense une réponse affirmant la nécessité d'aménagement des équipements pédagogiques. Une deuxième catégorie, représentée par 2 demandes, discute de la nécessité d'amélioration du mobilier urbain. La fluidification de la circulation piétonne est réclamée par 5 individus. Enfin, 7 usagers du campus témoignent du besoin urgent de travaux de mise en accessibilité.

¹ La centrale inertielle se compose de plusieurs capteurs. (accéléromètre, gyroscope et magnétomètre). Cet outil de mesure est notamment utilisé dans Programme Prioritaire de Recherche « Sport de Très Haute Performance » nommé Paraperf : ANR-19-STHP-0005

B. Diagnostic de pénibilité : deux sujets expriment leurs ressentis.

Les tables I, II et III présentent le nombre d'obstacles relevés par les sujets ainsi que l'estimation de la condition physique requise pour les franchir et leur difficulté technique de franchissement. Chaque table se réfère à un parcours. On remarque que le parcours nécessitant le plus de conditions physiques est le parcours 2, correspondant aux déplacements entre le bâtiment T1 et bâtiment RU.

On note que le plus grand nombre d'obstacles est obtenu lors du passage sur le dernier parcours, celui-ci menant d'une entrée de l'université vers la bibliothèque universitaire. Si l'on s'intéresse au temps de parcours moyen, c'est le parcours simulant l'activité d'un étudiant souhaitant se rendre sur un lieu de pratique sportive (bâtiment A – bâtiment L) qui se trouve être le plus long.

La localisation des obstacles est placée sur le plan du campus dans la figure 2.

Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1	Nombre d'obstacle déclarés par DP-MR-2	Temps de parcours moyen	Niveau technique (Valeurs moyennes ± écart-types)	Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types)
9	8	7min43 (±44sec)	4,42 (±2,71)	3 (±1,95)

Table I : Relevés de donnée sur le parcours 1. *Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1 et DP-MR-2, Temps de parcours moyen en min. Niveau technique Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types).*

Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1	Nombre d'obstacle déclarés par DP-MR-2	Temps de parcours moyen	Niveau technique (Valeurs moyennes ± écart-types)	Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types)
6	6	5min50 (± 1min12)	4,60 (± 2,67)	4,50 (± 1,85)

Table II : Relevés de donnée sur le parcours 2. *Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1 et DP-MR-2, Temps de parcours moyen en min. Niveau technique Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types).*

Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1	Nombre d'obstacle déclarés par DP-MR-2	Temps de parcours moyen	Niveau technique (Valeurs moyennes ± écart-types)	Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types)
9	11	6min10 (± 43sec)	3,41 (±1,87)	2,57 (±1,45)

Table III : Relevés de donnée sur le parcours 3. *Nombre d'obstacle déclarés par DP-MG-1 et DP-MR-2, Temps de parcours moyen en min. Niveau technique Niveau de condition physique (Valeurs moyennes ± écart-types).*



Figure 2 : Localisation des obstacles à l'université de Toulon sur le plan du campus de La Garde.

IV. DISCUSSION

Cette étude pilote a pour objectif de poser un diagnostic concernant l'accessibilité du campus de La Garde puis d'accompagner la direction du patrimoine, les services techniques ainsi que la mission handicap, à cibler les aménagements indispensables et urgents à mettre en place. La mise en accessibilité devant être échelonnée au regard de la taille du campus.

L'usage des questionnaires et les parcours tests sont une utilisation du *modèle de Chow*. En effet par le questionnaire et les parcours tests on évalue le stress physique qui est lié à la propulsion et la qualité de vie ressentie des usagers du campus. L'évaluation de ces deux éléments permettant à leurs tours d'améliorer l'accessibilité.

Les 17 réponses au questionnaire ont permis de recenser les besoins. Ce sondage a pour rôle l'aide à la décision, d'autant qu'il est complété de l'étude sur la pénibilité et encadré par la réglementation légale d'accessibilité. Les réclamations d'accessibilité exprimées ont mis en avant que les étudiants de la filière Science et Technique des Activités Physique et Sportive (STAPS) étaient fortement impactés dans leurs cursus par le manque d'accessibilité des infrastructures sportives de l'université.

Cette accessibilité partielle impacte le parcours de l'étudiant du fait la difficulté de validation d'unités d'enseignements. En effet, les étudiants en STAPS sont amenés à pratiquer des activités physiques au sein du campus de la Garde.

Concrètement, pour ce campus l'accès aux terrains de tennis contraint l'étudiant à franchir un trottoir de 12 centimètres. Aucun passage chatière n'est prévu afin de permettre l'accès aux personnes à mobilité réduite.

Ce franchissement nécessite, pour les utilisateurs de FRM, d'être capable de se maintenir en équilibre sur les roues arrière tout en ayant suffisamment de force (si la vitesse de déplacement est nulle) ou de quantité de mouvement (si la vitesse est minime) pour franchir ce trottoir. Impliquant, de fait, la prise de risque de chute.

Cet effort est loin d'être négligeable, pour franchir un obstacle d'une hauteur de 1cm la force de traction nécessaire est de 175 N, contre 326 N pour si le trottoir fait 2,7 cm. [6]

De même, l'entretien ou la conformité des installations déjà existantes impactent l'effort à fournir pour y accéder. Les usagers ont déclaré l'accès au gymnase difficile en raison des contraintes d'utilisation de la porte d'entrée. En effet, le Code de la construction articles R. 111-19-7 à R. 111-19-11 dispose comme suit « L'effort nécessaire pour ouvrir la porte est inférieur ou égal à 50 Newtons (N), que la porte soit ou non équipée d'un dispositif de fermeture automatique. » (arrêté du 8 décembre 2014). Cet élément vient renforcer un bilan déjà réalisé plus généralement dans le *modèle de Chow*: la participation à la vie étudiante sportive est limitée en raison de problèmes d'accès.

Le raisonnement commun aux acteurs de ce projet a abouti à une prise de décision concernant les prochains travaux. Il a été considéré que l'accès aux infrastructures sportives était une amélioration urgente. Un budget a été alloué à la réfection du parking et des entrées carrossables permettant l'accès au terrain de tennis et au complexe sportif synthétique.

La topographie naturelle constatée sur le campus de l'université de Toulon se trouve en défaveur de la circulation en fauteuil roulant manuel. Il existe des axes et cheminements proposant un dénivelé de plus de 8% sur 40 mètres. Ce paysage ne pourrait être corrigé par des travaux de mise en accessibilité, car il s'agit de la nature même du site sur lesquelles le campus de La Garde est implanté, il convient de réfléchir à des moyens de compensation.

En conséquence et après une réflexion commune, une solution d'assistance électrique à la propulsion pour les FRM a été proposée pour faciliter le déplacement des usagers en fauteuil roulant dans l'enceinte du campus. Devant l'impossibilité de modifier l'environnement, la direction du patrimoine et des services techniques a donc accepté de financer l'achat d'assistances électriques au déplacement pour les étudiants dans le besoin.

Ces appareils facilitant la propulsion en fauteuil roulant se retrouvent sous des formes distinctes : roues additionnelles, trottinettes adaptables. Ces assistances ne proposent pas les mêmes caractéristiques en termes d'adaptation concernant les différentes façons de les relier au fauteuil roulant manuel de l'utilisateur.

Malgré leurs différences techniques, ces dispositifs permettent le franchissement d'obstacle pour un moindre effort ainsi que l'augmentation de l'autonomie de déplacement [7]. L'objectif d'accroître l'autonomie et la mobilité de chacun pour faire vivre une université plus inclusive peut être ainsi respecté.

Actuellement les plans disponibles sur le site internet de l'université de Toulon ne prennent pas en compte les personnes en situation de handicap. Il n'existe aucune carte spécifiant les accès pour personnes à mobilité réduite ou faisant le recensement d'obstacles comme des escaliers ou des itinéraires à éviter.

Or, la préparation à distance et en amont du déplacement via les sites internet et les applications mobiles est une pratique courante pour les personnes à mobilité réduite en raison de difficultés récurrentes d'accessibilité au cours de leurs déplacements.

Ce point souligne clairement l'impossibilité pour l'utilisateur (étudiant ou personnel) d'anticiper ses difficultés lors qu'il se déplace d'un campus à un autre campus pour une même université. Dans ce cas, le manque d'information peut se traduire par une rupture de la chaîne de déplacements pourtant pris en compte par les lois d'accessibilité [8].

En effet, dans un établissement d'enseignement supérieur public, les usagers ou étudiants se réfèrent régulièrement aux informations disponibles sur ces réseaux de communication. Il est important d'y trouver l'ensemble des informations permettant une meilleure circulation.

Dans l'enceinte du campus de la Garde, la signalétique présente ne permet pas une lisibilité des cheminements pour les étudiants en situation de handicap.

Afin d'améliorer la qualité des services, l'université de Toulon par la direction du patrimoine et des services techniques s'est engagée à travailler sur la cartographie des campus. Grâce au diagnostic de terrain effectué, nous serons en mesure de renseigner les itinéraires favorables aux étudiants à mobilité réduite ainsi que de prévenir les difficultés dans les cheminements. Une carte du campus à destination des usagers en situation de handicap devrait être ajoutée au site internet. La présence de QRcode sur la façade de chaque bâtiment devrait également servir à faciliter la circulation. En récupérant les informations de ce code-barres, chacun pourra se repérer dans l'espace et choisir le parcours le plus approprié pour se rendre sur le lieu souhaité.

Cette étude pilote permet de confirmer la nécessité de cartographier l'accessibilité des équipements qui dans notre cadre peuvent impacter le déroulement des études et donc en amont le choix du cursus des futurs étudiants en situation de handicap. Mais également de s'appuyer sur des approches quantitatives offrant un regard objectif sur l'état actuel de l'accessibilité de ces établissements recevant du public.

V. CONCLUSION

Cette étude pilote propose une démarche d'évaluation de l'accessibilité des établissements de l'enseignement supérieur public qui pourrait être applicable aux plus grands nombres.

En effet, pour l'application rigoureuse du plan Ap'Ad des universités Françaises, une démarche basée sur l'interrogation des besoins d'accessibilisation et sur l'évaluation de parcours de déplacements quantifiés, permet d'accompagner les politiques de travaux mise en place par les universités. Les résultats incriminent clairement des points bloquants pouvant impacter le déroulement des études dans un campus.

Nos résultats mettent en évidence que ces contraintes identifiées peuvent être gérées par une action interservices rendant ainsi l'université plus inclusive.

Cette étude pilote et une première étape d'une étude plus large portant sur le déplacement en fauteuil roulant manuel et la réglementation de l'accessibilité. Ce travail de thèse plus généraliste démontre l'intérêt d'une évaluation par des éléments objectifs et notamment biomécaniques pour favoriser l'accessibilité consacrée en France par la loi du 11 février 2005.

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient la direction du patrimoine et des services technique et plus particulièrement Madame Christine Gruffaz pour son implication dans le projet, pour l'aide efficace et compétente apportée tout au long de cette mission.

REFERENCES

- [1] Innovation, Ministère de l'Enseignement supérieur l', de la Recherche et de. « Les Étudiants En Situation de Handicap Dans l'enseignement Supérieur - État de l'Enseignement Supérieur, de La Recherche et de l'Innovation En France N°14 ». les étudiants en situation de handicap dans l'enseignement supérieur - État de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation en France n°14. Consulté le 16 mars 2022. https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR14_ES_14/les_etudiants_en_situation_d_e_handicap_dans_l_enseignement_superieur/.
- [2] Mon Parcours Handicap. « Étudier après le bac avec un handicap ». Consulté le 16 mars 2022. <https://www.monparcours handicap.gouv.fr/etudes-superieures/etudier-apres-le-bac-avec-un-handicap>.
- [3] Chow, John W., et Charles E. Levy. « Wheelchair Propulsion Biomechanics and Wheelers' Quality of Life: An Exploratory Review ». *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* 6, n° 5 (septembre 2011): 365-77. <https://doi.org/10.3109/17483107.2010.525290>.
- [4] « Guide et formulaires du Programme d'habiletés en fauteuil roulant (WSP-F) – Wheelchair Skills Program ». Consulté le 21 mars 2022. <https://wheelchairskillsprogram.ca/fr/guide-et-formulaires/>.
- [5] Haddad, M., A. Chaouachi, C. Castagna, O. Hue, D.P. Wong, M. Tabben, D.G. Behm, et K. Chamari. « Validity and Psychometric Evaluation of the French Version of RPE Scale in Young Fit Males When Monitoring Training Loads ». *Science & Sports* 28, n° 2 (avril 2013): e29-35. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2012.07.008>.
- [6] Cabelguen, Jean-Charles. « Développement d'outils pour l'analyse et la quantification des interactions utilisateur-fauteuil-environnement lors de déplacements en fauteuil roulant manuel ». *Physique [physics]. Arts et Métiers ParisTech*, 2008, 147.
- [7] Pradon, Didier, Elodie Garrec, Isabelle Vaugier, Thierry Weissland, et Caroline Hugeron. « Effect of Power-Assistance on Upper Limb Biomechanical and Physiological Variables during a 6-Minute, Manual Wheelchair Propulsion Test: A Randomised, Cross-over Study ». *Disability and Rehabilitation*, 21 septembre 2021, 1-5. <https://doi.org/10.1080/09638288.2021.1973586>.
- [8] Cerema. Réussir l'accessibilité des espaces publics. Recommandations issues de la préparation des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Bron : Cerema, 2021. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-534-7 (pdf)

La téléconsultation : un instrument pour mieux prendre en charge les enfants en situation de polyhandicap ?

Amélie Sandoval

Centre de recherche sur le travail et le développement
Conservatoire national des arts et métiers
Paris, France
amelie.sandoval@gmail.com

Marie Hully

Hôpital universitaire Necker Enfants Malades
Assistance Publique - Hôpitaux de Paris
Paris, France
marie.hully@aphp.fr

Marc-Eric Bobillier Chaumon

Centre de recherche sur le travail et le développement
Conservatoire national des arts et métiers
Paris, France
marc-eric.bobillier-chaumon@lecnam.net

Isabelle Barbet

Centre d'études et de recherche en informatique et
communications
Conservatoire national des arts et métiers
Paris, France
isabelle.barbet@lecnam.net

Résumé — Cette contribution s'interroge sur les incidences d'un dispositif de téléconsultation permettant à des enfants polyhandicapés de consulter un neuro-pédiatre, en présence de leurs parents, depuis l'établissement médicosocial qui les accueille. A partir d'une étude qualitative menée en psychologie du travail sur les usages faits de ce dispositif, nous nous arrêterons sur ce que ce type d'instrument peut apporter à la prise en charge de ces enfants, notamment par le travail pluridisciplinaire et les coopérations qu'il permet. Nous en montrerons aussi quelques limites à travers d'une part les obstacles techniques, organisationnels et professionnels qui peuvent rendre difficile le déploiement d'une activité de téléconsultation, et d'autre part les risques qu'ont pu soulever les professionnels et les familles avec lesquels nous avons travaillé.

Mots-clés — *téléconsultation; polyhandicap; analyse de l'activité; coopération; travail pluridisciplinaire*

I. INTRODUCTION

Selon le CESAP et le GPF, le polyhandicap est une affection chronique liée à un dysfonctionnement cérébral, précoce ou survenu en cours de développement, aux origines variables (maladies dégénératives, pathologies acquises), avec

dans environ 30% des cas une étiologie inconnue [1]. La prévalence serait comprise entre 0,5 et 1 pour 1000. Ce dysfonctionnement cérébral implique des déficiences intellectuelles ou motrices, souvent associées à d'autres fragilités telles que des déficits auditifs ou visuels, des troubles comportementaux et relationnels, une épilepsie ou encore des troubles viscéraux, respiratoires et orthopédiques. Les personnes polyhandicapées sont dans une « *situation évolutive d'extrême vulnérabilité physique, psychique et sociale* »¹. Les besoins médicaux des enfants polyhandicapés sont ainsi multiples et importants, avec des parcours de santé toujours complexes, marqués par de nombreuses consultations médicales, des hospitalisations et l'intervention d'une pluralité d'acteurs ([2] et [3]). Ces enfants sont au quotidien complètement dépendants d'une assistance humaine et technique. Dans ce contexte, la télé médecine qui, comme le montrent Gaglio et Mathieu-Fritz [4], suscite souvent de « grands espoirs », et notamment celui du développement de l'accès aux soins et d'une égalité de traitement pour les patients atteints de maladies chroniques semble pouvoir constituer une aide importante dans le suivi de ces enfants [5].

Dans le cadre d'une étude exploratoire portant sur une plateforme de téléconsultation en neuropédiatrie, mise en place en Ile de France à destination d'enfants polyhandicapés², nous

elle est menée conjointement par une équipe médicale, une équipe de psychologues du travail, une équipe de sociologues et une équipe d'économistes, et cherchent à qualifier et mesurer les incidences d'un programme de télé médecine à destination d'enfants en situation de polyhandicap.

¹ <https://www.cesap.asso.fr/recherche-informations-pratiques/autresproductions/1018-definition-s-du-polyhandicap-2>
<https://gpf.asso.fr/le-gpf/definition-du-polyhandicap/>

² Cette étude exploratoire est menée depuis mai 2020, dans le cadre de l'appel à projet « Polyhandicap », au sein du programme de recherche « Handicap et perte d'autonomie » mis en œuvre par la CNSA et l'IRESP. Pluridisciplinaire,

nous sommes intéressés aux incidences de la téléconsultation sur la prise en charge de ces enfants, et plus précisément à la façon dont se déroulait une téléconsultation et à ce qu'elle pouvait permettre ou pas pour ses différents protagonistes : les enfants et leurs familles, ainsi que les différents professionnels qui y participaient. Après avoir brièvement présenté cette plateforme ainsi que le cadre théorique et la méthodologie que nous avons adopté pour étudier cette situation « médiatisée » de consultation, nous exposerons différents apports que nous avons pu repérer, avant de souligner des difficultés ou des risques rencontrés et/ou identifiés par les professionnels et les familles avec lesquels nous avons travaillé.

II. CONTEXTE ET CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE

La plateforme que nous avons investiguée a été mise en place en 2013. Elle visait à développer des téléconsultations dans des établissements médico-sociaux afin d'améliorer l'accès de leurs bénéficiaires aux consultations de neuropédiatrie de l'Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP). L'objectif était de prévenir les complications, de diminuer les hospitalisations en urgence, et de permettre la diffusion d'avis experts [5]. Après une phase d'expérimentation menée de 2014 à 2018, elle s'étend progressivement depuis juillet 2019 à toute l'Île de France. Au moment de notre investigation, 24 établissements médicosociaux (EMS) pratiquent la téléconsultation, ainsi que de nombreuses familles depuis leur domicile, la période du COVID ayant permis de développer un accès facilité à la plateforme de téléconsultation et amené beaucoup de parents, de façon choisie et/ou subie, à consulter à distance depuis chez eux [6].

Nous nous centrerons dans cet article sur la situation où la téléconsultation se fait entre :

- un médecin spécialiste d'un service hospitalier « à distance »,
- et un enfant entouré d'un ou plusieurs adultes (en général au moins un de ses parents, le médecin et/ou l'infirmier de son EMS, parfois aussi un éducateur, et dans certains cas un ou plusieurs professionnels paramédicaux de l'EMS), « en co-présence physique » dans l'établissement médicosocial dans lequel l'enfant passe une partie de son temps (en internat ou externat).



Fig. 1. Le neuro-pédiatre « à distance »



Fig. 2. Le patient, ses parents et dse professionnels de son IME en « co-présence physique »

La mise en place d'un tel dispositif, comme tout nouveau dispositif technique introduit dans un milieu professionnel, s'accompagne d'un ensemble de transformations socio-professionnelles et organisationnelles. Ces transformations modifient le travail à faire et les façons de travailler, et ont des incidences sur l'activité des professionnels et des usagers qui y ont recours [5 ; 7 ; 8 ; 9]. Dans cette perspective, nous avons entrepris dans le cadre de cette étude, de décrire et d'analyser l'activité de téléconsultation, en regardant les usages fait par les différents protagonistes de ce dispositif de téléconsultations, et leurs incidences à la fois sur l'activité de chacun et sur les organisations du travail dans lequel il est implémenté. Nous nous sommes notamment intéressés aux effets et implications de la téléconsultation sur la réalisation du soin et la prise en charge des enfants, ainsi que sur les relations entre les différents protagonistes de la situation de soin (professionnels, aidants, accompagnants, famille, enfants...). Plus largement, nous avons cherché à identifier ce que le dispositif semblait apporter ou parfois empêcher.

Pour ce faire, nous avons proposé une méthodologie qualitative, d'orientation clinique, cherchant à multiplier les observations dans un nombre réduit de lieux et à travailler sur la durée et en profondeur avec des professionnels, des patients et leurs familles, afin de pouvoir décrire finement comment l'activité de téléconsultation était implémentée dans les structures et les pratiques et comment elle se déroulait. Nous avons aussi cherché à approfondir avec les différents protagonistes les usages qu'ils faisaient de ce dispositif, les ressources qu'ils y trouvaient, mais aussi les obstacles ou difficultés qu'ils pouvaient rencontrer.

Nous avons ainsi réalisé des observations in situ, non participantes, de situations de consultation et de téléconsultation, ainsi que des observations en amont et en aval de ces (télé)consultations, principalement dans deux services hospitaliers de neuropédiatrie et dans deux instituts médico-éducatifs (48 demi-journées d'observation, ayant permis d'observer 46 téléconsultations et 41 consultation ayant concerné 79 patients). Ces observations ont été l'occasion de prises de notes et de relevés d'activité, et ont permis de collecter un ensemble de verbalisations permettant d'approcher ce qui se jouait pour les individus dans la situation [10].

Ces éléments ont à la fois servi de supports et été complétés lors d’entretiens et de séances de travail, individuels et collectifs (30), que nous avons eus avec différents protagonistes du dispositif (médecins, paramédicaux, professionnels du médicosocial, agents administratifs, parents). Lors des séances de travail, au-delà du recueil d’informations, nous avons pu proposer aux professionnels sollicités un cadre de travail réflexif d’autoconfrontation à leur propre activité, en nous inspirant des méthodes développées en clinique de l’activité [11 ; 12] : nous avons alors travaillé à partir de traces de (télé)consultations (relevés d’observation, enregistrement vidéo) que nous avons repris avec les professionnels pour chercher à co-analyser avec eux leur activité. Au cours de ces séances de travail, nous avons cherché à qualifier avec les professionnels :

- ce qu’ils faisaient (quoi ?)
- avec quels instruments et moyens (comment ?)
- avec quels mobiles et quelles visées (pourquoi et pour quoi ?)
- et plus largement ce qui se passait pour et selon eux dans la situation.

TABLE I. RECUEIL DES DONNÉES

Récapitulatif du travail de terrain		
<i>Observations</i>	<i>Consultations</i>	<i>Téléconsultations</i>
48 séances (1/2 journée)	41	46
<i>Travail avec les professionnels et familles</i>	<i>Entretiens</i>	<i>Séances de travail</i>
30 rencontres	10	20

III. RÉSULTATS

L’activité, aussi bien des services hospitaliers, des établissements médico-sociaux, des professionnels que des parents qui participent à des téléconsultations est modifiée à de nombreux niveaux (avec par exemple la prise en charge de nouvelles tâches, le développement de nouveaux rapports de travail entre eux ou de nouvelles relations entre professionnels et parents). Professionnels et parents soulignent un ensemble de gains pour le suivi et la prise en charge des enfants.

Le premier bénéfice spontanément évoqué relève du non-déplacement des enfants qui peuvent rester dans leur structure qui les accueille au quotidien. Les acteurs soulignent que cela permet de gagner du temps, mais surtout que cela épargne des moments d’inconfort pour des enfants qui doivent se déplacer le plus souvent en ambulance, dans des positions inconfortables pour eux (par exemple couchés, quand la station assise est plus adaptée), et pour lesquels l’attente à l’hôpital et plus largement le fait d’être dans un endroit qui ne leur est pas familier et/ou qui leur rappelle des expériences parfois douloureuses peuvent être inquiétants ou angoissants.

Le fait que les enfants restent dans un environnement qui leur est familier présente aussi l’intérêt, du point de vue des médecins, de pouvoir observer l’enfant dans une situation qui lui est quotidienne, dans laquelle il est moins stressé, et de le

voir alors faire des choses qu’il ne fait pas forcément en consultation à l’hôpital. Il peut notamment se montrer moins agité, plus détendu, plus communicatif aussi, et permettre au neuro-pédiatre de mieux identifier certaines de ses possibilités. Il existe néanmoins une grande variabilité de situations : tous les enfants ne sont pas aussi à l’aise dans la situation de téléconsultation, et les possibilités de communication directes entre le médecin et son patient sont réduites en l’absence de possibilité de se toucher ou de s’adresser des regards directs.

La téléconsultation permet par ailleurs à un plus grand nombre de personnes et à une pluralité de « métiers » d’être présents, et ainsi de croiser dans un même espace-temps, les informations, les hypothèses et les points de vue. Ce « croisement » des regards et des savoirs constitue là-encore, selon nos interlocuteurs, un gain incontesté. Rappelons que les enfants porteurs de polyhandicap présentent pour les professionnels des tableaux cliniques complexes (parfois inédits pour eux) et des modes de communication singuliers, très majoritairement non verbaux, qui demandent à leur entourage un travail d’interprétation pour tenter d’identifier leurs potentiels inconforts, leurs ressentis ou leurs désirs. Les aidants du quotidien, qu’ils soient professionnels ou de la famille, jouent là un rôle crucial : leurs observations et leurs impressions par rapport aux attitudes et comportements des enfants permettent de repérer des changements pas toujours visibles sur un plan clinique, et ainsi d’adapter plus finement les soins proposés, ou encore d’anticiper d’éventuelles décompensations ou crises. Dans cette situation particulière de polyhandicap, les professionnels et proches aidants s’accordent sur la nécessité de prendre en compte une multiplicité de dimensions et de points de vue pour évaluer les besoins des enfants, et déterminer des traitements ou indications thérapeutiques appropriés. La téléconsultation paraît pouvoir y contribuer en permettant à des médecins, paramédicaux, professionnels du médicosocial, mais aussi à la famille ou aux proches aidants de développer leurs liens autour d’un même patient pour approcher au mieux le vécu du jeune patient, co-produire un soin de qualité et co-construire une trajectoire de soin cohérente [13 ; 14]. Ce sont alors potentiellement de véritables coopérations qui peuvent se développer, au sens proposé par Lhuillier [15] ou Caroly et Barcellini [16], en permettant non seulement aux professionnels et aux familles de se coordonner dans le sens d’ordonner et combiner leurs actions dans le temps et dans l’espace, mais aussi de s’engager collectivement dans la définition et la construction d’actions à mener et de s’impliquer subjectivement dans une activité collective. On retrouve cette potentialité identifiée par Mathieu-Fritz et Esterle d’un développement possible de la coopération interprofessionnelle, inhérent à la téléconsultation, avec la constitution de « microcollectifs » de travail autour d’une téléconsultation [18].

Si l’on regarde maintenant plus finement ce qui se passe pour les familles dans ces situations, la téléconsultation paraît leur permettre d’accéder à un plus grand nombre d’informations et d’adresser leurs questionnements. Dans les deux IME dans lesquels nous sommes intervenus, les téléconsultations font en effet l’objet d’un travail en amont et en aval, entre un ou les deux parents, et une ou plusieurs personnes de l’équipe. Il s’agit, dans la phase « amont », de

faire le point avec la famille sur le suivi médical de l'enfant, les observations et questions des parents, mais aussi les observations et questions des professionnels. Cet échange permet de préparer l'échange avec le médecin, mais il a finalement aussi l'intérêt d'ouvrir un espace supplémentaire de concertation et de « coordination » autour de l'enfant, entre l'IME et la famille. Lors de la téléconsultation, si on ne peut pas aborder tout ce qui a été évoqué lors de ce point préparatoire, une partie l'est, et il n'est alors pas rare que l'équipe de l'IME soutienne les parents en les encourageant à prendre la parole, voire en se faisant leur porte-parole quand les parents ne le font pas. Dans la phase « aval », le déroulé de la téléconsultation est repris, et nous avons pu voir des parents demander à l'équipe de préciser certains points qu'ils n'ont pas complètement entendus ou saisis, et échanger avec eux sur les actions ou changements qu'allaient impliquer les décisions éventuellement prises lors de la téléconsultation (prise de rendez-vous pour des examens complémentaires, changement de traitement, nouvelles consignes pour la nutrition, etc.). Ce moment est central, l'enfant étant au quotidien dans sa structure d'accueil et sa famille, toutes ces modifications nécessitent là-encore une forme de coordination entre les deux. Lorsque la consultation se fait en co-présence à l'hôpital, sans l'IME, cette coordination est moins aisée : elle se fait moins rapidement, des informations ou explications se « perdent » parfois avant d'arriver à l'IME, elle n'est enfin pas toujours optimale quand les différents protagonistes n'ont pas pu se mettre d'accord directement (avec par exemple un traitement donné avec difficulté le matin par la famille, quand il pourrait être donné plus aisément quand celui-ci arrive dans son IME).

Il est intéressant de noter qu'avec l'habitude les médecins et IME peuvent utiliser le dispositif de téléconsultation dans le « sens inverse » : avec l'enfant et ses parents présents à l'hôpital, et l'équipe de l'IME à distance. Pour certains suivis particulièrement complexes, cela permet au spécialiste à la fois de voir l'enfant et de pouvoir faire un examen clinique approfondi, sans pour autant se priver de toutes les informations que peuvent lui fournir les professionnels de l'IME. Cela ne permet pas à l'équipe de l'IME de soutenir la famille et de s'organiser avec elle comme nous l'avons précédemment décrit. En revanche, comme lors d'une téléconsultation « classique », cet espace co-modal (présentiel/distanciel) permet aux professionnels de croiser leurs points de vue, interrogations et hypothèses, d'articuler leurs prises en charge respectives et de développer une véritable coopération. Cela peut par exemple être l'occasion, pour le neuropédiatre et le kinésithérapeute de l'IME de s'accorder sur un type de prise en charge rééducative.

IV. OBSTACLES ET RISQUES

Si les bénéfices sont nombreux, notre travail montre aussi que ces pratiques rencontrent un certain nombre d'obstacles, qui peuvent conduire à leurs abandons par certaines structures, et comportent aussi des risques.

Parmi les obstacles, viennent en premier lieu les obstacles techniques : une connexion internet instable, un matériel informatique pas toujours en bon état et pas toujours

bien maîtrisé par les professionnels, des difficultés à comprendre le fonctionnement de la plateforme de téléconsultations, ou encore des problèmes de sons et d'images. Lors de nos observations, environ une téléconsultation sur 5 s'est faite en partie ou entièrement sans passer par la plateforme qui doit normalement être utilisée, du fait de difficultés techniques. Sur ce point, il faut souligner que du côté des IME, les ordinateurs sont relativement peu utilisés par les professionnels, et en tout cas moins que par les médecins des services hospitaliers. Lorsqu'un problème technique se pose, les infirmiers et éducateurs que nous avons rencontrés ne sont pas toujours très à l'aise pour chercher des solutions permettant de résoudre ou contourner le problème.

Les obstacles sont aussi organisationnels. Comme le soulignent Mathieu-Fritz et Gaglio dans leur revue de littérature sur la télémédecine, ce type de dispositif s'implémente dans une organisation « déjà là » et demande de multiples (ré)organisations [9]. L'activité de téléconsultation demande du temps, des compétences, et d'être pensée à l'intérieur des organisations du travail dans lesquelles elle s'insère, aussi bien du côté hospitalier que du côté médicosocial. Il ne suffit pas d'avoir des familles et des professionnels volontaires pour les réaliser :

- il faut les préparer : trouver le créneau horaire adapté pour tout le monde, contacter le spécialiste ou son secrétariat, trouver des moments pour se préparer en équipe et avec la famille ;
- il faut ensuite que les professionnels puissent se libérer, dans des contextes où les effectifs sont souvent très tendus, pour la téléconsultation en elle-même qui dure en général autour de 30 minutes mais peut aller jusqu'à une heure ;
- enfin, nous l'avons vu, il faut aussi qu'au moins un des professionnels participants puissent prendre du temps avec la famille pour reprendre ce qui s'est dit et s'accorder pour la suite.

Enfin, ce sont aussi parfois les professionnels eux-mêmes qui sont réticents à se lancer dans l'activité. Certains considèrent que cela n'est pas une priorité dans leurs missions (du côté des IME) ou considèrent que leur métier ne peut s'exercer qu'en co-présence physique (du côté hospitalier). D'autres avancent que leur charge de travail ait déjà telle qu'ils n'ont pas de temps à consacrer à cette nouvelle pratique et ne voient pas comment prendre en charge des tâches supplémentaires. D'autres encore ont été échaudés par leurs premières expériences. Du côté des familles aussi, nous avons pu entendre des parents qui souhaitaient privilégier le face à face avec le médecin, malgré les inconvénients posés par le déplacement à l'hôpital, qui leur semblait plus fiable ou plus rassurant, ou des parents qui n'avaient pas été convaincus par leurs premières expériences.

Enfin, du côté des professionnels et parfois aussi des parents, ce sont aussi un certain nombre de risques ou d'écueils possibles qui ont pu être avancés dans les entretiens ou au fil du travail d'analyse mené avec eux. Nos interlocuteurs ont pu notamment souligner un ensemble de difficultés tournant autour du travail en équipe pluridisciplinaire, du partage d'informations et de la confidentialité : échanger des

informations à caractère médical, en présence de la famille, entre professionnels de structures différents, médicaux, mais aussi rééducatifs et éducatifs, ne va pas forcément de soi [17]. Certains professionnels s'interrogent notamment du point de vue des normes et références de leurs métiers (et de ce qui s'y fait « normalement »), ou du point de vue de la famille en posant la question de son intimité, et de son souhait éventuel de ne pas forcément échanger les mêmes choses avec tous les intervenants.

C'est aussi le risque d'un glissement de responsabilités qui a parfois été souligné dans le travail avec les professionnels : risque que la famille se « décharge » sur l'IME d'une partie du suivi médical qui, du point de vue des professionnels, leur incombe (comme les prises de rendez-vous), voir même risque qu'ils ne viennent plus lors des téléconsultations, mais risque aussi qu'eux-mêmes prennent trop de place autour et lors des téléconsultations en ne permettant pas suffisamment à la famille de s'exprimer et de prendre part au cours des échanges.

Enfin, une préoccupation fréquente tourne aussi, tant du côté des professionnels et des familles, autour du risque que les consultations en co-présence directe deviennent moins fréquentes : ils s'accordent à souligner que si les téléconsultations peuvent être une ressource précieuse, elles ne peuvent qu'être un complément des consultations en co-présence physique. Il serait dès lors nécessaire de définir plus précisément pour quels types de diagnostics, suivis et prescriptions et selon quels types de fragilité du patient, le recours à la téléconsultation serait le plus approprié.

V. REFERENCES

- [1] Bourg, V. (2007). Le Polyhandicap. Collège français des enseignants universitaires de médecine physique et de réadaptation. Document mis en ligne le 28-4-12 sur le site du Cofemer <http://ancien.cofemer.fr/UserFiles/File/ENF07polyhand.pdf>
- [2] Billette de Villemeur, T. & al. (2012). Le parcours de santé de l'enfant polyhandicapé. *Archives de Pédiatrie*, 19(2), 105-108. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2011.11.013>
- [3] Billette De Villemeur, T. & al. (2019). *Characteristics of Polyhandicapped Patients. About a 875 Patients Cohort.* s-0039-1685438. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1685438>
- [4] Gaglio, G., & Mathieu-Fritz, A. (2018). Les pratiques médicales et soignantes à distance : La télé-médecine en actes. *Réseaux*, n° 207(1), 9. <https://doi.org/10.3917/res.207.0009>
- [5] Hully & al. (2017). Patients with Profound Intellectual and Multiple Disabilities (PMID) and access to the pediatric neurologist : An opportunity for Telemedicine? *European Journal of Paediatric Neurology*, 21, e210. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2017.04.1097>
- [6] Hully, M. (2021). Télé-médecine et polyhandicap dans le contexte de la crise sanitaire Covid-19: *Contraste*, N° 53(1)
- [7] Bobillier Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : Premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22(1), 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>
- [8] Bobillier-Chaumon, M., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : Quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain*, 72(4), 355. <https://doi.org/10.3917/th.724.0355>
- [9] Mathieu-Fritz, A., & Gaglio, G. (2018). À la recherche des configurations sociotechniques de la télé-médecine. *Réseaux*, n° 207(1), 27-63.
- [10] Bobillier Chaumon, M.E. et Sarnin P. (dir.). (2012). *Manuel de Psychologie du travail et des organisations : Les enjeux psychologiques du travail.* Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck.
- [11] Clot, Y. (2008). *Travail et pouvoir d'agir.* Paris : Presses universitaires de France.
- [12] Bonnemain, A. et Clot, Y. (2017). Clinique de l'activité : les affects dans l'autoconfrontation. Dans M. Santiago-Delefosse et M. Del Rio Carral (dir.), *Les méthodes qualitatives en psychologie et sciences humaines de la santé (p.131-151).* Paris, France : Dunod.
- [13] Strauss A. & al. (1982). The work of hospitalized patients. *Soc. Sci. Med.*, n° 16, 977-986.
- [14] Grosjean, M., Lacoste, M. (1999). *Communication et intelligence collective.* Paris: Presses Universitaires de France
- [15] Lhuillier, D. (2006). *Cliniques du travail.* Toulouse : Érès.
- [16] Caroly, S. et Barcellini, F. (2013). Le développement de l'activité collective. Dans P.Falzon (dir.), *Ergonomie constructive* (p. 33-46). Paris : Presses universitaires de France.
- [17] Agrali, S. (2017). Le secret professionnel et le partage d'informations: Le travail en équipe pluridisciplinaire et l'espace de la réunion de synthèse. *Mémoires*, 69, 8-9. <https://doi.org/10.3917/mem.069.0008>
- [18] MATHIEU-FRITZ A., ESTERLE L. (2013), « Les transformations des pratiques professionnelles lors des téléconsultations médicales. Coopération interprofessionnelle et délégation des tâches », *Revue française de sociologie*, n° 54, vol. 2, pp. 303-329.

Vers une approche inclusive de découverte des œuvres d'art

Accessibilité à la culture des personnes présentant des incapacités visuelles

K.Romeo¹

¹Université de Rouen Normandie
LITIS, Saint Etienne du Rouvray, France
Katerine.Romeo@univ-rouen.fr

M. Chottin³, H. Thompson⁴

³IHRIM, CNRS/ENS de Lyon, France
⁴Royal Holloway University of London
Londres, Royaume Uni

Abstract— Les musées dans le monde présentent leurs collections – peintures, sculptures et autres œuvres d'art - surtout pour le sens visuel, sans la possibilité de pouvoir les toucher car ces objets sont considérés comme fragiles ou bien leur taille ne permet pas de les toucher. L'approche inclusive devient une priorité pour que ces œuvres d'art soient accessibles pour tous. Les éléments figuratifs des peintures sont difficiles à décrire avec des mots mais peuvent être représentés tactilement. Certains éléments ne peuvent pas être perçus par le toucher, par exemple les couleurs, les lumières, certains liens entre les éléments, mais ces éléments et les émotions induites peuvent être évoqués via l'audiodescription. En utilisant notre tablette à retour de force F2T, l'audiodescription d'un élément dans une peinture peut être renforcée et complétée. Nous proposons une nouvelle approche inclusive de découverte des œuvres d'art alliant l'audiodescription inclusive aux mouvements du doigt de l'utilisateur sur la tablette F2T, tout en donnant la possibilité d'une exploration tactile libre et interactive.

Mots-clés— *Perception multimodale; approche inclusive; accessibilité; audiodescription; tactile; retour de force, Tablette F2T*

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, en France et dans le monde, la plupart des musées de peinture proposent des dispositifs de médiation à destination des personnes présentant une incapacité visuelle (PPIV). La majorité de ces dispositifs consistent en des visites guidées par des conférenciers ou conférencières formés à la « déficience visuelle » [1]. Au cours de ces visites, une conférencière ou un conférencier décrit quelques tableaux, et parfois donne aussi à toucher des dessins en relief réalisés à partir de ces œuvres, ou encore certains des objets ou matières qui se trouvent sur la toile¹, ou bien encore des transpositions tridimensionnelles (comme la mallette multisensorielle du Petit Palais qui contient la transposition en volume de « La balayeuse » de Pieter Janssens Elinga). Beaucoup plus rarement, certaines œuvres sont accompagnées in situ de leurs reproductions tactiles²[2]. Enfin, plusieurs musées proposent depuis peu des audio-guides censés être accessibles aux personnes aveugles et malvoyantes, qui se distinguent des audio-

guides traditionnels par le fait qu'ils ajoutent au commentaire une description de l'œuvre³[3].

L'insuffisance de ces dispositifs peut se présenter en six points :

1) *Le principe des visites guidées*, organisées de façon très ponctuelle, le plus souvent en semaine lorsque les personnes aveugles et malvoyantes peuvent travailler, ne garantit pas l'égalité d'accès [4] dont la loi « handicap » de 2005 fait un droit.

2) *La qualité des descriptions* dépend des compétences des conférenciers, dont la formation au « handicap visuel », non obligatoire, n'a généralement pas été effectuée, ou pas convenablement [5].

3) *Ces descriptions* sont toujours entremêlées d'éléments historiques et contextuels, ce qui prive les PPIV d'un accès à l'expérience purement sensible de l'oeuvre.

4) *Les facsimile tactiles*, à la fois coûteux et volumineux, sont jugés trop peu nombreux pour justifier un déplacement dans les musées qui les proposent [5].

5) *Dans les cas rares où des transpositions tactiles* (e.g. les stations tactiles du Musée du quai Branly), sont offertes aux visiteurs, plusieurs personnes ne peuvent explorer en même temps une même expôt, contrairement à ce qui se passe avec le sens de la vue, vecteur d'un partage d'expérience [6].

6) *La plupart de ces dispositifs sont générateurs de frustrations* parce qu'ils visent avant tout l'identification des éléments picturaux et la transmission du contexte historique et artistique de l'œuvre, et non à susciter une expérience esthétique [5].

Nous proposons dans cet article de combiner l'écoute et le toucher pour une perception multisensorielle qui augmente l'impact et la mémorabilité de l'œuvre. Pour réunir de façon efficace ces deux modes de transmission, nous présentons dans

¹ Notamment au Musée Picasso à Paris, au Petit Palais, au Musée d'Art Moderne de la Ville de Paris et au Musée des Beaux-Arts à Rouen.

² Par exemple, « L'atelier du peintre de Courbet au Musée d'Orsay, « La Vierge entre les vierges » de Gérard David, « Temps gris » de Claude Monet au Musée des Beaux-Arts de Rouen, « Le Dénombrement de Bethléhem » de Brueghel le

Jeune au Palais des Beaux-Arts de Lille, la « Bataille de Pavie » à la Pinacothèque de Brera de Milan.

³ C'est le cas à Paris du Centre Pompidou et du Grand Palais, et du Musée d'Arts de Nantes.

cet article l'utilisation des éléments figuratifs et non figuratifs (Section II) avec l'approche multisensorielle. L'approche audio descriptive inclusive est expliquée dans la Section III, et l'approche tactile avec retour de force et guidage du doigt est introduite dans la Section IV. La Section V clôt cette communication avec une conclusion et dresse quelques perspectives.

II. APPROCHE MULTISENSORIELLE

Les éléments figuratifs des peintures sont difficiles à décrire avec des mots, mais peuvent être présentés tactilement. D'autres éléments ne peuvent pas être perçus par le toucher, par exemple les couleurs, la lumière, certains liens entre les éléments ; mais ces éléments et les sentiments qu'ils suscitent peuvent être évoqués via l'audiodescription.

Pour comprendre pourquoi les éléments figuratifs sont difficiles à décrire, nous pouvons citer l'histoire rapportée par Diderot : Des peintres travaillent en suivant une description très fine du visage d'une personne ; les portraits réalisés à la fin ressemblent tous rigoureusement à la description donnée, mais aucun ne ressemble à un autre, ni même à la personne décrite [7].

Le sens de cet apologue est assez net : une description avec des mots est impuissante à susciter dans l'esprit l'image exacte de ce dont elle est la description – et ce, pour au moins deux raisons :

1) *la nature du langage*, dont les mots ne peuvent être que généraux, là où les sensations sont toujours particulières (on a beau distinguer indéfiniment les différentes formes de bouche, qu'on ne parviendra pas à saisir celle, absolument singulière, de la femme aimée).

2) *la nature de l'imagination*, dont Descartes déjà soulignait les limites : s'il nous est possible de nous représenter mentalement des figures simples, notre imagination atteint rapidement ses limites pour les figures complexes.

« Je remarque premièrement la différence qui est entre l'imagination et la pure intellection, ou conception. Par exemple, lorsque j'imagine un triangle, je ne le conçois pas seulement comme une figure composée et comprise de trois lignes, mais outre cela je considère ces trois lignes comme présentes par la force et l'application intérieure de mon esprit ; et c'est proprement ce que j'appelle imaginer. Que si je veux penser à un chiliogone, je conçois bien à la vérité que c'est une figure composée de mille côtés, aussi facilement que je conçois qu'un triangle est une figure composée de trois côtés seulement, mais je ne puis pas imaginer les mille côtés d'un chiliogone, comme je fais les trois d'un triangle, ni pour ainsi dire, les regarder comme présents avec les yeux de mon esprit ». « Que s'il est question de considérer un pentagone, il est bien vrai que je puis concevoir sa figure, aussi bien que celle d'un chiliogone, sans le secours de l'imagination ; mais je la puis aussi imaginer en appliquant l'attention de mon esprit à chacun de ses cinq côtés, et tout ensemble à l'aire, ou à l'espace qu'ils renferment. Ainsi je connais clairement que j'ai besoin d'une particulière

contention d'esprit pour imaginer, de laquelle je ne me sers point pour concevoir [...] » [8].

En somme, une description de figures et de leur agencement sur la toile ne suscitera jamais dans l'esprit ce que leur tracé suscite sur la sensibilité – d'où l'importance de la transposition tactile.

Réciproquement, le tactile seul n'est pas suffisant :

- 1) Il ne permet pas à lui seul d'identifier ce qui est ressenti.
- 2) Certains éléments ne peuvent être perçus tactilement, par exemple les couleurs, les lumières, quelques liens entre les éléments, ainsi que les expressions faciales.

Si les transpositions tactiles permettent d'appréhender la composition globale de la peinture, ses lignes de force, et les formes simples qui y sont peintes, elles échouent bien évidemment à transmettre ce qu'Aristote appelait les « sensibles propres de la vue », à savoir les couleurs, et tout ce qui leur est corrélé : la lumière, le regard des personnages, les ombres qui donnent sa perspective au tableau, etc.

Ces éléments et les sentiments qu'ils suscitent peuvent être évoqués via l'audiodescription. Il est donc nécessaire d'articuler l'écoute et le toucher : articulation d'une présentation tactile globale et d'une audiodescription qui la complète au niveau 1) du cadre général de l'œuvre ou de la scène ; 2) du sens de ce que l'on touche ; 3) des éléments particuliers qui ont été enlevés lors de la transposition tactile ; 4) des éléments visuels (couleurs, lumière, etc.) ; 5) des connaissances historiques.

III. APPROCHE AUDIO DESCRIPTIVE INCLUSIVE

Le consortium TETMOST a organisé, en 2018, une série d'ateliers, au cours desquels des descriptions de tableaux destinées à susciter, par l'écoute, une expérience esthétique, ont été co-écrites par des personnes aveugles, des personnes malvoyantes et des personnes qui voient. Après avoir été lus et amendés par le spécialiste de la peinture aborigène Philippe Peltier, un échantillon de ces textes a été proposé à l'écoute de 27 personnes douées de capacités visuelles variées : 11 personnes aveugles précoces, 8 personnes aveugles tardives, 5 personnes malvoyantes et 3 personnes sans incapacité visuelle placées sous bandeau. Chacune d'elles a écouté deux audio descriptions portant sur un même tableau (« Le Rêve du serpent » de W. Tjapaltjarri ou « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham » de R. Thomas).

On a pu constater que les couleurs et autres éléments proprement visuels peuvent être, au moyen du langage :

- 1) *imaginés* par les personnes qui ont déjà vu et ont conservé des souvenirs visuels,
- 2) *ressentis* à leur manière par les personnes qui n'ont jamais vu : les couleurs sont associées à des sentiments, des idées abstraites, des expériences tactiles, etc.

Nous avons pu établir que les descriptions d'éléments visuels produisent une véritable expérience esthétique. Alison Eardley montre que les audiodescriptions suscitent chez les voyants aussi des expériences esthétiques [9]. Les descriptions audios des éléments visuels constituent ainsi une approche inclusive et prennent en considération les attentes de chacun.

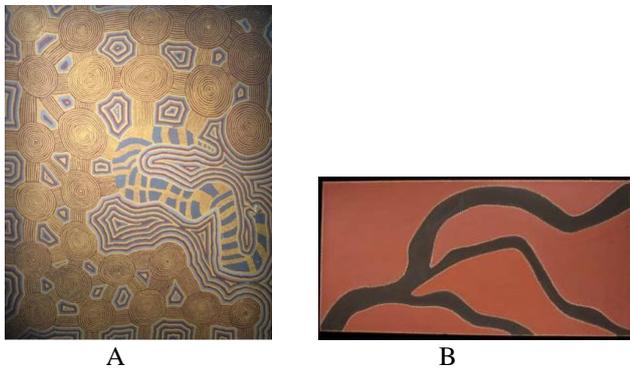


Figure 1. L'audiodescription sur deux tableaux de peintres aborigènes d'Australie. A) Le rêve du Serpent, de W. Tjapaltjarri ; B) « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham » de R. Thomas.

Concernant l'émotion suscitée par l'audiodescription, le tableau 1 contient les réponses à la question : « En écoutant cette audiodescription, avez-vous vécu une expérience, un plaisir esthétique ? » Parfois, les personnes n'ont pas eu d'expérience esthétique, parfois elles en ont eu une après avoir écouté les deux types d'audiodescription.

Le tableau 1 indique toute la diversité de préférences des personnes avec ou sans déficience visuelle entre les audio descriptions (AD) objectives (ou à visée objective, c'est-à-dire les plus neutres possibles) et sensibles (à visée littéraire et assumant une subjectivité). On peut observer que les audiodescriptions sensibles ont été préférées par une majorité.

TABLE I. SUR L'ÉMOTION SUSCITÉE PAR L'AD

Préférence	Le Rêve du serpent		Rivière Ord, Rivière Bow, Rivière Denham	
	AD objective	AD sensible	AD objective	AD sensible
Personnes aveugles précoces: 11	2	4	3	2
Personnes aveugles tardives: 7	1	1	1	5
Personnes malvoyantes: 6		2		2
Personnes sans incapacité visuelle: 4		2	1	1

La majorité des participants malvoyants et aveugles ont préféré les audiodescriptions sensibles. Les personnes aveugles tardives qui ont vu les couleurs ont préféré à 75% les audiodescriptions sensibles et à 25% les audiodescriptions objectives, ce qui est le même pourcentage pour les participants voyants les yeux bandés ; tandis que les participants aveugles précoces étaient divisés dans leur choix (45% ont choisi l'audio

description objective, 55% celle qui était sensible). Nous pouvons observer qu'une peinture peut susciter une expérience esthétique même chez des personnes qui n'en ont jamais vu.

IV. APPROCHE TACTILE

Le premier mérite du toucher est de faire sentir les formes picturales telles qu'elles sont sur le tableau (et non de manière approximative comme le fait une description). La transposition tactile d'une œuvre d'art peut aussi apporter des sensations de mouvement : permettre de sentir l'ondulation d'une vague, le pas d'un cheval, etc. Mais comme il a été dit plus tôt dans la section II, les éléments tactiles ne transmettent pas tout, comme la couleur ou le contexte. Et nous avons besoin de formes simplifiées pour faciliter la transcription des œuvres d'art à la perception tactile [10]. La segmentation de divers éléments de la peinture pourrait se faire semi-automatiquement sous la direction des conservateurs de musée.

Ainsi, pour une approche multisensorielle, nous proposons une tablette à retour de force, F2T [11] qui peut réagir aux mouvements de l'utilisateur et appliquer une force contre ou en ligne avec le mouvement du doigt de l'utilisateur en fonction des propriétés caractéristiques de l'élément sur la peinture (Fig.2).

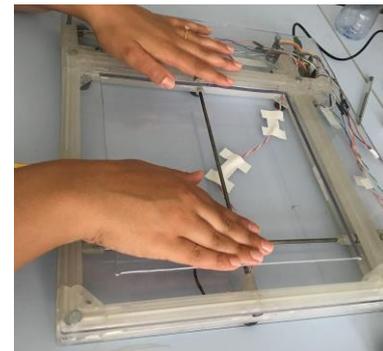


Figure 2. Tablette à retour de force F2T.

L'accompagnement tactile pour l'audiodescription avec F2T peut :

1) *Donner une première impression (gist)*. L'utilisateur peut explorer librement tout l'espace de l'image de peinture sur la tablette dont la largeur et la longueur sont de 25 cm. Certaines zones pourraient être définies comme des murs ou des limites de la forme explorée [12].

2) *Guider le doigt dans l'exploration*. Les formes géométriques simples sont faciles à reconnaître, mais lorsque l'exploration devient plus complexe, le mode de guidage peut raccourcir le temps d'exploration.

3) *Proposer de l'interactivité*. L'exploration avec le doigt peut être accompagné de courtes descriptions audios des éléments touchés virtuellement à travers le joystick.

4) *Créer les bords et les reliefs*. Les frontières ou le profil de l'élément exploré peuvent être infranchissables avec le doigt

pour une meilleure appréhension de la forme intérieure ou bien avec un relief qui peut être franchi avec une illusion tactile de pente.

5) *Créer des effets d'écoulement ou de rail.* Ces effets sont utiles pour garder le doigt dans un parcours prédéterminé sur l'image du tableau. Le retour de force donne une sensation de résistance quand le doigt s'éloigne du chemin et une sensation d'accélération quand le doigt est sur le parcours.

6) *Créer des attracteurs.* Le doigt est attiré vers un élément particulier de l'œuvre d'art.

7) *Créer des textures.* Les effets de texture sont produits avec un retour de force en créant une sensation de résistance (frottement solide, frottement liquide) [13].

Ces mouvements associés à l'audio description procurent une émergence originale de perceptions (gist) et stimulent l'imagination. Les personnes présentant une incapacité visuelle et les personnes voyantes avec un bandeau qui ont participé à nos tests ont décrit fidèlement les figures découvertes avec le doigt guidé par le joystick [13]. Les participants ont exprimé leur satisfaction d'avoir exploré librement la surface de la tablette F2T en plus d'être guidés [12] même si cela prend plus de temps.

Pour illustrer l'articulation de l'écoute et du toucher, deux exemples de parcours tactiles sont donnés dans la Figure 3, pour l'audiodescription objective du tableau « Le rêve du serpent » dont le texte est dans l'annexe de cet article. Le parcours est représenté avec un trait de couleur verte, il peut démarrer si l'utilisateur souhaite être guidé pendant l'audiodescription et peut être répété si nécessaire.

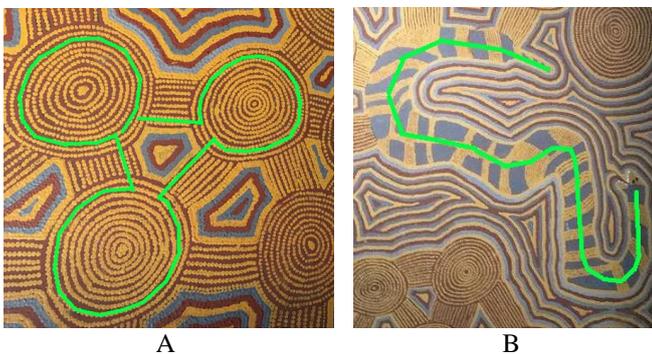


Figure 3. Deux exemples de parcours tactiles sont donnés pour le tableau « Le rêve du serpent ». A) Les cercles concentriques reliés avec des traits ; B) La forme du serpent caché dans le tableau.

Si l'utilisateur souhaite explorer par lui-même et à son rythme les différents éléments du tableau après avoir écouté l'audiodescription, il est possible de reprendre un élément et de l'explorer pour bien appréhender ses formes. Les exemples dans la Figure 4 montrent les images tactiles générées par les contours des éléments de la Figure 3, les cercles concentriques reliés avec des traits (Fig. 4.A) et la forme du serpent (Fig. 4.B). Ces images peuvent être explorées de façon libre. Le contour des éléments peut être suivi avec le doigt à l'intérieur des espaces représentés avec la couleur verte qui reste infranchissable. Le doigt de l'utilisateur est amené à la surface blanche comme au départ du

parcours tactile. Dans cet exemple l'exploration du contour a été choisi par l'intérieur pour que l'utilisateur « touche » virtuellement l'élément. Il est possible d'inverser les surfaces infranchissables comme dans le cas d'exploration d'un profil humain où l'on peut « toucher » le contour du nez, etc.

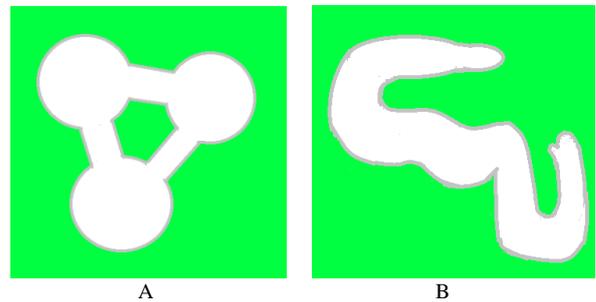


Figure 4. Exploration libre des éléments du tableau « Le rêve du serpent ». Les espaces présentés avec la couleur verte sont infranchissables, ce qui permet d'explorer le contour de l'intérieur. A) Les cercles concentriques reliés avec des traits ; B) La forme du serpent.

Un autre exemple de parcours tactile est donné dans la Figure 5 pour le tableau « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham » dont la description « sensible » se trouve dans l'annexe à cet article. Plusieurs éléments du tableau (les trois rivières) peuvent être explorés à tour de rôle et l'endroit où les affluents se rejoignent est indiqué avec un hexagone. Cet endroit peut être repéré par rapport à la taille du tableau représenté sur la surface de la tablette F2T.

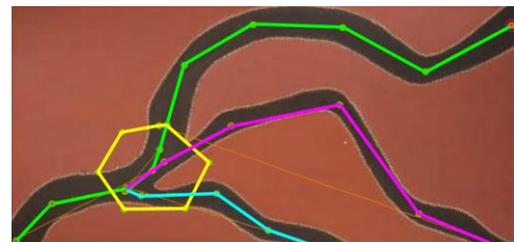


Figure 5. Le parcours tactile du tableau « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham ». Le parcours de chaque rivière peut être suivie individuellement, le point de rencontre est montré avec un hexagone.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous présentons une nouvelle approche de l'articulation de l'audiodescription inclusive et du toucher virtuel des œuvres d'art. Nous confirmons que l'audiodescription est un complément indispensable à l'appréhension d'une œuvre d'art par le toucher: une présentation tactile et une description audio qui la complète selon le choix de l'utilisateur. L'audiodescription peut également valoir pour elle-même, sans vision, sans toucher. Mais la perception de l'œuvre est plus précise si elle est complétée par une représentation tactile.

Cette approche multisensorielle s'adresse à tout le monde, et non seulement aux personnes déficientes visuelles, elle est donc inclusive. La perception multisensorielle des éléments virtuels peut se pratiquer au musée ou à la maison et ouvre des

possibilités d'accès à la culture pour des publics empêchés. C'est une démarche inclusive, elle permet de ressentir de nouvelles émotions devant une œuvre d'art et a pour but de rendre la culture attractive à tous.

Quand on touche une œuvre virtuelle et qu'elle prend vie avec le mouvement et l'audiodescription, de nouvelles émotions émergent, celles-ci s'expriment sous forme de mots et permettent des échanges sur le contenu de l'œuvre d'art.

Notre recherche continue sur les peintures du Musée du quai Branly, la Tapisserie de Bayeux et les tentures de l'Apocalypse au château d'Angers. Chaque œuvre d'art a ses spécificités et les méthodes de description audio et tactiles doivent s'adapter pour créer la perception la plus proche du réel. Nous projetons d'organiser de nouveaux tests pour améliorer l'articulation des audiodescriptions avec l'exploration tactile et pour les adapter aux différents types d'œuvre d'art.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Claire Bartoli, Patrick Crespel, Nadine Dutier, Claude Gilbert, Maryse Jacob, Hamid Kohandel, Valérie Pasquet pour l'écriture des AD, l'organisation et la participation aux tests, ainsi que l'association Valentin Haüy et la Fédération des Aveugles et Amblyopes de France (FAF) qui ont hébergé les tests dans leurs locaux. Nous remercions Edwige Pissaloux, Simon Gay et Marc-Aurèle Rivière pour l'organisation des expériences avec la F2T.

REFERENCES

- [1] F. Reichhart, A. Lomo, "L'offre culturelle française à l'épreuve de la cécité : étude de cas de l'accessibilité au musée" Canadian Journal of Disability Studies CJDS 8(6), 6-23, University of Waterloo, Décembre 2019. <https://doi.org/10.15353/cjds.v8i6.577>
- [2] Mariage, A. : Les Médiations tactiles : Elargir l'accès aux collections muséales pour le public handicapé visuel. Mémoire M2, Ecole du Louvre, Paris (June 2020).
- [3] Chauvey, V. : Texts in museums for non-sighted visitors: how to approach content and format choices?, La letter de l'OCIM, Musées, Patrimoine et Culture scientifiques et techniques, 132, pp. 40-47, Nov-Dec 2010. DOI: 10.4000/ocim.391
- [4] Thompson, H.: Recent Work in Critical Disability Studies, Edinburgh University Press, Paragraph, pp.233-244, 41.2 (2018).
- [5] Dhrif, R. : L'Accès aux Musées chez les Déficients Visuels : Entre Variété de l'Offre et Complexité des Besoins, Mémoire M2, Université Paris 13, (2018)
- [6] Romeo, K., Chottin, M., Ancet, P., Pissaloux, E.: Access to Artworks and its Mediation by and for Visually Impaired Person, Int. Conf. Comp. Help. People, pp. 233-236, ICCHP 2018.
- [7] Diderot, D., ENCYCLOPEDIE, Diderot, D. et D'Alembert, J. Ed : Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, vol. 5, 1755, p. 639b.
- [8] Descartes, R., Méditations métaphysiques [1641], The Philosophical Writings of Descartes, translated by J. Cottingham, R. Stoothoff and D. Murdoch, Cambridge University Press, vol. 2, p. 50.

- [9] R. Hutchinson, A.F. Eardley, "Inclusive museum audio guides: 'guided looking' through audio description enhances memorability of artworks for sighted audiences", Museum Management and Curatorship, 2021. DOI: 10.1080/09647775.2021.1891563
- [10] Romeo, K. Chottin, M., Ancet, P., Lecomte, C., Pissaloux, E.: Simplification of Painting Images for Tactile Perception by Visually Impaired Persons, Int. Conf. Computers Helping People, pp. 251-257, ICCHP 2018.
- [11] Gay, S., Rivière, M-A., Pissaloux, E.: Towards Haptic Surface Devices with Force Feedback for Visually Impaired People, Int. Conf. Comp. Helping People, pp. 259-266, ICCHP 2018.
- [12] Romeo, K., Gay, S., Rivière, M-A., Pissaloux, E.: Exploring maps with touch: An inclusive haptic device, Future Perspectives of AT, eAccessibility and eInclusion, Ed. Petz, A. Miesenberger, K., pp. 93-98, ICCHP Open Access Compendium 2020.
- [13] Gay S.L., Pissaloux, E., Romeo K., Truong, N-T.: F2T: A Novel Force-Feedback Haptic Architecture Delivering 2D Data to Visually Impaired People, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 94901-94911, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091441.

ANNEXE

Description "objective" de la peinture "Le Rêve du serpent"

La toile que vous avez devant vous est l'œuvre de l'artiste aborigène Warlimpirrnga Tjapaltjarri, qui appartient à l'ethnie Pintupi, originaire du désert de l'ouest de l'Australie. Cette toile peinte à l'acrylique date de 1989. Elle mesure 151,7 cm de haut sur 123 cm de large.

Trois grands types d'éléments composent cette toile où domine une couleur jaune ocre : des cercles concentriques reliés entre eux par des lignes, des formes plus anguleuses qui les séparent, et enfin le serpent qui a donné son titre au tableau.

Les cercles concentriques de couleur jaune, au nombre de 25, sont constitués chacun de 10 cercles. De tailles légèrement inégales, les plus grands sont situés dans la partie supérieure du tableau, les plus petits dans la partie inférieure.

Formés de petits points, ils représentent des étapes dans le voyage des grands ancêtres du Temps du rêve, mais aussi des repères géographiques qui sont des lieux rituels pour les membres de la communauté.

Ces cercles concentriques sont reliés par des séries de traits pointillés, un peu plus ou un peu moins d'une dizaine selon les cas, eux aussi de couleur jaune. Ils représentent quant à eux les chemins parcourus ou les chemins possibles.

Entre ces cercles et ces chemins se trouvent des formes irrégulières et anguleuses, constituées de bandes de couleurs jaune, bleue et rouge. On en compte une trentaine sur le tableau, de tailles très variables. Plusieurs d'entre elles paraissent coupées par le bord de la toile, à l'instar des séries de traits pointillés qui les séparent. Il pourrait s'agir de dunes désertiques. Vers le centre de la toile se trouve la queue du serpent, dont le corps fait une boucle sur la gauche puis descend vers la droite avant de remonter au niveau du bord droit du tableau, un peu plus bas que la moitié de sa hauteur, où se distingue sa tête, à peine visible au départ, marquée de deux points noirs pour les yeux, de toutes petites dents pointues peintes en blanc et d'une fine langue peinte en rouge.

Le corps du serpent est constitué, au niveau de ses deux extrémités, de bandes de couleur jaune et bleue, faites de pointillés, et, au niveau de sa partie centrale, de quadrilatères irréguliers, bleus sur fond jaune.

Les deux premiers tiers du corps du serpent sont entourés de séries de lignes alternant, comme les dunes, les couleurs rouge, jaune et bleue, son dernier tiers avec la queue semblant se situer à l'extérieur de ces lignes formant une espèce de cavité.

Selon la mythologie aborigène, ce serpent façonna les reliefs de la Terre en se déplaçant pendant la période du Temps du rêve, avant de se reposer dans un trou d'eau. Il devint ainsi le gardien de cette précieuse ressource.

Description « sensible » de la peinture « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham »

Cette grande toile, deux fois plus longue que large, offre un fond ocre rouge, couleur de terre, nu, épais, à la fois proche et lointain, sur lequel se détachent nettement trois bandes noires qui se rejoignent en bas à gauche du tableau.

Un cadre blanc vivant, vibrant, circonscrit cet ensemble : ce qui semblait de très loin, trait, contour linéaire, se révèle, à l'approche, succession de points blancs.

Les trois rubans noirs ondulants, traversant ce fond couleur de terre, sont ourlés de ces mêmes points blancs vibrants, vivants. Depuis l'angle supérieur droit, le plus large descend, s'élève en courbe et redescend de même jusqu'à l'angle opposé de la toile. Un autre, plus étroit, monte presque verticalement de l'angle inférieur droit, redescend en coude et

rejoint le premier. Le dernier, un peu plus large, beaucoup moins long, ondule depuis le bas du tableau et se fond avec les deux autres.

Cette forme noire aux trois rubans est-elle proche ou bien lointaine ? S'agit-il des longs bras d'une pieuvre ? D'une gueule qui crache des langues interminables ? Ou encore d'une branche d'arbre trois fois ramifiée ?

A moins que ces grands rubans noirs, également peints en aplat, soient ce que l'on entrevoit du fond de la toile -un fond obscur sur lequel des aplats couleur de terre se détacheraient et prendraient forme. Alors, les deux surfaces ocre entre les trois rubans font de mystérieuses figures, des mains gantées peut-être, l'une au-dessus de l'autre, ou deux têtes d'oies, elles aussi l'une au-dessus de l'autre, dont les becs sont tournés vers la gauche.

Toile réversible, perception mystérieusement brouillée, son titre révèle que la couleur ocre constitue le fond, et les rubans noirs trois rivières peintes sur ce fond : intitulée « Rivière Ord, rivière Bow, rivière Denham », peinte par l'artiste aborigène Rover Thomas à la fin du XX^e siècle, cette toile renvoie au lieu où ces rivières s'unissent, dans le nord-ouest désertique de l'Australie.

Session 5 : IA et Outils pour la Détection

Président de session : Frédéric Bousefsaf

Estimation sans contact de la tension artérielle par intelligence artificielle

Frédéric Bousefsaf* Théo Desquins*[†] Djamaledine Djeldjli* Yassine Ouzar* Choubeila Maaoui* Alain Pruski*
 * LCOMS, Université de Lorraine
 F-57000 Metz, France
 frederic.bousefsaf@univ-lorraine.fr
[†] i-Virtual
 F-57000 Metz, France
 theo.desquins@i-virtual.fr

Résumé—Les pathologies cardiovasculaires sont désignées par l’OMS comme étant la première cause de mortalité dans le monde. Elles sont responsables de près de la moitié des maladies invalidantes aujourd’hui. Un ensemble de technologies permettent de mesurer différents signaux physiologiques et fonctions vitales sans qu’aucun contact avec la personne ne soit nécessaire. Les caméras et webcams sont des technologies omniprésentes et accessibles. Elles sont désormais utilisées afin d’évaluer l’état de l’appareil cardiovasculaire en vue du diagnostic de pathologies relatives au cœur ou aux vaisseaux sanguins. Nous proposons, dans cet article, une nouvelle méthode permettant de mesurer la tension artérielle d’une personne à partir de vidéos délivrées par une caméra. L’analyse est effectuée sur le visage de la personne par une observation des fines variations de couleur qui apparaissent à chaque fois que le cœur bat et envoie du sang dans le corps. L’intelligence artificielle, à travers le développement de modèles d’apprentissage profond (deep learning), est ici utilisée. L’estimation déportée de fonctions physiologiques concerne tout autant les personnes saines que malades ou immobilisées, vieillissantes ou en perte d’autonomie ainsi que dépendantes ou en situation de handicap.

Mots clés—fonctions vitales, intelligence artificielle, technologies sans contact, activité cardiovasculaire, tension artérielle

I. INTRODUCTION

L’OMS désigne les maladies cardiovasculaires comme étant la première cause de mortalité dans le monde [1]. Ces pathologies et leurs risques s’accroissent avec le vieillissement en raison de la prévalence élective dans les tranches d’âge les plus élevées de la population. Les pathologies respiratoires ou cardiovasculaires sont responsables de près de la moitié des maladies invalidantes. Les personnes en situation de handicap (en particulier dans le cas de déficience motrice) sont plus sujettes à des pathologies d’origine cardiovasculaire comparées aux personnes sans handicap [2]. Une tension artérielle élevée en est un exemple typique.

Dans ce contexte, la mesure de données physiologiques et médicales à distance correspond à une solution d’intérêt : elle permet aux personnes d’effectuer des mesures fréquentes de leurs fonctions vitales, favorisant ainsi le diagnostic précoce ou un meilleur suivi de la ou des pathologies. Idéalement, les mesures déportées doivent être prises de manière non-invasive ; sans instrumentation supplémentaire ou spécifique ; sans contact, de préférence par le biais des caméras embarquées dans les systèmes mobiles. L’estimation déportée de fonctions physiologiques concerne tout autant les personnes

saines (diagnostic précoce) que malades ou immobilisées, vieillissantes ou en perte d’autonomie ainsi que dépendantes ou en situation de handicap (maladies invalidantes notamment).

Différentes technologies ont été développées ou utilisées au fil des années pour mesurer des fonctions et indicateurs biomédicaux à distance [3]. Ces systèmes sont de plus en plus préférés aux capteurs en contact car ils permettent de réduire la gêne occasionnée par l’instrumentation (patches adhésifs à placer sur la peau, câbles...) tout en améliorant le confort d’utilisation. D’un point de vue médical, une utilisation continue des éléments en contact peut entraîner des irritations voire des infections, notamment sur des peaux sensibles (personnes brûlées par exemple).

Les caméras et webcams sont des technologies qui permettent de mesurer un ensemble de signaux physiologiques liés à l’activité cardiaque et vasculaire [4], [5]. Le principe repose sur la photopléthysmographie et consiste à observer les

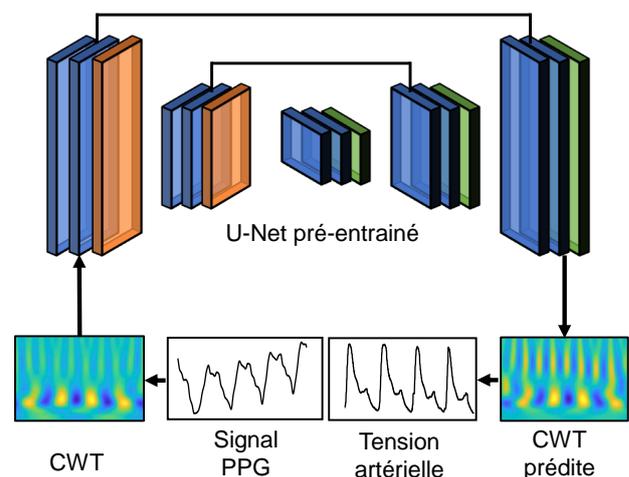


FIGURE 1: Vue d’ensemble de la méthode proposée dans ce travail. L’analyse vidéo du visage d’une personne permet de former son signal PPG. Le signal, à travers sa représentation en ondelettes (CWT), entre dans un modèle d’IA en forme de U qui se charge de le convertir en signal de tension artérielle.

variations de couleur sur la peau du visage pour en extraire les fluctuations périodiques du volume sanguin, délivrant ainsi un signal proche de l'onde de pouls. Un ensemble de paramètres physiologiques peuvent être calculés à partir de ce signal [6]–[10]. Les techniques d'intelligence artificielle (IA) sont de plus en plus étudiées [11], [12]. Les modèles d'IA délivrent généralement des performances plus intéressantes que les techniques conventionnelles reposant sur des opérations manuelles de traitement des images et du signal.

Nous proposons dans cet article une méthode permettant d'estimer, à partir de vidéos délivrées par une caméra, la tension artérielle d'une personne. L'analyse est effectuée par mesure de la photopléthysmographie sur le visage de la personne. Cela consiste à observer les fines variations de couleur apparaissant sur la peau. Nous présentons les détails de ce principe en section II. La section III est dédiée à la présentation de la méthode. Les étapes de traitement du signal et le modèle d'IA déployé pour répondre à cette problématique sont présentés. Les résultats et perspectives qui se dégagent de cette recherche sont exposés en dernière section. Cette étude s'inscrit dans la continuité de travaux récemment proposés par notre groupe de recherche [13]–[15].

Cette recherche présente l'une des toutes premières démonstrations de mesure de la tension artérielle par IA sur des flux vidéos délivrés par des caméras standards. Les résultats respectent d'ores et déjà un ensemble de métriques définies par les standards internationaux.

II. MESURE DE LA PHOTOPLÉTHYSMOGRAPHIE

La PhotoPléthysmoGraphie (PPG) repose sur un principe particulier : le sang absorbe plus de lumière que les tissus physiologiques tels que la peau [4]. Ainsi, la PPG correspond à la mesure des variations du volume sanguin par l'absorption et réflexion de la lumière (Fig. 2). Ces fluctuations de volume

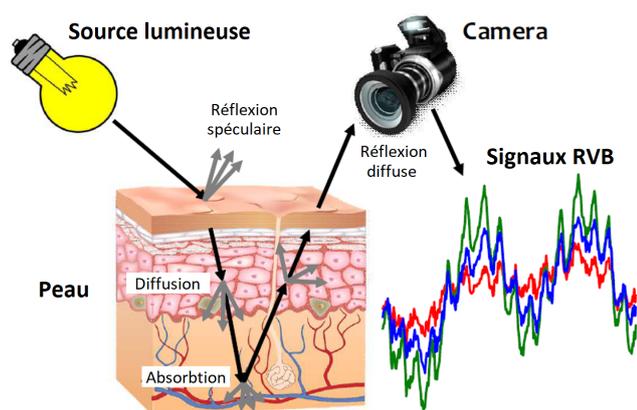


FIGURE 2: La photopléthysmographie consiste à mesurer les variations de l'absorption de lumière par les vaisseaux sanguins via une caméra. Les signaux formés (un par composante colorimétrique du capteur) traduisent les évolutions du volume sanguin à chaque battement cardiaque. Figure extraite de [16].

sont entraînées à chaque battement cardiaque (le volume croît lors de la contraction et décroît lorsque le muscle cardiaque se relâche).

Les premières études portant sur la mesure de la PPG par caméra ont été introduites en 2008 par Verkruysse et al. [18]. Les chercheurs mesuraient les signaux PPG à une distance d'environ 1 mètre dans une région d'intérêt définie manuellement sur le visage du sujet observé. Les pixels de la région d'intérêt sont moyennés à chaque trame et pour chaque canal chromatique rouge, vert et bleu (RVB) du capteur. Un groupe de pixels est ainsi transformé en un scalaire pour une image donnée.

Ce processus, répété pour chacune des trames, permet de transformer une vidéo RVB en trois vecteurs (Fig. 2) qui contiennent différentes informations physiologiques [7]–[9] dont notamment la fréquence cardiaque, le taux d'oxygène dans le sang, la pression sanguine ainsi que le rythme respiratoire. Les signaux PPG sont la plupart du temps lissés par filtre passe-bande [6] afin de réduire le bruit et les artefacts de mesure les plus marqués.

Le choix des régions d'intérêt du visage retenu pour la mesure de la PPG est un paramètre fondamental [18], [19]. Une étape de pré-segmentation de certaines parties du visage [10] ou de l'ensemble des pixels de la peau [6] peut être introduite. Le calcul de la moyenne spatiale, permettant de transformer les trames de la vidéo en signal, n'est effectué que sur les pixels retenus à l'issue de la pré-segmentation. Le mouvement correspond à la principale limite des méthodes. La PPG par caméra a néanmoins été exploitée de manière très soutenue ces dernières années [4], [5].

III. MÉTHODES

A. Base de données

BP4D+¹ est une base de données publique et ouverte à la communauté de recherche. La base intègre initialement des signaux physiologiques de référence (dont la tension artérielle continue mesurée par un capteur en contact), des images thermiques, des vidéos et des scans 3D de 140 participants [20]. Dix tâches ont été développées pour induire des émotions en laboratoire. La nature des tâches entraîne des mouvements plus ou moins intenses chez les participants. Ces déplacements créent des artefacts dans les vidéos, ce qui complexifie l'extraction du signal PPG. Une première phase de sélection, où seules les vidéos présentant des signaux PPG identifiables et de bonne qualité, a été effectuée. Nous avons ainsi conservé 57 sujets (21 femmes et 36 hommes) pour un total de 157 vidéos (car plusieurs tâches par sujet). Nous avons ensuite supprimé les échantillons présentant des signaux de tension artérielle de référence corrompus ou incohérents. Le listing des participants retenus est disponible sur le site web du projet (<https://github.com/frederic-bousefsaf/ippg2bp>). Ce sous-ensemble a été utilisé pour entraîner les modèles d'IA présentés dans cette étude.

1. http://www.cs.binghamton.edu/~lijun/Research/3DFE/3DFE_Analysis.html

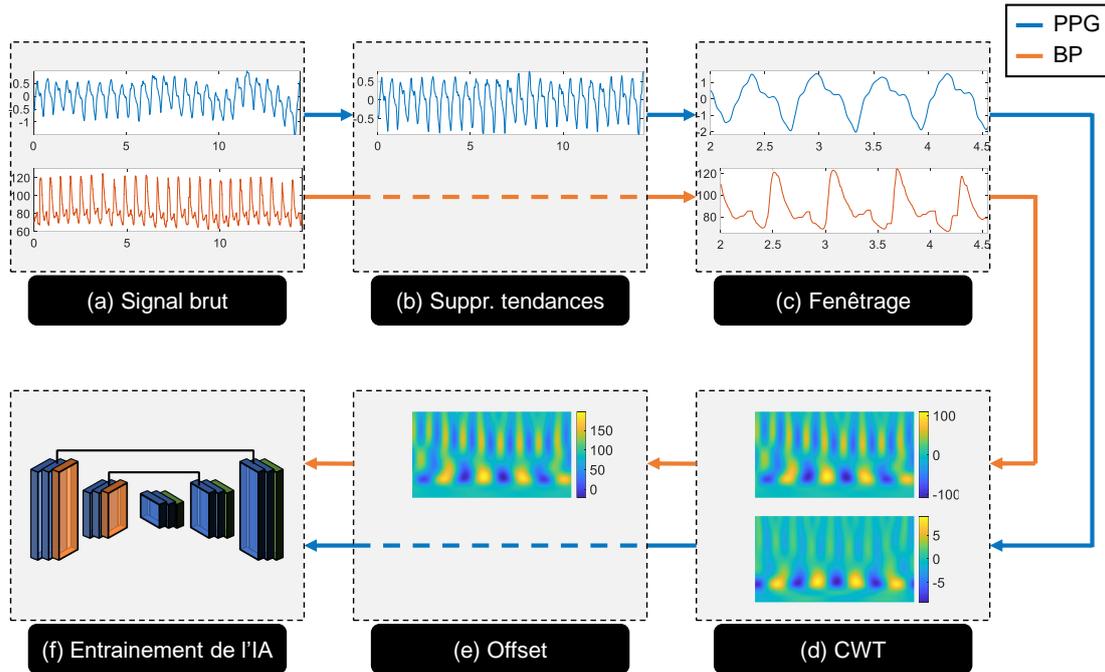


FIGURE 3: (a) Illustration d'un signal PPG calculé à partir d'une vidéo tirée de la base BP4D+ (en bleu) accompagné du signal de tension artérielle (Blood Pressure, BP) de référence (en orange). (b) La tendance basse fréquence du signal PPG est supprimée par une méthode de filtrage spécifique [17]. (c) Le signal est séparé en une collection d'extraits de 2.56 secondes. (d) La transformée en ondelettes continue (CWT) des signaux PPG et de tension artérielle est calculée dans la plage de fréquence [0.6, 4.5] Hz. (e) La valeur de tension artérielle moyenne du signal de référence étant perdue lors du calcul de la CWT, nous l'ajoutons à la représentation en ondelettes en l'additionnant à tous les coefficients. (f) Les représentations en ondelettes du signal PPG et du signal de tension artérielle sont utilisées pour entraîner les réseaux neuronaux présentés en section III-D.

Le signal PPG extrait de chaque vidéo a été découpé en petits extraits de 2.56 secondes à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz (256 valeurs par extrait). Un jeu de 4123 extraits a ainsi été constitué. 70 % du jeu (2887 extraits de 2.56 secondes) sont réservés pour l'entraînement du modèle d'IA, 15 % (618 extraits) pour la phase de validation et 15 % (618 extraits) pour la phase de test. Les tensions artérielles systolique (Systolic Blood Pressure, SBP), diastolique (Diastolic Blood Pressure, DBP) et moyenne (Mean Arterial Pressure, MAP) ont été calculées à partir du signal de référence fourni dans la base de données.

B. Constitution du signal PPG

La chaîne de traitement est similaire à une méthode récemment proposée par notre groupe de recherche [15]. Nous avons dans un premier temps utilisé une technique récente de segmentation du visage reposant sur un modèle neuronal convolutif [21] permettant de segmenter la peau du visage. Ce modèle a déjà été utilisé dans le contexte de l'extraction de signal PPG à partir de vidéos [22]. Le signal PPG est calculé grâce à une moyenne spatiale des intensités des pixels de peau sur le canal vert. la figure 3a présente un signal PPG brut calculé à partir d'une des vidéos de la base BP4D+. Les signaux sont ensuite rééchantillonnés sur 100 Hz. Un algorithme spécifique de suppression de tendances [17] permettant

d'atténuer les basses fréquences du signal est appliqué. la figure 3b montre l'impact de cette opération sur le signal PPG. Les extraits de 2.56 secondes sont ensuite calculés sur le signal PPG estimé à partir des vidéos ainsi que sur les signaux de tension de référence (voir figure 3c pour un exemple). Les signaux PPG ont été standardisés via la formule du z-score ($\mu = 0$ et $\sigma = 1$). Les jeux d'entraînement, de validation et de test ont été constitués à partir de tous ces extraits (voir section III-A).

C. Transformée en ondelettes continue

La transformée en ondelettes continue (Continuous Wavelet Transform, CWT) du signal PPG et de tension artérielle (Blood Pressure, BP) est utilisée pour entraîner le modèle neuronal présenté en section III-D. Une illustration générale de l'approche est présentée en figure 3. La CWT d'un signal correspond à une représentation temps-fréquence calculé à partir d'une fonction prototype appelée aussi ondelette mère. Contrairement à la transformée de Fourier, la CWT permet de détecter des changements abrupts de fréquence à l'aide d'une famille d'ondelettes calculée à partir de l'ondelette mère [15].

La CWT des signaux PPG et de tension artérielle est calculée dans la plage de fréquence [0.6, 4.5] Hz (plage des fréquences cardiaques chez l'être humain). La valeur de tension artérielle moyenne du signal de référence étant perdue

lors du calcul de la CWT, nous l'ajoutons à la représentation en ondelettes en l'additionnant à tous les coefficients (voir figure 3e) :

$$CWT_{BP} = CWT_{BP} + \mu_{BP} \quad (1)$$

Ici, μ_{BP} correspond à la valeur moyenne du signal de tension artérielle et CWT_{BP} aux coefficients de la transformée en ondelettes de ce même signal. Les CWT ont une dimension de $256 \times 256 \times 2$ pixels. Elles sont utilisées pour entraîner le modèle d'IA présenté dans la prochaine section.

D. Modèle d'IA

L'architecture neuronale développée dans ce travail a d'ores et déjà été proposée et testée dans un travail de recherche précédent [15]. Il s'agit d'une version modifiée du réseau U-Net initialement proposé par Ronneberger et al. [23] et soutenue par une ossature pré-entraînée (backbone). Ce type de réseau est très utilisé dans le milieu médical pour des tâches de segmentation sur des scanners [24]. L'architecture est composée d'une partie descendante (encodeur) complétée par une partie ascendante (décodeur), donnant ainsi une forme en U au réseau. La branche descendante contient un ensemble de couches convolutive et de sous-échantillonnage (pooling). La partie ascendante intègre des couches de déconvolution connectées aux convolutions de la partie descendante. Une vue schématique du réseau a été présentée en figure 1. Chaque couche convolutive intègre un noyau de taille (3, 3) couplé à une fonction d'activation Rectified Linear Unit (ReLU).

Une ossature correspond à un réseau (e.g. VGG16 ou ResNet) pré-entraîné sur des bases de données d'images très volumineuse telle qu'ImageNet [25]. Cette ossature est intégrée dans la partie descendante du réseau U-Net et l'entraînement consistera à optimiser les paramètres internes de la partie

ascendante. Nous avons, dans ce travail, initialisé le réseau U-Net avec une ossature ResNeXt101 [26]. Le nombre de variables modifiables pendant l'entraînement (poids et biais) est de 53 millions. Le choix de cette ossature particulière est motivé par les conclusions de notre précédent travail où les différentes ossatures les plus couramment utilisées ont été comparées [15].

La transformée en ondelettes (passée en entrée et prédite en sortie du réseau) contient une partie réelle et une partie imaginaire. Elle est donc définie sur deux canaux. Le carré moyen des erreurs (Mean Square Error, MSE) a été retenu en tant que fonction de coût pour l'entraînement du modèle :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i,j} \left(CWT_{i,j} - \widehat{CWT}_{i,j} \right)^2 \quad (2)$$

CWT correspond à la transformée en ondelettes du signal de tension artérielle de référence (voir figure 3d). \widehat{CWT} est la représentation en ondelettes prédite par le réseau de neurones (à partir de la CWT du signal PPG).

L'implémentation de l'IA a été effectuée sous Python via l'API Keras et la bibliothèque Tensorflow. La librairie Segmentation Models [27] proposée par P. Yakubovskiy a été utilisée pour développer l'architecture neuronale. L'entraînement a été lancé sur 500 époques via des lots de 16 images.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le réseau U-Net transforme un signal PPG, estimé à partir d'une analyse sur la vidéo de la personne, en un signal de tension artérielle par le biais de leurs représentations en ondelettes. La figure 4 illustre des exemples typiques d'estimation. Nous observons une similitude entre les signaux prédits et de référence. Les amplitudes et les formes d'onde prédites sont généralement bien retranscrites, en particulier au niveau des

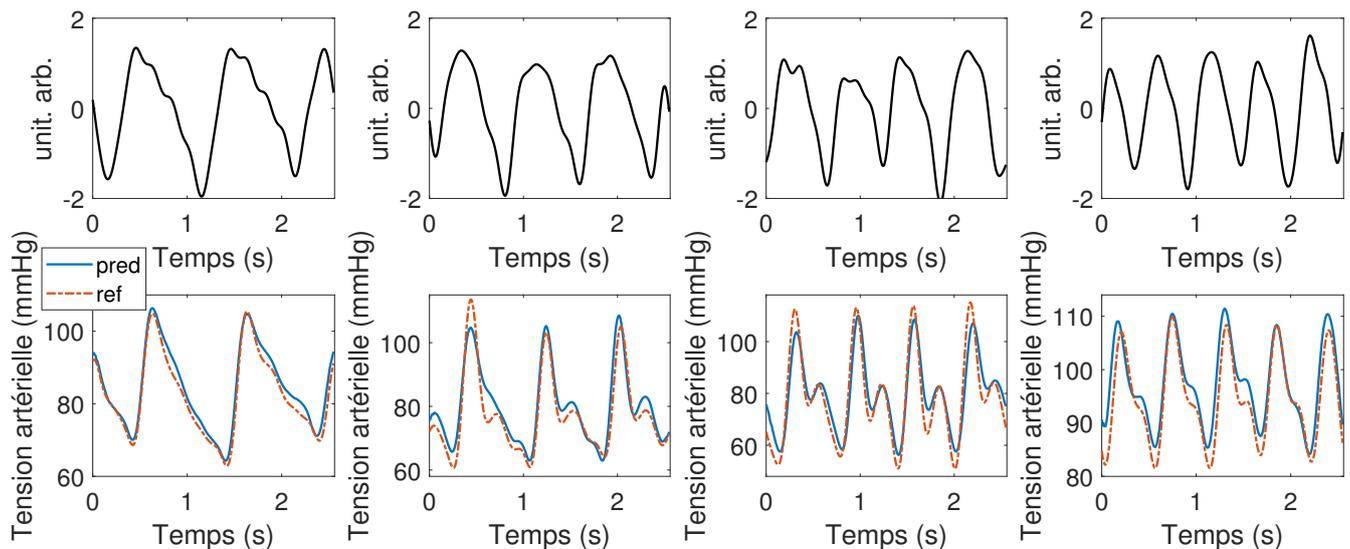


FIGURE 4: Exemples typiques de tensions artérielles continues prédites par le réseau U-Net pour différentes fréquences cardiaques. En haut : signaux PPG mesurés par caméra. En bas : tensions artérielles prédites et de référence.

pics maximums (qui serviront à calculer la tension systolique) et des pics minimums (tension diastolique). Nous avons évalué les performances globales à l'aide des standards internationaux [28], [29] définis par l'Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI) et par la British Hypertension Society (BHS). Nous soulignons toutefois que la base BP4D+ contient des vidéos et données physiologiques qui n'ont pas été enregistrées dans un contexte clinique. Aussi, le sous-ensemble constitué pour l'étude (voir section III-A) intègre 57 participants là où l'AAMI recommande d'évaluer les techniques d'estimation de la tension artérielle sur un minimum de 85 sujets.

A. Métriques générales

L'erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error, MAE , equation 3) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, $RMSE$, equation 4) sont utilisées pour quantifier la concordance entre le signal de tension prédit par le modèle d'IA (\widehat{BP}) et la référence (BP). Nous avons calculé ces métriques pour la DBP, MAP et SBP sur tous les extraits du jeu de test. Les résultats sont reportés dans le tableau I. Une analyse comparative présentant les résultats des études proches est proposée.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |BP_i - \widehat{BP}_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BP_i - \widehat{BP}_i)^2} \quad (4)$$

		MAE (mmHg)	RMSE (mmHg)
Rong et Li [30]	DBP	7.59	–
	SBP	9.97	–
Schrumppf et al. [31]	DBP	10.3	–
	SBP	13.6	–
iPPG2BP (résultats de cette étude)	DBP	5.1	6.85
	MAP	4.47	6.01
	SBP	6.73	9.34

TABLE I: Erreurs sur les estimations de la tension artérielle. Les métriques ont été calculées entre le signal de tension prédit par le modèle d'IA et le signal de référence. Les résultats des études proches sont présentés à titre de comparaison.

B. Métrique de la BHS

La BHS évalue les techniques estimant la tension artérielle par le pourcentage cumulatif des erreurs [28]. Trois niveaux de performance (A, B et C) ont été établis (voir tableau II). Le niveau est calculé en fonction des prédictions sur le jeu de test dont la valeur doit être inférieure à trois seuils définis empiriquement : 5, 10 et 15 mmHg. Le tableau II présente en plus les résultats de l'étude de Rong et Li [30], seule étude à notre connaissance à avoir calculé les métriques du BHS sur des estimations basées sur des signaux PPG mesurés à partir d'une analyse vidéo.

Les résultats de la méthode que nous proposons sont tout à fait intéressants : plus de 60 %, 87 % et 95 % des échantillons

de la base de test présentent des erreurs respectivement inférieures à 5, 10 et 15 mmHg pour la DBP et la MAP (niveau A). Plus de 50 % and 79 % des prédictions de la SBP sont situées sous les 5 et 10 mmHg (grade B) tandis que 89.6 % des prédictions sont sous la barre des 15 mmHg, ce qui est très proche du seuil de 90 %.

		Pourcentage d'erreur		
		≤ 5 mmHg	≤ 10 mmHg	≤ 15 mmHg
Rong et Li [30]	DBP	55.4%	85.7%	98.2%
	SBP	48.2%	78.6%	94.6%
iPPG2BP (résultats de cette étude)	DBP	60.2%	87.1%	95.8%
	MAP	66.8%	90.9%	96.4%
	SBP	50.2%	79.0%	89.6%
BHS	niveau A	60%	85%	95%
	niveau B	50%	75%	90%
	niveau C	40%	65%	85%

TABLE II: Métriques du BHS sur les prédictions de la DBP, MAP et SBP.

C. Métriques de l'AAMI

L'AAMI propose d'évaluer les techniques d'estimation de la tension en analysant l'erreur moyenne (Mean Error, ME) et l'écart-type des erreurs (Standard Deviation of Errors, SDE) sur le jeu de test [29]. La technique doit présenter une ME inférieure à 5 mmHg et un SDE inférieur à 8 mmHg pour pouvoir respecter le standard international.

Le tableau III présente les résultats de l'évaluation selon les critères présentés précédemment. Nous avons reporté les valeurs présentées par Luo et al. [32] et Rong et Li [30]. Nos résultats se situent globalement sous les seuils pour la DBP et la MAP. La ME est faible et le SDE est inférieur à 8 mmHg. Nous pouvons remarquer que les prédictions de la SBP présentent une ME faible mais un SDE légèrement supérieur au seuil de 8 mmHg. Nous notons que les techniques dédiées à la conversion du signal de tension artérielle à partir du signal PPG en contact [33] produisent aussi des estimations de la SBP plus erronées que les estimations de la DBP.

		ME (mmHg)	SDE (mmHg)
Luo et al. [32]	DBP	-0.20	6.00
	SBP	0.39	7.30
Rong et Li [30]	DBP	0.79	2.58
	SBP	2.1	3.35
iPPG2BP (résultats de cette étude)	DBP	-1.001	6.781
	MAP	-0.205	6.007
	SBP	1.51	9.221
Standard AAMI		≤ 5	≤ 8

TABLE III: Métriques de l'AAMI sur les prédictions de la DBP, MAP et SBP. ME : Mean Error (erreur moyenne). SDE : Standard Deviation of Errors (écart-type des erreurs).

V. CONCLUSION

Nous avons proposé, dans cet article, une solution basée sur l'IA permettant d'estimer la tension artérielle à partir d'une vidéo délivrée par une caméra. Cette estimation est effectuée par le biais d'un réseau de neurones en forme de U et de la représentation en ondelettes du signal PPG sans contact, ce

signal ayant été calculé par analyse vidéo. Il s'agit à notre connaissance de la première étude proposant une estimation d'un signal de tension artérielle continu à partir d'une vidéo.

Cette recherche permet d'envisager une détection précoce de l'hypertension ainsi que d'autres pathologies cardiovasculaires avec un moyen bas-coût et d'ores et déjà accessible. Dans le domaine du handicap, ces résultats sont tout autant pertinents, certaines pathologies cardiovasculaires apparaissant en moyenne plus fréquemment que chez les sujets sains [2].

RÉFÉRENCES

- [1] Organisation Mondiale de la Santé, "Plan d'action 2013-2020 pour la Stratégie mondiale de lutte contre les maladies non transmissibles."
- [2] A. Stevens, E. Courtney-Long *et al.*, "Hypertension Among US Adults by Disability Status and Type, National Health and Nutrition Examination Survey, 2001–2010," *Preventing chronic disease*, vol. 11, 2014.
- [3] A. Al-Naji, K. Gibson *et al.*, "Monitoring of Cardiorespiratory Signal : Principles of Remote Measurements and Review of Methods," *IEEE Access*, 2017.
- [4] S. Zauneder, A. Trumpp *et al.*, "Cardiovascular assessment by imaging photoplethysmography—a review," *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, 2018.
- [5] D. McDuff, "Camera measurement of physiological vital signs," *arXiv preprint arXiv :2111.11547*, 2021.
- [6] F. Bousefsaf, C. Maaoui, and A. Pruski, "Continuous wavelet filtering on webcam photoplethysmographic signals to remotely assess the instantaneous heart rate," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, no. 6, pp. 568–574, 2013.
- [7] —, "Remote detection of mental workload changes using cardiac parameters assessed with a low-cost webcam," *Computers in biology and medicine*, vol. 53, pp. 154–163, 2014.
- [8] C. Maaoui, F. Bousefsaf, and A. Pruski, "Automatic human stress detection based on webcam photoplethysmographic signals," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 16, no. 04, p. 1650039, 2016.
- [9] F. Bousefsaf, C. Maaoui, and A. Pruski, "Peripheral vasomotor activity assessment using a continuous wavelet analysis on webcam photoplethysmographic signals," *Bio-medical materials and engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 527–538, 2016.
- [10] —, "Automatic Selection of Webcam Photoplethysmographic Pixels Based on Lightness Criteria," *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 374–385, 2017.
- [11] A. Ni, A. Azarang, and N. Kehtarnavaz, "A Review of Deep Learning-Based Contactless Heart Rate Measurement Methods," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3719, May 2021. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3719>
- [12] C.-H. Cheng, K.-L. Wong *et al.*, "Deep Learning Methods for Remote Heart Rate Measurement : A Review and Future Research Agenda," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6296, Sep. 2021. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6296>
- [13] F. Bousefsaf, A. Pruski, and C. Maaoui, "3D Convolutional Neural Networks for Remote Pulse Rate Measurement and Mapping from Facial Video," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, p. 4364, Oct. 2019. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4364>
- [14] D. Djeldjli, F. Bousefsaf *et al.*, "Remote estimation of pulse wave features related to arterial stiffness and blood pressure using a camera," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 64, p. 102242, Feb. 2021.
- [15] F. Bousefsaf, D. Djeldjli *et al.*, "iPPG 2 cPPG : reconstructing contact from imaging photoplethysmographic signals using U-Net architectures," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 138, p. 104860, Sep. 2021. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010482521006545>
- [16] W. Wang, "Robust and automatic remote photoplethysmography," PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2017.
- [17] M. P. Tarvainen, P. O. Ranta-Aho, and P. A. Karjalainen, "An advanced detrending method with application to HRV analysis," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 49, no. 2, pp. 172–175, 2002, publisher : IEEE.
- [18] W. Verkruysse, L. O. Svaasand, and J. S. Nelson, "Remote plethysmographic imaging using ambient light," *Optics express*, vol. 16, no. 26, pp. 21 434–21 445, 2008.
- [19] M. Hassan, A. Malik *et al.*, "Heart rate estimation using facial video : A review," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 38, pp. 346–360, 2017.
- [20] Z. Zhang, J. M. Girard *et al.*, "Multimodal spontaneous emotion corpus for human behavior analysis," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 3438–3446.
- [21] Y. Nirkin, I. Masi *et al.*, "On face segmentation, face swapping, and face perception," in *2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018)*. IEEE, 2018, pp. 98–105.
- [22] Y. Ouzar, D. Djeldjli *et al.*, "LCOMS Lab's Approach to the Vision for Vitals (V4V) Challenge," in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 2750–2754.
- [23] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net : Convolutional networks for biomedical image segmentation," in *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*. Springer, 2015, pp. 234–241.
- [24] S. Leclerc, E. Smistad *et al.*, "Deep learning for segmentation using an open large-scale dataset in 2d echocardiography," *IEEE transactions on medical imaging*, 2019.
- [25] E. C. Too, L. Yujian *et al.*, "A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 161, pp. 272–279, 2019, publisher : Elsevier.
- [26] S. Xie, R. Girshick *et al.*, "Aggregated residual transformations for deep neural networks," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 1492–1500.
- [27] P. Yakubovskiy, *Segmentation Models*. GitHub, 2019, publication Title : GitHub repository. [Online]. Available : https://github.com/qubvel/segmentation_models
- [28] E. O'Brien, J. Petrie *et al.*, "The british hypertension society protocol for the evaluation of automated and semi-automated blood pressure measuring devices with special reference to ambulatory systems," *Journal of hypertension*, vol. 8, no. 7, pp. 607–619, 1990.
- [29] G. S. Stergiou, B. Alpert *et al.*, "A universal standard for the validation of blood pressure measuring devices : Association for the Advancement of Medical Instrumentation/European Society of Hypertension/International Organization for Standardization (AAMI/ESH/ISO) Collaboration Statement," *Hypertension*, vol. 71, no. 3, pp. 368–374, 2018, publisher : Am Heart Assoc.
- [30] M. Rong and K. Li, "A Blood Pressure Prediction Method Based on Imaging Photoplethysmography in combination with Machine Learning," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 64, p. 102328, Feb. 2021. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1746809420304444>
- [31] F. Schrupf, P. Frenzel *et al.*, "Assessment of Non-Invasive Blood Pressure Prediction from PPG and rPPG Signals Using Deep Learning," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6022, Sep. 2021. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6022>
- [32] H. Luo, D. Yang *et al.*, "Smartphone-based blood pressure measurement using thermal optical imaging technology," *Circulation : Cardiovascular Imaging*, vol. 12, no. 8, p. e008857, 2019.
- [33] N. Ibtehaz and M. S. Rahman, "PPG2ABP : Translating Photoplethysmogram (PPG) Signals to Arterial Blood Pressure (ABP) Waveforms using Fully Convolutional Neural Networks," *arXiv preprint arXiv :2005.01669*, 2020.

Détection des risques de perte d'autonomie liés à la présence d'une maladie neuro-évolutive à travers l'analyse des activités des seniors

Daphné Bard-Krupa
Smart Macadam
Nantes, France

Julie Golliot
Smart Macadam
Laboratoire IMSIC
Nantes & Toulon, France
julie.golliot@smartmacadam.com

Laurent Maury
Smart Macadam
Nantes, France

Abstract — La présente étude avait pour objectif d'étudier une approche exploitant des données collectées à propos des activités de personnes âgées, dans l'espoir de détecter et de prédire l'évolution des risques associés à l'apparition et à l'évolution d'une maladie neuro-évolutive telle que la maladie d'Alzheimer. Le dispositif médical Mementop collecte des données liées aux activités quotidiennes d'un senior, à ses interactions sociales et à son utilisation d'une mémoire exosomatique. Nous avons tout d'abord identifié les données à analyser en utilisant un algorithme de *machine learning* supervisé, développé avec la librairie spaCy de Python. Le modèle probabiliste résultant de ce travail devrait permettre de calculer et de suivre l'évolution de six indicateurs cliniques de santé, donc les évolutions dans le temps caractériseront celle de l'autonomie objective d'un senior : nutrition, hygiène, qualité du sommeil, comportement social, estime de soi et autonomie générale. L'identification de facteurs de risques de perte d'autonomie devrait alors permettre d'envisager le développement d'un dispositif destiné à contrarier toute dégradation d'un des indicateurs cliniques de santé, par le biais de l'envoi de conseils personnalisés au malade concerné et à ses proches, ainsi que par la mise à disposition de données objectives destinées à informer, chaque fois que nécessaire, les professionnels de santé.

Keywords—Maladie neuro-évolutive ; Alzheimer ; Marqueurs Cliniques ; Analyse Prédicative ; Réseaux Bayésiens

I. INTRODUCTION & CONTEXTE

Selon l'OMS, d'ici 2030, plus d'un milliard de personnes dans le monde seront âgées de 65 ans et plus. Le *ministère des Solidarités et de la Santé* affirme que la France comptait en 2021 2,5 millions de personnes âgées en situation de perte d'autonomie, ce chiffre devant en toute vraisemblance passer à 3 millions de personnes d'ici 2030, date à laquelle les plus de 60 ans représenteront 21 millions d'individus, contre 18,5 millions aujourd'hui. 1,4 millions de français sont touchés par une maladie neuro-évolutive (MNE) telle que la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer et les maladies apparentées. Ces pathologies affectent la mémoire et les

fonctions cognitives des patients concernés. Aphasie, apraxie et agnosie sont également des troubles récurrents liés à l'apparition de ces maladies. Les conséquences pour les malades se traduisent par une réduction progressive de l'autonomie ainsi que par un accroissement drastique de la charge mentale qui pèse sur leurs aidants. Le diagnostic est souvent posé tardivement en raison du caractère insuffisamment spécifique et différenciant des symptômes précoces associés aux MNE. Cette détection tardive pénalise la mise en place d'un accompagnement efficace des patients et de leurs proches qui viserait à améliorer leur confort de vie. Les professionnels de santé hésitent parfois à poser un diagnostic de MNE dans l'espoir d'éviter une possible stigmatisation du malade. Les moyens de détection actuellement utilisés reposent principalement sur des tests papier normalisés. Le MMSE mesure par exemple des aspects liés aux capacités cognitives du patient : mémoire, orientation, niveau de langage, attention et fonctions visuospatiales. L'ACE-R est un test de dépistage cognitif plus complet que le MMSE qui évalue l'attention, la mémoire, la fluidité, le langage et les fonctions visuospatiales. Le MoCA teste la mémoire à court terme, les fonctions visuospatiales, les fonctions exécutives, la fluidité phonémique, l'attention et le langage. Le test de dessin d'horloge évalue les fonctions cognitives exécutives, spatiales et visuo-constructives. L'évaluation des activités de la vie quotidienne se fait avec le test ADL, qui évalue la dépendance du patient dans la réalisation de gestes de la vie courante. L'évaluation des activités instrumentales de la vie quotidienne - *Instrumental Activities of Daily Living* (IADL) - permet de caractériser le niveau de dépendance du patient. La grille AGGIR permet d'évaluer la perte d'indépendance d'une personne âgée à partir du constat des activités effectuées ou non.

Tous ces tests neuropsychologiques présentent des limites. Ils sont effectués ponctuellement, de manière parfois trop espacée [1] et nécessitent des ressources humaines conséquentes en raison de leur durée de passation. Un nombre limité de données est donc disponible pour mener des études à grande échelle.

Détecter et prévenir précocement les MNE est cependant un enjeu primordial [2] :

- Augmentation de la qualité de vie des patients, 40% des cas de démence pouvant être évités ou retardés en ciblant 12 facteurs de risque tout au long de la vie [3] ;
- Accès précoce aux services et au soutien adéquats pouvant aider les patients à exercer un certain niveau de contrôle de leur maladie, à vivre plus longtemps de manière autonome et à maintenir une bonne qualité de vie pour eux-mêmes, leur famille et leurs aidants.
- Accès aux traitements disponibles susceptibles d'améliorer la cognition ;
- Réduction de l'impact négatif sur les aidants : acceptation, transition vers un rôle d'aidant et anticipation des changements cognitifs, moteurs et comportementaux survenant dans le cadre d'une MNE ;
- Réduction de la charge économique pesant sur le système de santé et sur les familles.

La présente étude a pour objectif d'utiliser des informations relatives aux activités menées par un sénior et par ses aidants afin de détecter de manière précoce certains risques liés à l'apparition d'une MNE et de suivre son évolution au fil du temps, sans contraindre les personnes concernées. L'étude s'appuie sur l'utilisation d'un dispositif médical certifié baptisé Mementop. Il s'agit d'un construit socio-technique qui s'adresse à l'écosystème (baptisé *tribu*) constitué du patient, de ses aidants et des professionnels de santé qui l'accompagnent. Mementop propose un ensemble de services fonctionnels utiles à chaque tribu, au sein d'une expérience utilisateur unifiée et cohérente. Plus précisément, Mementop s'articule autour de trois éléments :

- Une application pour smartphone partagée par tous les membres d'une tribu, permettant de s'organiser (agenda d'activités), de communiquer (messagerie), de ne rien oublier (mémos interactifs), d'échanger des éléments émotionnels (album de souvenirs) et de stimuler ses fonctions cognitives (jeux) ;
- Un produit de presse imprimé multi-sensoriel et personnalisable pour chaque tribu ;
- Un service d'assistance aux utilisateurs.

La présente étude se limite à l'utilisation de l'application Mementop.

II. MÉTHODOLOGIE

A. Etat de l'art

Plusieurs études portant sur l'analyse des activités de personnes atteintes de MNE ont été menées afin de détecter des risques de perte d'autonomie. L'utilisation de l'ordinateur par de telles personnes diminue concomitamment au développement de la maladie : baisse du nombre de jours d'utilisation, diminution progressive du temps moyen d'utilisation quotidienne et augmentation de la variabilité quotidienne (Mild Cognitive Impairment - MCI) [4]. Le MCI, ou *Déficience Cognitive Légère* est un stade précoce de perte de

mémoire ou d'autres capacités cognitives chez des personnes qui conservent la capacité d'effectuer de manière autonome la plupart des activités de la vie quotidienne.

La prise de médicament (processus, fréquence, oublis éventuels) permet également de discerner MCI et sujets témoins. Les personnes avec une fonction cognitive supérieure étant plus régulières dans leur prise de médicaments et continuant à l'être au fil du temps, c'est la fréquence quotidienne de la mesure qui permet d'observer un éventuel déclin [5].

Les performances lors de jeux de cartes classiques comme le jeu de solitaire Klondike ont permis de détecter des MCI grâce aux modèles de classification *Gradient Boosting*, *Nu-Support Vector* et *Extra Trees classifier*. Ces modèles permettent de capter les biomarqueurs numériques résultant de la performance cognitive et étant sensibles à l'altération de la cognition liée à l'apparition d'une MCI [6].

Des calculs d'inférences à propos de l'utilisation d'un assistant vocal ont montré que les résultats les plus pertinents en matière de détection d'une MCI proviennent de la performance globale, des commandes liées à l'écoute de la musique, des demandes d'émission d'appels téléphoniques et des caractéristiques de reconnaissance automatique de la parole (RAV) [7].

D'autres études ont été menées en prenant en considération l'analyse de plusieurs années d'enregistrements audio concernant 130 patients en bonne santé cognitive au démarrage de l'étude et ayant par la suite développé une démence. Ces études ont démontré que des changements dans les choix de vocabulaire, la hauteur de la voix et la vitesse d'élocution – constatés en amont de tout diagnostic – pouvaient prédire l'apparition d'une démence chez certains patients, avec une précision comparable à celle résultant de l'examen des seules caractéristiques démographiques [8].

La vitesse de marche d'une personne et sa variabilité quotidienne pourraient également constituer des marqueurs précoces du développement d'une MCI. Ces mesures en temps réel des fonctions exécutives offriraient alors de nouveaux moyens de détection des phases de transition menant à la démence [9]. Certaines études ont également démontré que les changements dans la démarche d'une personne prédisant l'apparition d'une MCI pourraient débiter des décennies avant qu'un déclin cognitif significatif soit observé [10].

B. Identification d'indicateurs cliniques de santé (ICS)

Une analyse de la littérature ainsi que la consultation du comité scientifique lié au développement du construit socio-technique Mementop (gériatres et neurologues) et d'un second comité d'experts en neurologie a permis d'identifier six ICS dont le calcul permettrait d'identifier des risques de perte d'autonomie : nutrition ; hygiène ; qualité du sommeil ; comportement social ; estime de soi ; autonomie générale. Ces ICS sont liés à des mesures effectuées traditionnellement par le biais de la grille AGGIR, des échelles de Goldberg, de Rosenberg (estime de soi), IADL et IADL-E ainsi que des questionnaire MNA (Mini Nutritional Assessment) et NPI

(Neuro Psychiatric Inventory). Pour chaque ICS, les différents items à mesurer ont été identifiés. Des seuils ont enfin été déterminés pour caractériser un premier niveau de risque relatif à chacun de ces items.

Nous avons par la suite étudié le modèle de données exposé par Mementop dans sa version disponible en décembre 2021 afin d'établir un premier modèle empirique pour le calcul de chaque ICS. Nous avons alors identifié des opportunités de collecte de données complémentaires susceptibles de contribuer à la pertinence de nos calculs. Plusieurs méthodes de collecte de ces données ont été alors mises en œuvre au sein du construit socio-technique.

À l'issue de l'étude, nous avons dressé une taxonomie des données collectées :

- Données fonctionnelles : données directement renseignées par les utilisateurs de l'application Mementop (agenda d'activités, mémos, albums de souvenirs, messagerie) ;
- Données analytiques : données collectées par l'application Mementop résultant des actions de ses utilisateurs et relatives à leur mode d'exécution et non au résultat obtenu ;
- Données de contrôle : données collectées à l'instigation de l'application Mementop auprès de ses utilisateurs (sondage, modboard...). Ces données permettent d'améliorer le niveau de confiance lié à chaque ICS ;
- Objectives : scores obtenus lors de tests cognitifs normalisés.

Un tableau a par la suite été élaboré afin de regrouper les besoins liés à l'application en termes de collecte de données.

C. Classification liminaire de données non structurées

La nature peu structurée des données collectées par l'application Mementop impose la conduite d'un travail de classification textuelle. Exemples de données non structurées à considérer : titre d'un événement ; message échangé au sein d'une tribu ; description textuelle d'un mémo. En considérant un ensemble de classes prédéfinies, nous avons cherché à prédire à quelle(s) classe(s) un texte donné est susceptible d'appartenir (modèle surjectif). L'algorithme d'apprentissage supervisé utilisé s'appuie sur un classificateur multi labels pouvant prédire les étiquettes de classe d'un texte, entraîné à l'aide d'exemples de paires (texte - classe). L'entraînement de ce classificateur multi labels nécessite de disposer de données correctement étiquetées. Deux outils ont été étudiés pour la construction de ce modèle : la librairie spaCy de Python et la solution Cloud Natural Language AutoML de Google. Les résultats obtenus ont été comparés afin de déterminer la solution offrant le plus haut niveau de pertinence au regard des objectifs du classificateur multi labels. Le composant TextCategorizer a été adjoint au *pipeline* de base de spaCy.

D. Construction d'un modèle probabiliste pour chaque ICS

La présence à nos côtés d'un comité de professionnels de santé et d'experts pluridisciplinaires (gériatres et neurologues) facilita le travail liminaire consistant à déterminer un ensemble

de règles interdépendantes ainsi que la distribution des probabilités conditionnelles associées pour le calcul de chaque ICS. L'utilisation du construit socio-technique Mementop imposa de considérer des risques d'incomplétude des informations collectées, rendant les représentations des connaissances plus incertaines. La récente mise sur le marché du dispositif médical Mementop limite la quantité de données mises à notre disposition.

Ces différents constats nous ont conduits à étudier l'intérêt des graphes probabilistes (réseaux Bayésiens) pour le calcul des ICS. Il s'agit de modèles de représentation des connaissances et d'aide à la décision qualifiés de "systèmes experts probabilistes". Pour réaliser nos premiers tests de modélisation, nous avons utilisé la librairie *pgmpy*.

III. RÉSULTATS

Nous avons dressé un tableau recensant les différentes techniques pouvant être mises en place afin de procéder au calcul de 6 ICS à partir d'une analyse comparative entre le modèle des données exposées par l'application Mementop et les données nécessaires à ces calculs.

A. Résultats de la tâche de classification

spaCy, solution de *topic classification* multi labels supervisée, a été choisie pour construire l'algorithme de classification. Nous avons débuté par la classification des titres des événements contenus dans l'agenda partagé proposé par l'application Mementop. À chaque titre, une ou plusieurs étiquettes choisie(s) dans la liste suivante ont été attribuées : autonomie, isolement, hygiène, médical, nutrition, autres. Ces étiquettes sont issues de la définition clinique de chaque ICS à partir d'échanges avec les experts interrogés. Des modifications ont été effectuées pour les ICS présentant des difficultés d'estimation à partir des titres d'événements. À titre d'exemple, l'ICS « qualité du sommeil » ou l'ICS « estime de soi » présentent des caractéristiques subjectives, difficilement associables à des étiquettes liées à des titres d'événements.

Une fois les modèles spaCy et AutoML entraînés, nous avons effectué plusieurs comparaisons des résultats obtenus afin de déterminer le modèle de classification multi labels le plus pertinent pour notre étude. Les résultats des prédictions des deux modèles ont été comparés avec les résultats attendus. 65% des titres d'événements ont été correctement étiquetés par spaCy contre 13% par la solution de Google.

B. Modélisation probabiliste avec *pgmpy*

Les variables de notre modèle générique proviennent de 4 domaines :

- Le domaine des grandeurs mesurables, appelées "Sondes". Elles permettent d'appréhender et de définir les Facteurs ;
- Le domaine des "Facteurs" cliniques qui peuvent s'influencer entre eux. Ils ne sont pas directement mesurables et dépendent des Sondes ;

- Le domaine des "Contextes", qui permettent de caractériser une situation et influencent uniquement les Conseils donnés aux utilisateurs ;
- Le domaine des "Conseils" qui peuvent être proposés au patient ou à ses aidants. Ils dépendent des valeurs de certains "Facteurs", mais aussi de variables de "Contexte" ne définissant pas le patient lui-même.

La Figure 1 propose un exemple de modélisation probabiliste du risque de dénutrition. Les Sondes sont représentées en orange et contiennent par exemple les marqueurs d'IMC, de difficultés digestives, de mastication, de déglutition et de perte de goût, la création d'événements en lien avec la nutrition, etc. Les Facteurs, comme les changements d'habitudes alimentaires, la perte de poids, des problèmes physiques ou neuropsychologiques, les achats alimentaires, etc. sont représentés en vert. En rouge, on retrouve deux Conseils binaires à juger "pertinent" ou "non pertinent", comme "Pensez à aller faire les courses avec le patient X" et "Proposez au patient X de déjeuner en sa compagnie demain midi". Le point noir correspond à un Contexte : le lieu de résidence du patient.

IV. DISCUSSION

Cette étude préalable nous permet de recommander l'utilisation de la solution de classification spaCy. Les résultats obtenus sont encourageants et devront être confirmés et affinés avec des données plus exhaustives et plus nombreuses, comme l'a révélé l'analyse des résultats de prédiction. Un travail analogue et plus conséquent devra être mené en intégrant les titres des mémos, les titres des souvenirs et les messages échangés au sein d'une tribu à propos d'un événement ou d'un souvenir.

Certains ICS sont difficilement calculables à travers l'analyse des activités d'un utilisateur de Mementop. La subjectivité de certains indicateurs – à l'instar de l'estime de soi - n'autorise pas sa modélisation par un ensemble de variables, ni l'application d'un principe de seuil caractéristique des modèles probabilistes.

L'utilisation des modèles probabilistes devrait nous permettre de déterminer, à termes, des trajectoires types pour les écosystèmes (triade) aidé – aidants – professionnels de santé, ainsi que des profils type d'évolution des MNE. Une fois un seuil critique de données atteint, il sera possible d'utiliser des techniques d'analyse en séries temporelles (TSA) pour étudier les évolutions de chaque ICS et en déduire des distances, au sens holomorphique du terme, entre les triades. Des indicateurs de proximité probabiliste entre triades permettront l'élaboration d'un modèle prédictif caractérisant l'évolution de chaque ICS d'une triade.

Il nous faut également améliorer la prise en compte des connaissances des experts en gériatrie et en neurologie pour formuler un modèle probabiliste plus pertinent et cohérent avec des niveaux de règles, de dépendances et de valeurs de distribution des probabilités conditionnelles. Les conditions sanitaires depuis 2020 ont pleinement mobilisé les professionnels de santé et cette étape s'en est trouvée considérablement ralentie.

Enfin, nous devons travailler avec un volume critique et suffisamment exhaustif de données à propos des activités des utilisateurs. En outre, les personnes fragilisées par l'âge, la maladie ou le handicap étant particulièrement sensibles aux risques émergeant d'informations erronées saisies via un dispositif numérique, il conviendra d'intégrer à l'application Mementop un système d'intelligence curative. À titre d'exemple, une localisation erronée associée à un événement peut mettre un patient atteint d'une MNE en grande difficulté. Tout doit être mis en œuvre afin d'améliorer la pertinence des données collectées par l'application Mementop dans le but de réduire les « risques logiciels » auxquels les utilisateurs sont exposés.

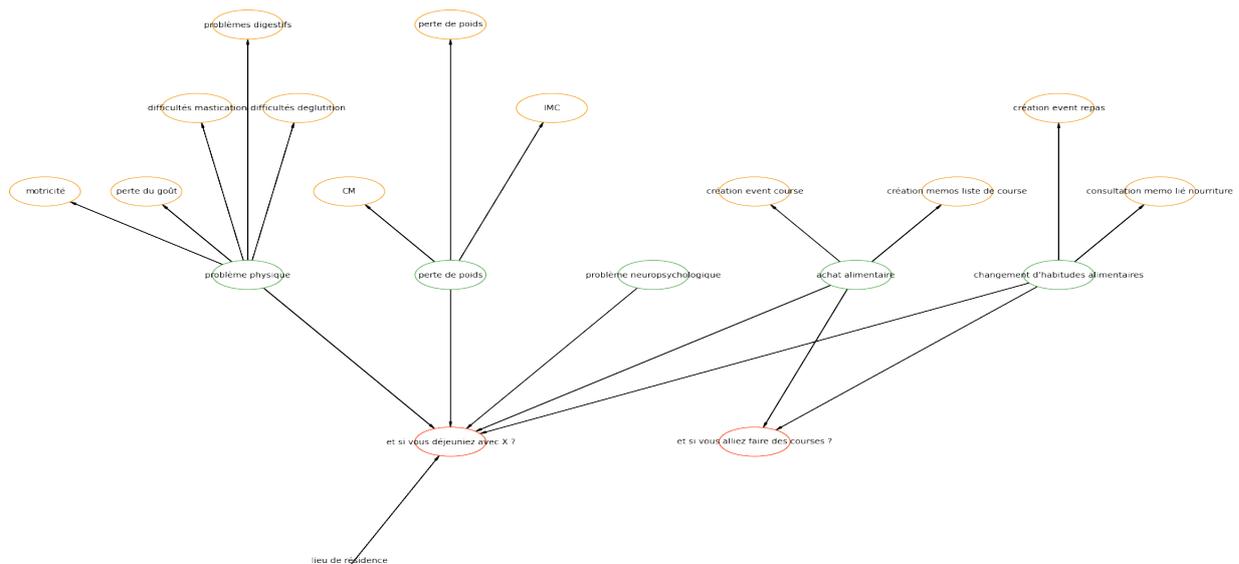


Figure 1 : Modélisation d'un réseau Bayésien - l'exemple de la dénutrition.

CONCLUSION

Les données collectées par le dispositif médical Mementop et résultant des activités de patients permettent, après classification et modélisation probabiliste, de suivre l'évolution des indicateurs cliniques de santé, afin d'estimer et de qualifier les risques de perte d'autonomie. Ce procédé devrait permettre l'envoi de conseils personnalisés aux malades et à leurs proches ainsi que la mise à disposition de données objectives à l'attention des professionnels de santé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les membres du comité scientifique pour leur expertise et l'ENSC pour sa contribution.

REFERENCES

- [1] A. Piau, K. Wild, N. Mattek, and J. Kaye, "Current State of Digital Biomarker Technologies for Real-Life, Home-Based Monitoring of Cognitive Function for Mild Cognitive Impairment to Mild Alzheimer Disease and Implications for Clinical Care: Systematic Review," *J. Med. Internet Res.*, vol. 21, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.2196/12785.
- [2] J. Rasmussen and H. Langerman, "Alzheimer's Disease – Why We Need Early Diagnosis," *Degener. Neurol. Neuromuscul. Dis.*, vol. 9, p. 123, Dec. 2019, doi: 10.2147/DNND.S228939.
- [3] G. Livingston *et al.*, "Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission," *Lancet*, vol. 396, no. 10248, pp. 413–446, Aug. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30367-6/ATTACHMENT/CEE43A30-904B-4A45-A4E5-AFE48804398D/MMC1.PDF.
- [4] J. Kaye *et al.*, "Unobtrusive measurement of daily computer use to detect mild cognitive impairment," *Alzheimer's Dement.*, vol. 10, no. 1, pp. 10–17, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.JALZ.2013.01.011.
- [5] J. Austin, K. Klein, N. Mattek, and J. Kaye, "Variability in medication taking is associated with cognitive performance in nondemented older adults," *Alzheimer's Dement. Diagnosis, Assess. Dis. Monit.*, vol. 6, p. 210, 2017, doi: 10.1016/J.DADM.2017.02.003.
- [6] K. Gielis Marie-Elena Vanden Abeele Katrien Verbert Jos Tournoy and M. De Vos Vero Vanden Abeele, "Detecting Mild Cognitive Impairment via Digital Biomarkers of Cognitive Performance Found in Klondike Solitaire: A Machine-Learning Study," *Res. Reports-Research Artic. Digit Biomark*, vol. 5, pp. 44–52, 2021, doi: 10.1159/000514105.
- [7] X. Liang *et al.*, "Evaluating voice-assistant commands for dementia detection," *Comput. Speech Lang.*, vol. 72, p. 101297, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.CSL.2021.101297.
- [8] T. Alhanai, R. Au, and J. Glass, "Spoken Language Biomarkers for Detecting Cognitive Impairment," *2017 IEEE Autom. Speech Recognit. Underst. Work. ASRU 2017 - Proc.*, vol. 2018-January, pp. 409–416, Oct. 2017, doi: 10.1109/ASRU.2017.8268965.
- [9] H. H. Dodge, N. C. Mattek, D. Austin, T. L. Hayes, and J. A. Kaye, "In-home walking speeds and variability trajectories associated with mild cognitive impairment," *Neurology*, vol. 78, no. 24, p. 1946, Jun. 2012, doi: 10.1212/WNL.0B013E318259E1DE.
- [10] T. Buracchio, H. H. Dodge, D. Howieson, D. Wasserman, and J. Kaye, "The trajectory of gait speed preceding MCI," *Arch. Neurol.*, vol. 67, no. 8, p. 980, Aug. 2010, doi: 10.1001/ARCHNEUROL.2010.159.

Étude préliminaire au développement d'un outil de dépistage automatisé de la scoliose idiopathique à l'aide d'un nuage de points en 3 dimensions obtenu par une caméra de profondeur.

Soline Calla, Paul Henry et Jean Tomaszewski,
Étudiants en master 2 Modèle-Innovation Technologique-
Imagerie
Université Grenoble Alpes (UGA)
Grenoble, France

Guillaume Thomann
Maître de conférence en ingénierie mécanique
INP de Grenoble
Grenoble, France

Hugo Villi,
Doctorant en ingénierie mécanique
Institut National Polytechnique (INP) de Grenoble
Grenoble, France

Nicolas Pinsault
Kinésithérapeute, maître de conférence et chercheur au
laboratoire TIMC
UGA et laboratoire TIMC
Grenoble, France

Résumé— La scoliose idiopathique est une pathologie chronique et évolutive du rachis affectant 2 à 3% de la population et débutant dans l'adolescence. Elle est associée à des préjudices physiques et psychologiques à long terme, dont le poids dépend principalement de la précocité du diagnostic et de la mise en œuvre du traitement. En France, la technique de dépistage actuelle est une méthode clinique réservée aux médecins dont la sensibilité est imparfaite. Cette étude constitue un travail préliminaire à une future étude dont l'objectif est de développer un outil de dépistage automatisé et non irradiant de la scoliose idiopathique.

La revue de la littérature menée sur le sujet montre qu'il existe un lien entre scoliose et asymétrie de surface du dos du patient.

L'outil d'évaluation retenu pour cette étude est la caméra de profondeur Microsoft Kinect v2, générant un nuage de points tridimensionnel de la surface du dos du patient. Les travaux de cette étude ont été de garantir la reproductibilité des données du nuage de points puis de définir un paramètre d'asymétrie de surface pertinent issu de ce nuage de points capable de détecter une scoliose.

Les premiers résultats obtenus sur un faible échantillon d'individus sains et un individu scoliotique sont encourageants et invitent à tester cet outil inédit sur de plus larges cohortes.

Mots-clés— scoliose ; dépistage ; caméra de profondeur ; nuage de points.

I. INTRODUCTION

A. Contexte

1. Définition

La scoliose idiopathique (SI) est une déformation tridimensionnelle évolutive du rachis de cause inconnue [1]. Elle se définit dans le plan axial, par une rotation vertébrale qui entraîne une déformation de la cage thoracique dans son ensemble du fait de l'attache des côtes aux vertèbres thoraciques, dans le plan frontal par une inflexion latérale du

rachis et dans le plan sagittal par une anomalie des courbures physiologiques du rachis (cyphoses et lordoses) qui peuvent être excessives ou insuffisantes par rapport à la normale.

Seule la déformation dans le plan axial est spécifique de la SI, les déformations dans les deux autres plans existant dans d'autres pathologies rachidiennes. En effet, la déformation dans le plan frontal sans déformation dans le plan axial est nommée « attitude scoliotique » due des anomalies de posture chronique ou à une inégalité de longueur des membres inférieurs [2] tandis que la déformation dans le plan sagittal sans déformation dans le plan axial est très fréquente dans de nombreuses pathologies rachidiennes non scoliotiques congénitales et acquises [3].

2. Critères diagnostiques

La technique de référence actuelle pour le diagnostic de la SI est la radiographie standard du rachis. Elle permet tout d'abord le diagnostic positif basé sur deux critères obligatoires obtenus sur le cliché de face :

- L'asymétrie des pédicules vertébraux, preuve de la déformation dans le plan axial.
- Un angle de Cobb > 10°, preuve d'une déformation significative dans le plan frontal. L'angle de Cobb est l'angle formé par la ligne parallèle au plateau supérieur de la première vertèbre en rotation et la ligne parallèle au plateau inférieur de la dernière vertèbre en rotation) (*Figure 1*).

D'autre part, la radiographie permet d'établir le diagnostic de sévérité. Celui-ci repose directement sur l'amplitude de l'angle de Cobb qui permet de classer la pathologie en différents stades de sévérité.

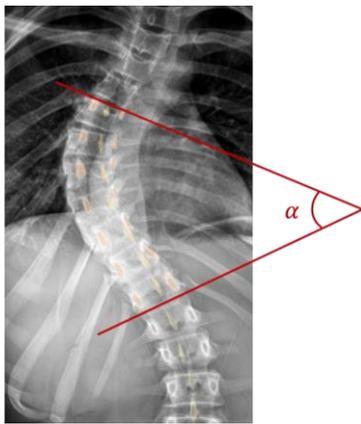


Fig. 1 L'angle de Cobb est l'angle α angle évalué sur cette radiographie de face du rachis.

3. Prise en charge

La prise en charge de la SI dépend de sa sévérité [1]. Quel que soit le stade de sévérité, les techniques de rééducation sont utilisées. Elles peuvent suffire pour les stades « pré-scoliotiques » (angles de Cobb < 10°) ou être associées au port d'un corset à une rééducation pour des angles de Cobb entre 10 et 25° voire à une intervention chirurgicale à une rééducation pour des angles de Cobb au-delà de 25°.

4. Épidémiologie

La prévalence de la scoliose idiopathique est évaluée entre 2 et 3 % mondialement d'après la littérature [1].

Il existe une prédominance féminine proportionnelle à la sévérité de la déformation : en effet, le sex ratio varie entre 1.4 pour des angles de Cobb entre 10 et 20° et 7.2 pour des angles de Cobb > 40° [4].

La pathologie débute généralement dans l'enfance ou l'adolescence avec un pic évolutif de la déformation entre 10 et 15 ans.

Elle est associée à une diminution de l'index de qualité de vie, attestée par la littérature [5] liée aux préjudices physiques (impact esthétique et fonctionnel respiratoire de la déformation) et psycho-sociaux à long terme.

5. Méthodes de dépistage

La technique de dépistage en vigueur en France est le test d'Adams (aussi appelé Forward Bend Test en anglais), méthode clinique pratiquée par un médecin (pédiatre, médecin généraliste ou médecin scolaire) chez les enfants entre 7 et 18 ans, selon les recommandations de la HAS (Haute Autorité de Santé). L'enfant se tient debout, présentant son dos au médecin qui l'examine 2 étapes (Figure 2) :

- D'abord dos droit à la recherche de signes directs (inflexion latérale du rachis) ou indirects (asymétrie de hauteur des épaules ou des scapulas) de déformation rachidienne frontale.
- Ensuite pendant une flexion dans le but de démasquer une gibbosité, c'est-à-dire une proéminence d'une hémicage thoracique (droite ou gauche) témoin indirect de la déformation rachidienne axiale.

Ces signes peuvent être discrets au début de l'évolution de la maladie donc difficiles à détecter, ce d'autant pour un examinateur non entraîné. La sensibilité de cette méthode est donc imparfaite, rapportée entre 71.1 et 84.4% selon les études [6]. Sa spécificité est bien meilleure, évaluée entre 95 et 97%.

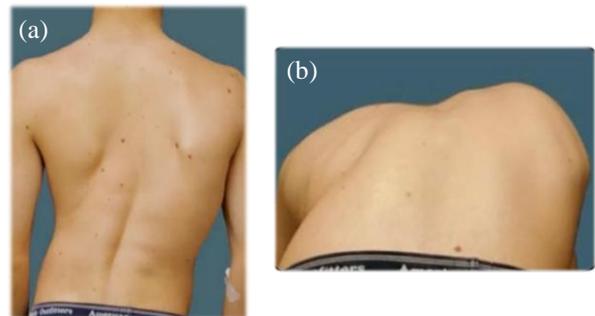


Fig. 2 Les deux étapes du test d'Adams :

- (a) D'abord dos droit : inflexion latérale du rachis et asymétrie de hauteur des scapulas et des épaules dans une moindre mesure.
- (b) Ensuite pendant une flexion antérieure du dos : apparition d'une gibbosité droite, c'est-à-dire la proéminence de l'hémi-thorax droit.

B. Objectifs

L'objectif principal de l'étude future pour laquelle cette étude préliminaire est réalisée est le développement d'un outil d'évaluation automatisée et non irradiante de la scoliose permettant de la dépister efficacement la scoliose.

L'outil devra mesurer un paramètre capable de détecter la scoliose avec une meilleure sensibilité et une spécificité similaire par rapport au test d'Adams, méthode de dépistage de référence actuellement, avec une bonne reproductibilité.

Son caractère automatisé permettra de le rendre utilisable par des personnes sans expertise médicale et notamment des professionnels scolaires non médicaux dans le cadre de larges campagnes de dépistage scolaires.

Il devra par ailleurs présenter un coût modéré et être non-irradiant qui sont autant de caractéristiques du test d'Adams.

L'objectif secondaire de cette étude sera d'évaluer la sévérité de la scoliose à l'aide de ce même outil, objectif audacieux sachant qu'aucune étude n'a réussi à le faire à notre connaissance [7].

Préalablement à cette étude, le travail préliminaire présenté ici a consisté à répondre à deux principaux objectifs. D'abord de garantir la reproductibilité des données du nuage de points acquises par la caméra de profondeur et ensuite d'extraire des données du nuage de points un paramètre d'asymétrie de surface du dos du patient afin de détecter automatiquement une asymétrie de surface droite/gauche (i.e. la gibbosité), témoin de la déformation du rachis dans le plan axial spécifique de la SI.

II. MATERIEL ET METHODES

MATERIEL

L’outil utilisé la caméra de profondeur Microsoft Kinect v2 (Figure 3), caméra peu onéreuse (prix entre 50 et 100 euros) développée initialement pour une utilisation ludique dans le cadre de jeux vidéo de la console de jeux X-box développée par Microsoft. La société Microsoft a arrêté la production de la Kinect v2 depuis fin 2017, la remplaçant par une nouvelle caméra aux performances améliorées, réservée à l’usage professionnel nommée Azure Kinect DK et vendue à 399\$.

1. Fonctionnement

Il s’agit d’une caméra dite « RGB-D » associant une caméra RGB (red-green-blue) classique de haute définition (1920x1080 pixels) et haute cadence d’images (30 images par seconde) et une caméra de profondeur (D for « depth ») avec un émetteur et un capteur à ondes infra-rouges, de même cadence d’images et de résolution plus faible (512x424 pixels). Les données de profondeur sont obtenues par l’utilisation d’ondes infrarouges (IR) envoyées par un émetteur, réfléchies par les objets de l’environnement rencontrés et réceptionnées par le capteur. Connaissant la vitesse de propagation de l’onde dans l’air, la mesure du temps mis par l’onde pour effectuer l’aller-retour entre la caméra et l’objet (« time of flight » ou « TOF » en anglais), dans l’air permet de déterminer la distance entre la caméra et l’objet, c’est-à-dire la « profondeur » de l’objet.

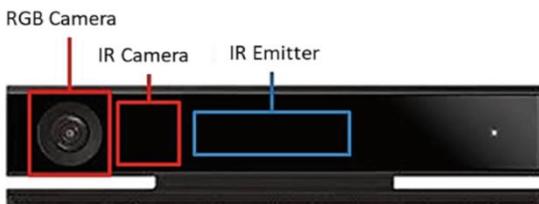


Fig. 3 Caméra RGB-D Microsoft Kinect v2.

L’acquisition du dos d’un individu par la caméra de profondeur génère une cartographie de la surface du dos sous forme d’un nuage de points placé dans un repère à 3 dimensions fixe caméra-dépendant défini par 3 axes et 3 plans (Figure 4 (a)) :

- Les 3 axes de ce repère sont :
 - L’axe x = axe longitudinal ou « droite/gauche » de la caméra.
 - L’axe y = axe « haut/bas » perpendiculaire à l’axe x.
 - L’axe z = axe « avant/arrière » perpendiculaire à l’axe x, c’est-à-dire l’axe de profondeur.
- Les 3 plans ainsi formés sont les suivants :
 - Le plan axial ou plan (xz).
 - Le plan frontal ou plan (xy).
 - Le plan sagittal ou plan (yz).

Pour chaque coupe axiale du patient (i.e. chaque y), il est possible de définir une courbe de surface axiale du dos du patient (Figure 4 (b)) notée z(x). Celle-ci est généralement le siège d’un minimum local correspondant au point de surface situé à l’aplomb du rachis, comme le montre l’étude de Xu [8].

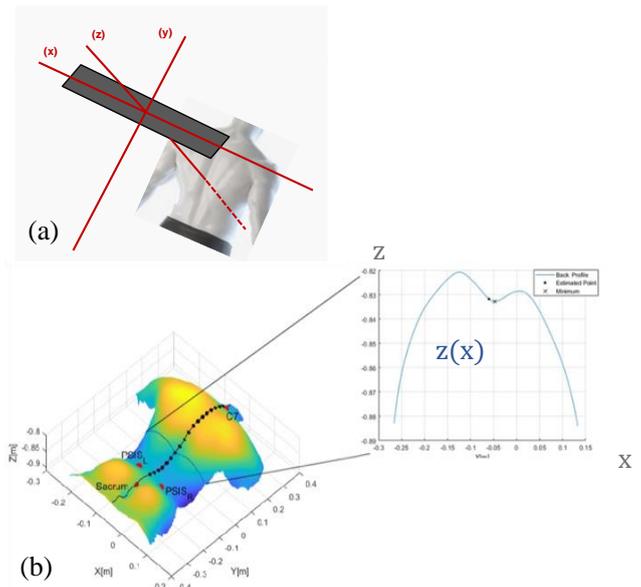


Fig.4 Représentation du repère à 3 dimensions caméra-dépendant (a) ainsi que du nuage de points de la surface du dos avec la courbe de surface z(x) pour un y donné (i.e. une coupe axiale donnée) (b)

3. Caractéristiques techniques et limites

D’après les travaux de Wasenmüller, Kholshelham, Corti et Ballester [9–12].

a. Données de résolution :

La résolution spatiale est d’environ 2-3 mm en x et y et 4 mm en z lorsque le patient est à une distance d’1m par rapport à la caméra (distance d’utilisation). Lorsque cette distance augmente, elle se dégrade lentement en x et y (résolution de 5 mm à 2.5m) et rapidement en z (résolution de 20mm à 2.5m).

b. Décalage de profondeur

Il existe un décalage entre la profondeur calculée par la caméra et la profondeur mesurée réellement, de 18 mm en moyenne. Un décalage homogène ne représente pas une limite puisque le paramètre recherché est un paramètre d’asymétrie donc utilisant des données relatives d’un côté à l’autre. Cependant, les études ont identifié quelques sources d’hétérogénéité de ce décalage à prendre en compte. Il est plus important pour les pixels situés en périphérie de l’image que pour ceux situés au centre de celle-ci: les pixels périphériques doivent être exclus de l’analyse. Par ailleurs, il est plus important pour les pixels plus sombres que pour les pixels plus clairs : l’éclairage du dos du patient doit

donc être homogène. Enfin, ce décalage est proportionnel à la température de l'appareil donc augmente pendant le temps de chauffe de la caméra puis se stabilise au bout de 25-30 minutes. Un temps de chauffe de la caméra doit donc être prévu.

c. Artéfacts inhérents à la technique

Deux principaux artéfacts liés à la technique sont décrits : le « flying pixel artefact » associé aux zones de rupture de profondeur (bords du dos principalement dans notre cas) et le « multipath interference » lié à la possible hétérogénéité (en temps et/ou en angle) d'une même vague d'ondes IR.

METHODES

1. Protocole d'acquisition

Pour cette étude, il a été choisi de calquer le protocole d'acquisition sur un test d'Adams : le patient se tient debout et droit, dos à la caméra, à environ 1m de celle-ci. Lorsqu'il est placé de façon satisfaisante, l'enregistrement débute. Après quelques secondes dans cette position, il est demandé au patient de réaliser une flexion antérieure les bras pendants en avant, sans plier les genoux. L'enregistrement s'arrête à l'issue d'une flexion complète.

Il s'agit donc d'un protocole d'acquisition dynamique, c'est-à-dire une succession d'acquisitions (environ 60) en position droite puis en cours de flexion. Ce protocole est inédit puisque, si d'autres études ont analysé la surface du dos à l'aide d'une caméra de profondeur en position debout et en fin de flexion antérieure, aucune ne l'a fait de manière dynamique [13,14].

2. Reproductibilité des données acquises

Il est essentiel de garantir une bonne reproductibilité des données acquises entre deux patients différents et entre deux acquisitions différentes chez un même patient, ceci afin que la différence observée d'une acquisition à l'autre puisse être imputée à une variation pathologique (i.e. la déformation rachidienne) et non à une variation non pathologique due à une variabilité de mesure.

La principale source de variabilité non pathologique correspond au positionnement initial du patient avant le début d'acquisition avec une variabilité potentielle en termes de distance et rotation du dos par rapport à la caméra. Deux méthodes de précaution conjuguées ont été choisies afin d'en s'affranchir :

a. Précautions extrinsèques :

Il s'agit de repères au sol sur lesquels le patient doit placer ses pieds. Ceux-ci garantissent une distance fixe du patient par rapport à la caméra et minimisent la rotation initiale du patient

b. Précautions intrinsèques :

Le repère tridimensionnel par défaut dans lequel est acquis le nuage de point est fixe, caméra-dépendant, comme défini par la Figure 4 a.

Le meilleur moyen d'exclure la variabilité liée au patient est de créer un nouveau repère patient-dépendant et acquisition-dépendant, illustré par les Figure 5, 6 et 7.

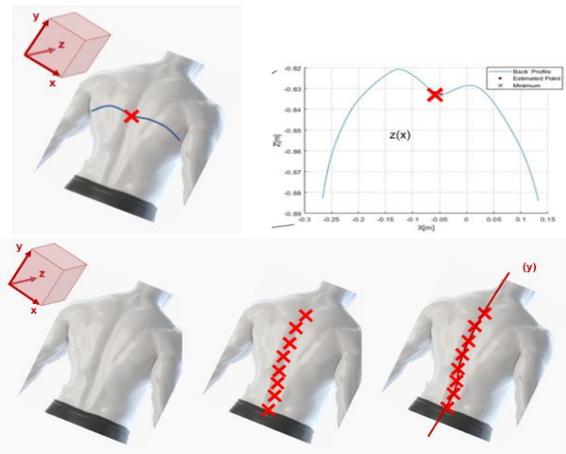


Fig. 5 Définition de l'axe y du nouveau système de coordonnées patient-dépendant et acquisition-dépendant: axe passant par le minimum local de la courbe de surface $z(x)$ de chaque coupe axiale.

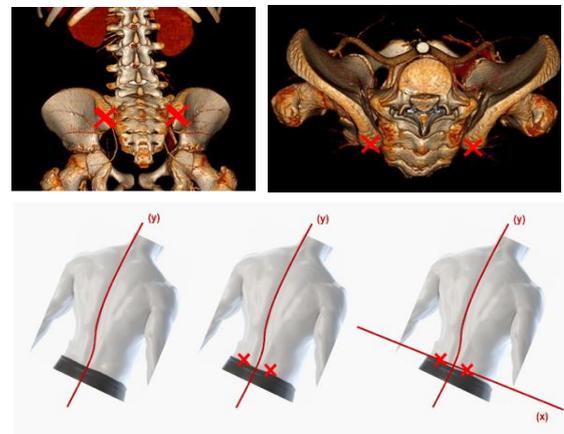


Fig. 6 Définition de l'axe x du nouveau système de coordonnées patient-dépendant et acquisition-dépendant: axe passant par les points de surface situés à l'aplomb des deux épines iliaques postéro-supérieures.

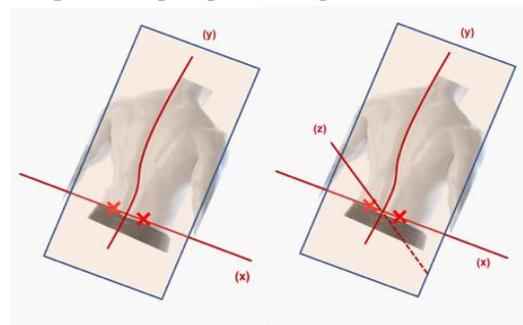


Fig. 7 Définition de l'axe x du nouveau système de coordonnées patient-dépendant et acquisition-dépendant: axe orthogonal au plan de surface moyen passant par l'origine du repère (i.e. intersection de x et y). Il y a donc un axe z par degré de flexion antérieure.

Comme illustré par les trois figures ci-dessus, le nouveau système de coordonnées est défini de la façon suivante :

- L'axe y devient l'axe crânio-caudal du patient. Il correspond à la position de la colonne vertébrale, déterminée pour chaque coupe axiale à l'aide du minimum local de la courbe de surface $z(x)$. L'axe y est l'axe reliant le minimum local de chaque coupe axiale.
- L'axe x devient l'axe droite-gauche du patient. Il est défini à l'aide de deux points de surface proéminents et symétriques en termes de profondeur. D'après la littérature [15,16], il existe quelques points de surface proéminents conservés d'un patient à l'autre, notamment les épines scapulaires et les épines iliaques postéro-supérieures (EIPS). Contrairement aux épines scapulaires, les EIPS ont une profondeur faiblement influencée par la déformation rachidienne. Les points de surface situés à leur aplomb sont donc utilisés pour définir le nouvel axe x. En revanche, leur hauteur (y) peut être rendue asymétrique par la déformation frontale du rachis. Afin de s'en affranchir il est alloué à ces deux points de surface la même coordonnée y. Soient les coordonnées respectives des deux points de surface à l'aplomb des EIPS gauche et droite (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) , l'axe x patient-dépendant est donc l'axe passant par les points de coordonnée (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_1, z_2) .

L'intersection entre les axes x et y définit l'origine du nouveau repère patient-dépendant.

- L'axe z (de profondeur) devient l'axe antéro-postérieur du patient et est défini, pour chaque acquisition (i.e. pour chaque degré de flexion antérieure), comme l'axe orthogonal au « plan de surface moyen » du dos du patient qui correspond à une régression linéaire à deux dimensions de l'ensemble des points du nuage pour l'acquisition donnée.

3. Définition du paramètre d'asymétrie de surface

Comme mentionné dans la définition de la scoliose, la déformation rachidienne dans le plan axial se manifeste par une asymétrie droite/gauche de la cage thoracique appelée « gibbosité » cliniquement.

L'enjeu de la seconde partie de ce travail a été de définir un paramètre qui détecte et quantifie de manière précise cette asymétrie droite/gauche à partir des données du nuage de points de surface du dos du patient. Après avoir étudié des paramètres proposés par différentes études [13–16], il a finalement été retenu un paramètre d'asymétrie de surface inédit basé sur l'aire sous la courbe de surface $z(x)$.

Ce paramètre est défini selon les étapes suivantes (illustrées par la Figure 8) :

- 1) Pour une coupe axiale (i.e. un y) donnée d'une acquisition donnée :

- a) L'étude de la courbe de surface $z(x)$ est limitée à la fois en x (sur un intervalle D fixe de 20 cm centré sur 0) et en z (sur un intervalle d fixe de 5 cm dont la borne supérieure correspond au z du minimum local).
- b) Les deux aires sous la courbe (ASC) « latéralisées » sont calculées : ASC gauche sur l'intervalle $[-\frac{D}{2}; 0]$ et ASC droite sur l'intervalle $[0; \frac{D}{2}]$.
- c) Le rapport entre l'ASC latéralisée maximale et l'ASC latéralisée minimale est calculé. Le but de cette opération est d'éviter une compensation des différences obtenues lors de l'intégration du paramètre à l'étape suivante, c'est-à-dire d'éviter qu'une différence droite/gauche à un étage soit masquée par une différence gauche/droite à un autre étage comme il est classique d'observer dans la scoliose.

Le paramètre ainsi obtenu est nommé « ratio d'ASC latéralisée max/min » et noté IAS (pour index d'asymétrie de surface).

- 2) Pour une acquisition donnée, il est possible d'intégrer tous y. Ce paramètre intégré est nommé « ratio intégré d'ASC latéralisée max/min » et on le note IASi (pour index d'asymétrie de surface intégrée).
- 3) Enfin, pour un patient donné, il est possible :
 - a) D'intégrer une deuxième fois le paramètre intégré sur l'ensemble du mouvement de flexion antérieure (i.e. l'ensemble des acquisitions) afin de sensibiliser davantage ce dernier (on notera le paramètre IASi2).
 - b) Suivre l'évolution de notre paramètre IASi sur l'ensemble du mouvement de flexion.

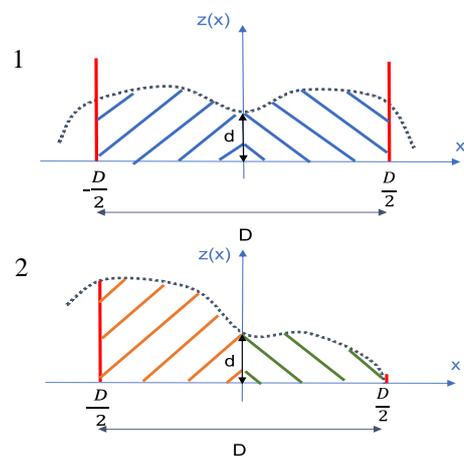
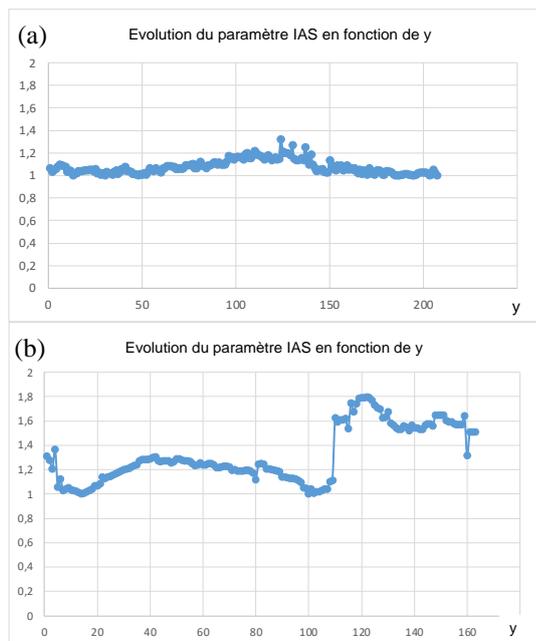


Fig.8 Définition du paramètre d'asymétrie de surface IAS pour une coupe axiale donnée

1. Absence de scoliose donc de déformation rachidienne axiale → pas d'asymétrie de surface → IAS ≈ 1.
2. Scoliose donc déformation rachidienne axiale → asymétrie de surface → IAS > 1.

Des premiers enregistrements chez quatre personnes indemnes de scoliose et une personne présentant une scoliose lombaire dextro-convexe de faible sévérité (angle de Cobb $\approx 10^\circ$) ont pu être réalisés. L'évolution du paramètre retenu (IAS) le long de l'axe y chez un individu sain et chez l'individu scoliotique est présenté par la *Figure 9*.

Chez le patient sain, le paramètre IAS est très proche de 1 et qu'il est au maximum à 1.4 tandis que chez le patient scoliotique, le paramètre AS est >1 et s'élève autour de 1.8 à l'étage de la déformation (i.e. lombaire).



Fig; 9 Evolution du paramètre IAS en fonction de y

(a) chez un individu sain: IAS ≈ 1 .

(b) chez un individu avec scoliose lombaire modérée: IAS >1 et maximal à l'étage lombaire (i.e. étage de la déformation maximale).

IV. DISCUSSION

Ce travail préliminaire a abouti à la définition d'un paramètre d'asymétrie de surface issu des données du nuage de points de surface du dos obtenu par une caméra de profondeur au cours d'un protocole d'acquisition inédit. Si les premiers résultats sont encourageants et semblent indiquer la pertinence de ce paramètre, ce dernier devra bien entendu être testé rigoureusement sur de larges cohortes au cours de l'étude principale qui fera suite afin d'établir s'il permet ou non de répondre aux objectifs de dépistage et d'évaluation de la sévérité de la scoliose.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, Czaprowski D, Schreiber S, de Mauroy JC, et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis and Spinal Disorders* 2018;13:3. <https://doi.org/10.1186/s13013-017-0145-8>.
- [2] Harrison DE, Betz JW, Cailliet R, Colloca CJ, Harrison DD, Haas JW, et al. Radiographic Pseudoscoliosis in Healthy Male Subjects Following Voluntary Lateral Translation (Side Glide) of the Thoracic Spine. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 2006;87:117–22. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.08.004>.
- [3] Yaman O, Dalbayrak S. Kyphosis and review of the literature. *Turk Neurosurg* 2014;24:455–65. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.JTN.8940-13.0>.
- [4] Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop* 2013;7:3–9. <https://doi.org/10.1007/s11832-012-0457-4>.
- [5] Tones M, Moss N, Polly DW. A Review of Quality of Life and Psychosocial Issues in Scoliosis: *Spine* 2006;31:3027–38. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000249555.87601.fc>.
- [6] Dunn J, Henrikson NB, Morrison CC, Blasi PR, Nguyen M, Lin JS. Screening for Adolescent Idiopathic Scoliosis: Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force. *JAMA* 2018;319:173–87. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.11669>.
- [7] Grivas TB, Vasiliadis ES, Mihas C, Savvidou O. The effect of growth on the correlation between the spinal and rib cage deformity: implications on idiopathic scoliosis pathogenesis. *Scoliosis* 2007;2:11. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-2-11>.
- [8] Xu Z, Zhang Y, Fu C, Liu L, Chen C, Xu W, et al. Back Shape Measurement and Three-Dimensional Reconstruction of Spinal Shape Using One Kinect Sensor: IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging, IEEE ISBI 2020, 2020, p. 745–9. <https://doi.org/10.1109/ISBI45749.2020.9098481>.
- [9] Wasenmüller O, Stricker D. Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision. ACCV Workshops, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54427-4_3.
- [10] Khoshelham K, Elberink SO. Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors* 2012;12:1437–54. <https://doi.org/10.3390/s120201437>.
- [11] Corti A, Giancola S, Mainetti G, Sala R. A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. *Robotics and Autonomous Systems* 2016;75:584–94. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.09.024>.
- [12] Ballester J, Pheatt C. Using the Xbox Kinect sensor for positional data acquisition. *American Journal of Physics* 2013;81:71–7. <https://doi.org/10.1119/1.4748853>.
- [13] Kokabu T, Kawakami N, Uno K, Kotani T, Suzuki T, Abe Y, et al. Three-dimensional depth sensor imaging to identify adolescent idiopathic scoliosis: a prospective multicenter cohort study. *Sci Rep* 2019;9:9678. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46246-0>.
- [14] Sudo H, Kokabu T, Abe Y, Iwata A, Yamada K, Ito YM, et al. Automated noninvasive detection of idiopathic scoliosis in children and adolescents: A principle validation study. *Sci Rep* 2018;8:17714. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36360-w>.
- [15] Patias P, Grivas TB, Kaspiris A, Aggouris C, Drakoutos E. A review of the trunk surface metrics used as Scoliosis and other deformities evaluation indices. *Scoliosis* 2010;5:12. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-5-12>.
- [16] Bonnet V, Yamaguchi T, Dupeyron A, Andary S, Seilles A, Fraise P, et al. Automatic estimate of back anatomical landmarks and 3D spine curve from a Kinect sensor. 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob) 2016. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2016.7523746>.

Session 6 : Accès aux Objets Atypiques

Président de session : Dominique Archambault

Perspectives d'apport du projet PRIM dans le domaine du handicap

Céline Jost, Justin Debloos,
Gérard Uzan
Université Paris 8
Laboratoire CHART
Saint-Denis

Brigitte Le Pévédic
Université de Bretagne Sud
Laboratoire Lab-STICC
Vannes

Agnès Piquard-Kipffer,
Caroline Barbot-Bouzit
INSHEA
Laboratoire Grhapes
Suresnes

Abstract— Avec le projet PRIM, nous souhaitons permettre à des personnes de créer des scénogrammes (scénarios d'interaction entre un humain et des dispositifs numériques) sans devoir se former à la programmation ou faire appel à des informaticiens. Dans PRIM, la conception du logiciel renverse les codes classiques dans le sens où il représente la pensée de l'humain (fondée sur les interactions) plutôt que la logique de l'ordinateur (fondée sur l'algorithmique) grâce à une représentation renouvelée du temps, abandonnant la *timeline* normée pour une *timeline* modifiée, propre à PRIM. Après avoir évalué l'acceptabilité et la compatibilité cognitive de cette *timeline* par 50 participants et obtenu des résultats encourageants, nous présentons, dans ce papier, les résultats de l'évaluation qualitative de l'intérêt d'un tel outil pour les participants et, plus spécifiquement, dans le domaine du handicap.

Keywords—scénogramme ; métaphore de la *timeline* ; logiciel ; programmation pour tous

I. INTRODUCTION

Le projet PRIM (Playing and Recording with Interactivity and Multisensoriality) a pour objectif de réunir une communauté pluridisciplinaire pour concevoir un logiciel original permettant de créer rapidement et simplement des scénogrammes, c'est-à-dire des scénarios d'interaction entre un humain et différents objets numériques [1][2]. Il répond au besoin exprimé par une grande partie de la population d'être autonome dans la création d'activités interactives. En effet, à l'heure actuelle, il est nécessaire d'utiliser des langages de programmation pour accéder aux fonctionnalités des objets connectés afin de les faire coopérer entre eux. Ce qui revient, pour cette population, à devoir choisir entre se former à la programmation ou sous-traiter à des informaticiens. Dans les deux cas, le processus de création est considérablement ralenti ou rendu complètement impossible. Pourtant, de nombreux domaines en ont besoin, par exemple l'éducation pour créer des exercices dans le cadre de la pédagogie différenciée ; la santé pour créer des activités dans le cadre de la rééducation ou des exercices de stimulation cognitive pour des patients ayant des troubles cognitifs ; l'art pour créer des œuvres numériques qui évoluent en fonction des actions du visiteur ; le théâtre pour permettre au metteur en scène de définir des interactions entre le comédien sur scène et des dispositifs numériques ; le cinéma pour créer des films 4D interactifs ; la recherche pour créer des conditions

expérimentales permettant d'explorer l'impact de la technologie sur l'humain, etc.

A l'heure actuelle, il n'existe aucun logiciel permettant de créer toutes ces interactions sans programmation [3], [4]. La solution qui semble la plus simple est incarnée par l'ensemble des langages de programmation visuelles existants tels que Choregraphe pour le robot Nao [5], Blockly pour la programmation sur des objets simulés [6], [7], ou Scratch très utilisé pour apprendre la programmation à des enfants [8]. La programmation visuelle a été une révolution dans le domaine puisqu'elle s'est avérée très complémentaire à la programmation textuelle et a permis à davantage de personnes de faire de la programmation [9]. Mais elle est encore trop complexe pour permettre à tout un chacun de mettre en œuvre ses idées [10].

L'originalité du projet PRIM est de vouloir changer de paradigme en proposant un logiciel basé sur la façon de penser des humains et non sur la façon de fonctionner de l'ordinateur. Ainsi, nous souhaitons que l'humain puisse facilement créer des interactions basées sur son modèle mental, sans nécessité de les traduire dans la logique informatique, ce qui rendra le système très simple puisque perçu comme naturel. Le logiciel proposera bien un langage graphique, assimilé à de la programmation, mais basé sur un mode de réflexion propre à l'humain (ici l'interaction) plutôt que sur un mode de réflexion propre à la conception informatique et donc au langage informatique (ici l'algorithmique). L'objectif est donc de représenter la vision de l'humain et non la vision de la machine (comme c'est le cas dans les langages de programmation basés sur l'algorithmique). Dans cette perspective, la section II pose le contexte, les limites et les attendus du projet, présente les idées qui constituent le socle du logiciel à développer, puis présente le verrou scientifique majeur de ce travail. Ensuite la section III présente un prototype de logiciel développé pour proposer une solution au verrou majeur identifié et évaluer l'acceptabilité du futur logiciel afin de vérifier si le projet peut poursuivre dans sa voie. La section IV présente la méthodologie de l'évaluation menée pour valider notre proposition et vérifier si les utilisateurs s'y projettent. Ensuite la partie V présente les avis des utilisateurs sur l'utilité d'un tel logiciel. Puis la partie VI discute ces résultats et conclut le papier.

II. IDÉES ET CONCEPTS

A. Contexte : le scénagramme

Parce que notre objectif est de créer un langage différent d'un langage de programmation, plus simple, présentant une logique différente, il est exclu d'essayer de refaire ce que font déjà les langages de programmation. Ainsi, notre objectif est de créer ce que nous appelons des scénagrammes [2] et qui sont définis par « une suite d'actions effectuées par l'utilisateur et/ou par des objets numériques, alternativement, pour atteindre un but commun basé sur la stimulation cognitive ». Cela veut dire qu'un scénagramme utilise les fonctionnalités existantes des capteurs et des actionneurs présents sur les objets connectés.

B. Idées principales

Une revue de littérature [10] a montré qu'une des raisons du succès des langages de programmation visuelle réside dans la conception même de leur interface qui est composée de plusieurs zones clairement identifiées et qui aident à la programmation : zone où se trouvent les éléments de programmation (composants), zone où l'on construit le programme, zone de paramétrage des composants et zone d'exécution du programme. Nous retrouvons exactement les mêmes zones dans les éditeurs de montage vidéo et de conception musicale qui sont des logiciels facilement utilisés et qui permettent de faire de la création.

L'autre succès de la programmation visuelle vient de sa manipulation facile avec des composants que l'on déplace d'une zone à l'autre et qui graphiquement donnent des indices pour aider à la programmation par leur forme et/ou par leur couleur. C'est également une caractéristique que l'on retrouve dans les deux autres types de logiciels susmentionnés.

Ainsi, le projet PRIM cherche à s'inspirer des langages de programmation visuelle mais également des éditeurs de montage vidéo [11]–[16] et de conception musicale [17] qui possèdent les mêmes points forts mais qui présentent une approche différente pour permettre la création par l'utilisateur.

C. Verrou scientifique : le temps

La plus grande différence que l'on observe entre les langages de programmation visuelle et les deux autres types de logiciels réside dans la représentation et la gestion du temps. En effet, les premiers sont basés sur un temps relatif et événementiel où chaque action arrive après la précédente mais à un temps indéfini. Certaines actions peuvent se passer à n'importe quel instant et d'autres peuvent même ne jamais arriver. Cette incertitude, omniprésente lorsqu'on interagit avec un humain, est totalement absente des seconds types de logiciels qui sont basés sur un temps réel. Dans ce cas, chaque action arrive à un instant T précis et à une durée précise. Le temps se poursuit inlassablement sans jamais s'arrêter et il est impossible de prendre en compte des actions incertaines. Ces deux temporalités, qui sont incompatibles par nature, existent de façon séparée (soit dans des logiciels différents, soit dans des zones différentes d'un même logiciel comme pour Chorégraphe, par exemple). Mais il n'existe aucun logiciel où elles co-existent en utilisant la même charte graphique. Dans la majorité des cas, le temps est représenté par une ligne de temps

mais dans le cas des langages de programmation visuelle, c'est la construction du programme qui construit, au fur et à mesure, une ligne de temps (horizontale ou verticale), tandis que dans le cas des éditeurs de montage vidéo ou de conception musicale, la ligne de temps existe et est représentée par une *timeline* sur laquelle l'utilisateur construit sa vidéo ou sa musique. Dans le premier cas, la ligne de temps est donc plutôt implicite et l'utilisateur doit la reconstruire mentalement, alors que dans le second cas, elle est explicite et semble représenter directement le modèle mental de l'utilisateur.

Dans le cadre du projet PRIM, nous faisons l'hypothèse que les seconds types de logiciels sont plus simples à utiliser parce qu'ils se basent sur une *timeline*. D'une part, elle est facile à utiliser et à manipuler, et d'autre part elle pourrait éviter la complexité cognitive de traduire mentalement la pensée humaine vers la pensée informatique et inversement.

Cette proposition possède un verrou scientifique majeur. Les utilisateurs sont-ils capables de s'habituer et d'accepter une *timeline* qui ressemble à celles des éditeurs de montage et de conception mais qui manipule un temps événementiel ? En effet, son utilisation risque de demander un effort cognitif différent, et de déconstruire les habitudes prises avec une *timeline* basée sur le temps absolu.

III. SCENAPROD : PREMIER PROTOTYPE

ScenaProd (pour « Production de scénagrammes ») est un prototype réalisé dans le but de mettre en œuvre une *timeline* événementielle afin de répondre à la problématique présentée dans la section II.C. La Fig. 1 montre une présentation générale du prototype qui contient un menu pour créer, jouer ou stopper un scénagramme ainsi que trois zones facilement identifiables (palette des composants, paramétrage, édition). Les utilisateurs peuvent utiliser 4 composants rappelant des usages classiques pour faciliter leur imagination et leur projection dans un futur logiciel complet et sont suffisamment nombreux pour utiliser la *timeline*. L'utilisateur peut jouer du son, afficher du texte, afficher une image ou attendre que quelqu'un appuie sur une touche du clavier. Lors de la lecture du scénagramme, les textes et les images s'affichent dans une petite fenêtre qui permet de visualiser le scénagramme en cours de lecture.

Au niveau de la *timeline*, le prototype propose un trait en pointillé pour représenter un temps discontinu et se comporte comme une partition de musique, en passant à la ligne afin d'éviter un défilement infini horizontal qui est plus difficile à manipuler que le défilement vertical. A chaque fois qu'un utilisateur place un composant sur la *timeline*, une croix noire apparaît à la suite. C'est un menu contextuel qui permet de faire des altérations de la *timeline*. Par exemple dans ce prototype, il est possible de faire une duplication de la *timeline* de façon à obtenir deux lignes de temps, en parallèle et autonomes. C'est ce point particulier qui est l'objet de notre évaluation. En effet, des *timelines* dupliquées (visibles sur la figure par des pointillés verticaux qui les relient) sont autonomes et, en cours de lecture, il n'existe aucune synchronisation temporelle entre les deux. Or, dans les logiciels de montage vidéo, il existe une synchronisation temporelle verticale : tout élément placé sur un même axe vertical est affiché ou lu au même instant. C'est

différent dans le cas de ScenaProd où des éléments placés sur le même axe vertical peuvent être lus à des moments différents comme sur une partition de musique.

C'est ce point précis qui constitue un verrou scientifique majeur. L'utilisateur peut-il accepter cette désynchronisation inhabituelle et contraire à ses habitudes ? Et peut-il se projeter dans un tel logiciel ?

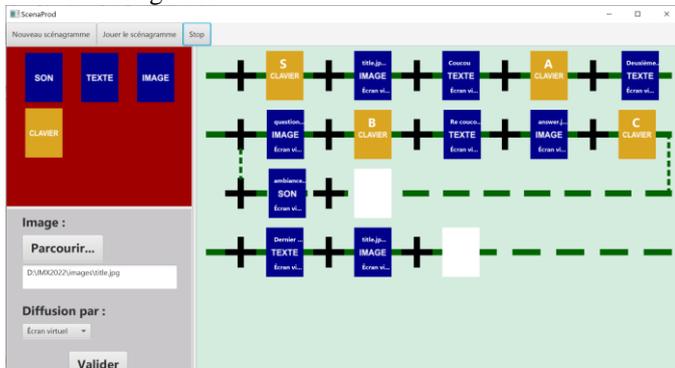


Fig. 1. Capture d'écran de ScenaProd

IV. ÉVALUATION

L'objectif de l'évaluation était de vérifier l'acceptabilité de la *timeline* et la projection des utilisateurs dans ce type de logiciel. Chaque passation se déroulait à distance sur la plateforme Zoom et durait au maximum 30 minutes. Les critères d'inclusion étaient donc l'accès à un ordinateur et à une connexion Internet. Pour effectuer l'évaluation, les participants prenaient le contrôle de l'ordinateur de l'expérimentateur (sous MacOs) qui restait présent tout au long de la séance afin de donner des instructions, répondre aux questions ou aider les participants, si nécessaire. L'évaluation était divisée en trois étapes : (1) Les participants (ou les parents dans le cas des mineurs) devaient signer un formulaire de consentement et étaient informés qu'il n'y avait aucun enregistrement, que les données seraient anonymisées et qu'ils pouvaient arrêter n'importe quand. (2) Les participants devaient suivre les instructions de l'expérimentateur sous forme d'un tutoriel pour les amener à créer trois scénarimages de difficulté croissante. Les tâches étaient choisies de manière à ce que chaque participant vive la même expérience de lecture de scénarimage qui était notre sujet d'étude. Le troisième scénarimage à construire avait pour but d'exposer le participant à différents stimuli simultanés qui étaient positionnés sur des axes verticaux différents. L'objectif de l'expérimentateur était alors de s'assurer que chaque participant avait bien vu et expérimenté la lecture de ce scénarimage complexe¹. (3) Les participants devaient remplir un questionnaire. La première partie du questionnaire était le F-SUS (la version française du System Usability Scale) [18] qui nous permettait de vérifier si l'interface graphique était facile à utiliser sans constituer un biais ou un frein pour l'évaluation de la *timeline*. La deuxième partie, composée de 10 questions utilisant la même échelle que le SUS (échelle de Likert en 5 points), posait des questions plus spécifiques sur le logiciel, la *timeline* et les projections du

participant (voir TABLE I.). La troisième partie comportait les informations signalétiques du participant ainsi que ses opinions sur différents sujets.

En plus de cela, l'expérimentateur devait noter la durée totale de la session, le nombre de questions posées, le nombre de fois où les participants avaient été bloqués et les commentaires des participants s'il y en avait.

Avant cette évaluation, nous avons effectué une évaluation préliminaire avec 5 participants pour tester le protocole et nous assurer qu'une session durait moins de 30 minutes.

TABLE I. QUESTIONS POSÉES AUX PARTICIPANTS

<p>Q1. J'ai éprouvé des difficultés à effectuer la tâche demandée. Q2. Je trouve que ScenaProd ressemble à un logiciel de montage vidéo. Q3. Je pense qu'il est nécessaire d'avoir des compétences en informatique pour utiliser ScenaProd. Q4. Je trouve qu'il est difficile de comprendre comment positionner les blocs sur la ligne de temps. Q5. Je pense que ScenaProd pourrait être utile dans le cadre de mon activité. Q6. Lorsqu'on clique sur « Jouer le scénarimage », je pense que l'avancement dans le scénarimage est facile à comprendre visuellement. Q7. Je trouve que la gestion du temps est déstabilisante. Q8. Je trouve qu'il est difficile de comprendre que chaque ligne de temps possède son propre temps. Q9. Je trouve qu'il est facile de faire une duplication de la ligne du temps. Q10. Je pense que je suis capable de faire des nouveaux scénarimages sans aide.</p>
--

V. RÉSULTATS

A. Participants

L'étude a été menée avec 50 participants venant de différentes régions françaises (31 F, 19 H), âgés de 12 à 75 ans (moyenne : 34,5 ans ; écart-type : 15,4). Les hommes étaient âgés de 12 à 52 ans (moyenne : 28,9 ans ; écart-type : 12,3) et les femmes de 12 à 75 ans (moyenne : 38 ans ; écart-type : 15,8).

La majorité des participants étaient dans la vie active (33). Les autres étaient collégiens (4), lycéens (2), étudiants (9) ou retraités (2). Parmi les participants dans la vie active, 17 avaient une profession intermédiaire, 12 étaient cadres ou dans des professions intellectuelles, 2 étaient employés, 1 était artisan et 1 était en reconversion professionnelle.

Parmi les participants, 11 avaient une activité en lien avec la santé, 12 avec l'informatique et 5 faisaient de l'enseignement. Trente participants avaient déjà utilisé un logiciel de montage vidéo. Et à l'issue de l'évaluation, 41 personnes ne connaissaient aucun outil similaire à ScenaProd. Les 9 autres avaient cité des logiciels de didacticiel, Microsoft Powerpoint ou des logiciels de montage vidéo.

Chaque participant a manipulé le logiciel en moyenne 18 minutes par session (médiane : 17,5 ; écart-type : 5,1 ; min : 9 ; max : 33). Cinq participants ont eu besoin de l'aide de l'expérimentateur pour avancer (8 interventions au total), tandis que 18 participants ont posé des questions, souvent pour obtenir une validation de l'action à faire, pour un total de 47 questions.

¹ Voir ici : <https://youtu.be/j8xpcJCUEXc>

B. Acceptabilité de la timeline

Le prototype a obtenu un score de F-SUS de 84 avec un écart-type de 8,12 indiquant une acceptabilité quasiment excellente, ce qui indique que le prototype a permis de mettre en œuvre et d'évaluer la timeline dans les meilleures conditions possibles (l'évaluation du prototype est hors de propos dans ce travail). Ce qui est intéressant c'est que 18% des participants ne connaissaient aucun outil similaire mais que 60% reconnaissaient l'inspiration venant des outils existants.

La Fig. 2 montre les résultats aux dix questions présentées dans la TABLE I. Les résultats sont très prometteurs puisque 92% des participants se sentent capables de refaire un scénagramme tout seul (Q10), 86% ont trouvé que la gestion du temps n'était pas déstabilisante (Q7) et 80% ont trouvé qu'il n'était pas difficile de comprendre que chaque ligne possède son propre temps (Q8) sachant que tous les participants ont bien compris la gestion du temps à l'issue de l'évaluation.

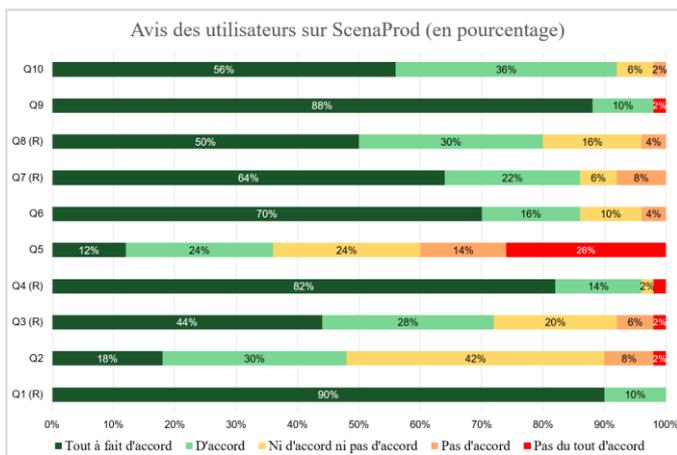


Fig. 2. Réponses aux questions de recueil d'avis des utilisateurs. Les « R » indiquent les questions pour lesquelles le codage a été inversé. Il faut donc interpréter les résultats comme si la question était positive.

En plus de ces questions, les résultats des questions d'opinion indiquent que 96% des participants ont compris que la timeline représente la progression du scénagramme et non le temps réel comme dans une vidéo ; 98% pensent qu'il est facile de comprendre et de s'habituer à cette gestion du temps ; 84% n'ont pas été dérangés par la non synchronisation verticale du temps.

Cette évaluation a permis de montrer que la synchronisation verticale peut disparaître sans perturber l'utilisateur afin de proposer une ligne de temps relatif/événementiel comme base de notre futur logiciel.

La suite de ce papier s'intéresse au ressenti des participants sur l'utilité de l'outil dans le futur et dans le cadre de leur activité professionnelle.

C. Utilité de ScenaProd

En premier lieu, il a été demandé aux participants de donner leur avis sur l'utilité de ScenaProd lorsqu'il sera complet. Au total, 48 participants ont donné leur avis pour un total de 546 mots qui ont donné 78 propositions, les deux autres participants indiquant ne pas avoir d'avis. Ces 78 propositions ont pu être

classées en 5 catégories : 17 propositions en lien avec la création, 11 perspectives dans le domaine du handicap, 20 avis de support pour l'apprentissage, 18 avis de support pour la communication et 12 propositions diverses. Cette dernière catégorie contient deux propositions isolées donc inclassables ainsi que 10 propositions qui semblent émerger directement des consignes de l'évaluation et donc possiblement être des réponses influencées (7 concernant le montage vidéo et 3 concernant la création de scénagrammes).

D. Exemples d'utilisation dans l'activité professionnelle

En second lieu, il a été demandé aux participants de donner, s'ils le pouvaient, des exemples d'utilisation de ScenaProd dans un contexte qui est propre à leur activité. Au total 41 participants ont donné leur avis pour un total de 456 mots qui ont donné 55 propositions. Parmi les 9 autres participants, 3 ont indiqué qu'ils voyaient des exemples sans donner de précision et 6 ont indiqué ne pas avoir d'exemples à donner. Les 55 propositions ont pu être classées en 4 catégories, similaires à la question précédente : 9 propositions en lien avec la création, 10 perspectives dans le domaine du handicap, 14 avis de support pour l'apprentissage et 19 avis de support pour la communication. La Fig. 3 montre le total des propositions faites par catégorie et en fonction de l'utilité à long terme de ScenaProd et des exemples d'utilisation.

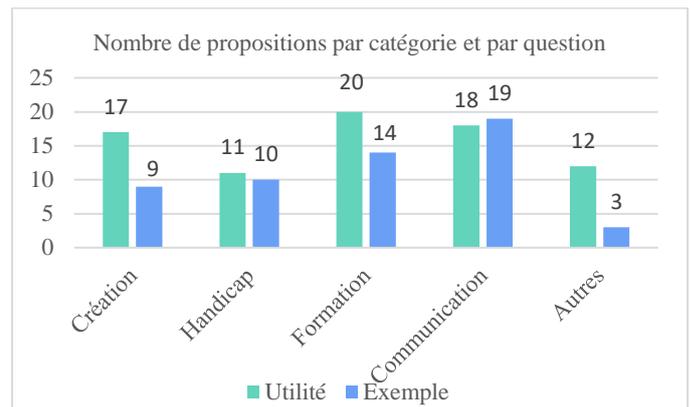


Fig. 3. Nombre de propositions par catégorie et par question

E. Commentaires supplémentaires

Enfin, il a été demandé à chaque participant si elle ou il avait des commentaires supplémentaires à faire. La réponse a été négative pour 33 participants, et les 17 autres ont fait des commentaires pour un total de 237 mots : 8 participants ont fait des compliments sur ScenaProd, 3 ont indiqué leur curiosité de voir l'outil final, 2 ont indiqué avoir besoin de plus de temps pour pouvoir se prononcer, 2 ont fait des remarques d'ordre ergonomique et 2 ont fait des remarques d'ordre pratique.

VI. DISCUSSION ET CONCLUSION

A. Résultats principaux

Les résultats montrent que les participants se sont largement projetés dans l'utilisation de ScenaProd. En effet, 96% des participants ont trouvé une ou plusieurs utilités à ScenaProd lorsqu'il sera complet et 88% des participants pensent qu'il

serait utile dans le cadre de leur activité professionnelle. C'est très positif car cela confirme que le prototype proposé, bien que très simple, est suffisamment complet pour permettre aux utilisateurs de se projeter dans une utilisation future. Et cela confirme également que l'outil est assez simple pour permettre une utilisation par tous, rapidement. Spontanément, et après seulement 18 minutes de manipulation en moyenne, les participants pensent à 4 champs de compétences pour ScenaProd à travers 118 avis. Sur ces 118 avis, 32,2% évoquent notre prototype comme moyen de communication ou de présentations, 28,8% comme outil de formation et d'apprentissage, 21,2% comme logiciel de création et enfin 17,8% comme solution à des problèmes dans le domaine du handicap.

B. Communication et présentations

Une majorité des propositions des participants évoquent la possibilité d'utiliser ScenaProd pour faire des exposés ou des présentations (60%) et voient notre prototype comme une alternative pour faire des diaporamas (18%). Le reste des propositions est moins unanime : 3 personnes pensent que ScenaProd peut permettre de communiquer sur les réseaux sociaux, 5 personnes qu'il peut représenter une interface avec un robot, compléter une information verbale, être un outil de présentation adapté, proposer des ressources interactives ou, enfin, permettre de créer des albums parlants pour la famille.

C. Formation et apprentissage

Il est intéressant de constater que dans les propositions classées dans cette catégorie, les participants ont pensé à trois usages. En premier les participants ont évoqué ScenaProd comme outil d'assistance de l'enseignant lors de la formation pour des publics variés (44,1%). Mais ils ont également vu ScenaProd comme plateforme d'auto-apprentissage donc à utiliser de façon autonome (38,2%). Enfin, plusieurs participants ont vu, dans notre outil, le potentiel de stimuler les utilisateurs, soit par sa nature multisensorielle, soit par sa nature ludique (17,7%).

D. Création

Les processus de création sont bien représentés dans les résultats. Il est intéressant de constater, au vu des inspirations de ScenaProd et de son objectif (qui est la création), que 26,9% des commentaires ont évoqué la possibilité de faire du montage vidéo, photo ou d'animation et 26,9% de la programmation (classique, de machines industriels ou de domotique). Mais d'autres disciplines ont également été citées et cela montre que ScenaProd peut favoriser le processus de création : 26,9% des commentaires ont évoqué les histoires interactives, 11,6% les créations artistiques et 7,7% les jeux vidéo.

E. Handicap

Cette dernière catégorie est assez transversale car, même s'il y a 21 commentaires spécifiques à la question du handicap, on trouve en réalité des propositions en lien avec le handicap dans les trois autres catégories. En faisant des regroupements et en supprimant les doublons, on peut répertorier 4 catégories : bénéficiaire, discipline, évolution de la personne, outil d'assistance.

Concernant les bénéficiaires, les participants ont mis en évidence l'utilité de ScenaProd pour les personnes autistes, pour les personnes âgées et pour les enfants. En plus d'être un outil de compensation générale pour le trouble du spectre autistique, ScenaProd pourrait permettre de communiquer à l'aide de pictogrammes et de sons et de visualiser les rituels de la journée. Pour les personnes âgées, il permettrait de mettre en place des scénarios d'assistance. Et pour les enfants il serait un bon outil pour leur éveil et pour stimuler leur créativité.

Concernant les disciplines, les participants en ont répertorié trois : ergothérapie, informatique, domotique. Notre prototype permettrait de créer des scénarios d'activités, d'occupations ou de tâches à réaliser, ce qui est le cœur de l'approche des ergothérapeutes. Il est également vu comme un outil capable de former à l'informatique ou qui est capable de donner la possibilité à des personnes en situation de handicap de comprendre et de réaliser des petits programmes. Enfin, il est également vu comme un logiciel permettant de contrôler facilement un système domotique ou des objets connectés.

Concernant l'évolution de la personne, les participants ont vu en ScenaProd un potentiel pour proposer des apprentissages adaptés, de la rééducation mnésique ou des réapprentissages, de la stimulation ou de l'entraînement (cognitif, sensoriel, créatif) et du suivi de soin. Concernant les outils d'assistance, les participants voient ScenaProd comme un facilitateur de communication. D'une part, il peut permettre à la personne en situation de handicap de communiquer (à l'aide de différentes stratégies), mais il peut, d'autre part, permettre aux autres de communiquer via des visites virtuelles, des guides personnalisés, des systèmes d'aide à domicile.

F. Perspectives

Les résultats montrent un très fort potentiel de ScenaProd pour stimuler la créativité et l'apprentissage et pour aider les personnes en situation de handicap. La suite du projet PRIM va donc explorer son utilité dans le domaine de l'éducation spécialisée où les besoins sont manifestes. Depuis plusieurs années, les robots sont de plus en plus utilisés dans ce domaine. Mais les robots montrent des limites de fiabilité et les enseignants ont souvent besoin de faire des modifications dans les scénarios pour adapter la situation d'apprentissage afin de combler les lacunes du robot. Ces modifications peuvent être longues ou impossibles et doivent être anticipées dans le calendrier de remédiations éducatives [19]. Dans ce contexte, un logiciel qui permette à des personnes de modéliser et matérialiser des interactions entre une personne et un système informatique sans avoir besoin de se former à la programmation aurait toute sa place. L'enseignant ou le rééducateur pourraient alors plus facilement adapter les actions des objets programmés aux besoins de l'enfant. Ce dernier pourrait actionner des contacteurs où les actions déclenchées mettraient en jeu de la multimodalité sensorielle. Ainsi, pour un enfant sourd, le toucher d'une photo avec un plat cuisiné déclencherait l'oralisation du nom du plat ou le geste associé en LSF (vidéo), associé à un souffle d'air chaud (plat chaud) ou froid (par exemple une glace). Ces mêmes associations pourraient avoir lieu dans le domaine des émotions. La vidéo d'un visage ou

d'une attitude corporelle pourrait être associée à des sons ou des musiques appropriées.

G. Conclusion

Notre prototype ScenaProd, bien que très incomplet, a reçu une forte adhésion des 50 participants à l'évaluation. Les 4 catégories qui ont émergé montrent que notre proposition atteint ses objectifs. Premièrement, ScenaProd est vu comme un outil de communication similaire au logiciel PowerPoint, ce qui est une comparaison très positive d'autant que le parallèle portait sur la simplicité d'utilisation et que cette simplicité était l'un des premiers critères de conception de notre interface, un second étant la prise en compte de la multisensorialité au-delà du texte-image et de l'audio-visuel standard. Deuxièmement, il est vu comme un outil adapté à l'apprentissage, ce qui est le but même des scénagrammes, donc notre objectif est atteint pour cette version. En effet, produire un scénagramme signifie programmer des interactions entre un humain et des dispositifs numériques dans un but commun basé sur la cognition. Troisièmement, notre prototype a inspiré des activités de création, ce qui est également un de nos objectifs et qui montre que les inspirations de notre interface se retrouvent dans les ressentis des participants. Notre prototype réussit, pour le moment, à être un hybride des langages de programmation visuelle et des éditeurs de montage vidéo et de conception musicale. Quatrièmement, ScenaProd a largement été cité comme outil d'aide aux personnes en situation de handicap, ce qui est très encourageant pour apporter une aide supplémentaire à ces personnes.

Cependant, il faut nuancer ces résultats car, malgré l'attention portée à l'écriture des consignes et à l'animation, certains biais (pré-suggestion, relances, etc.) dû aux consignes ou à l'exemple de scénagrammes peuvent générer quelques biais propres aux outils d'évaluation utilisés (effet d'attente miroir animateur – participants, effet de l'exemple illustratif sur les participants – ouverture/canalisation/blocage). Ainsi les réponses à cette évaluation restent très orientées : nous avons pu observer que les participants semblent s'être projetés surtout en fonction de leur activité et avoir cherché des exemples parmi ce qu'ils connaissaient déjà. En même temps, compte tenu de la diversité d'activité des participants, cela a également mis en relief la multidisciplinarité des scénagrammes et l'étendue applicative de notre approche.

Dans la suite du projet PRIM, nous allons organiser des ateliers et des séminaires avec des professionnels de santé et des professionnels de l'éducation afin de définir les besoins à couvrir dans les prochaines versions de ScenaProd. Il faudra pour cela présenter beaucoup plus d'exemples de scénagrammes pour éviter de bloquer l'imagination des participants dans une seule voie.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'université Paris 8 qui a financé ce travail via plusieurs appels à projets sur fond propre et avec une bourse doctorale de l'école doctorale CLI. Nous remercions également tous les membres du projet PRIM et tous les participants à l'évaluation. Et nous remercions également tous les étudiants

qui nous ont rejoint le temps d'un stage et qui ont participé à la réflexion.

REFERENCES

- [1] C. Jost et al., "PRIM Project: Playing and Recording with Interactivity and Multisensoriality," in *IMX 2021: ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 2021.
- [2] C. Jost, B. Le Pévédic, and G. Uzan, "Using Multisensory Technologies to Stimulate People: a Reflexive Paper on Scenagrams," in *SensoryX '21: Workshop on Multisensory Experiences, together with IMX 2021: ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 2021.
- [3] C. Jost, B. Le Pévédic, O. El Barraï, and G. Uzan, "MulseBox: Portable multisensory interactive device," in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2019, vol. 2019-October, pp. 3956–3961.
- [4] C. Jost, B. Le Pévédic, and G. Uzan, "Mulsebox: New multisensory interaction device," in *IHM 2019 - Actes de la 31e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, 2019, pp. 1–13.
- [5] E. Pot, J. Monceaux, R. Gelin, B. Maisonnier, and A. Robotics, "Choregraphe: A graphical tool for humanoid robot programming," *Proc. - IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun.*, pp. 46–51, 2009.
- [6] N. Fraser, "Ten things we've learned from Blockly," *Proc. - 2015 IEEE Blocks Beyond Work. Blocks Beyond 2015*, pp. 49–50, Dec. 2015.
- [7] E. Pasternak, R. Fenichel, and A. N. Marshall, "Tips for creating a block language with blockly," *Proc. - 2017 IEEE Blocks Beyond Work. B B 2017*, vol. 2017-November, pp. 21–24, Nov. 2017.
- [8] D. J. Malan, H. H. Leitner, D. J. Malan, and H. H. Leitner, "Scratch for budding computer scientists," in *Proceedings of the 38th SIGCSE technical symposium on Computer science education - SIGCSE '07*, 2007, vol. 39, no. 1, p. 223.
- [9] E. Coronado, F. Mastrogianni, B. Indurkha, and G. Venture, "Visual Programming Environments for End-User Development of intelligent and social robots, a systematic review," *J. Comput. Lang.*, vol. 58, p. 100970, Jun. 2020.
- [10] J. Debloos, C. Jost, C. Le Pévédic, and U. Gérard, "Création de scénagramme : critères d'un logiciel « idéal » utilisable par des non informaticiens," in *JCJC 2021 - Colloque Jeunes Chercheurs Jeunes Chercheurs*, 2021.
- [11] M. Waltl, C. Timmerer, and H. Hellwagner, "A test-bed for quality of multimedia experience evaluation of Sensory Effects," in *2009 International Workshop on Quality of Multimedia Experience*, 2009, pp. 145–150.
- [12] C. Timmerer, B. Rainer, and H. Hellwagner, "Sensory effect dataset and test setups Inter-Destination Multimedia Synchronization View project CONCERT View project," 2012.
- [13] M. Waltl, B. Rainer, C. Timmerer, and H. Hellwagner, "An end-to-end tool chain for Sensory Experience based on MPEG-V," *Signal Process. Image Commun.*, vol. 28, no. 2, pp. 136–150, Feb. 2013.
- [14] E. B. Saleme and C. A. S. Santos, "PlaySEM: a Platform for Rendering MulSeMedia Compatible with MPEG-V," in *Proceedings of the 21st Brazilian Symposium on Multimedia and the Web - WebMedia '15*, 2015, pp. 145–148.
- [15] D. P. De Mattos and D. C. Muchaluat-Saade, "Steve: A hypermedia authoring tool based on the simple interactive multimedia model," *Proc. ACM Symp. Doc. Eng. 2018, DocEng 2018*, Aug. 2018.
- [16] D. P. De Mattos, C. Muchaluat-Saade, Débora, and G. Ghinea, "Beyond Multimedia Authoring: On the Need for Mulsemedia Authoring Tools," *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 7, Jul. 2021.
- [17] D. Todea, "The Use of the MuseScore Software in Musical E-Learning," *Virtual Learn.*, p. 88, 2015.
- [18] G. Gronier and A. Baudet, "Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale," *Int. J. Human-Computer Interact.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2021.
- [19] O. R. Joubert, "L'enfant autiste, le robot, et l'enseignant : une rencontre sociétale," *Enfance*, vol. 1, no. 1, pp. 127–140, 2015.

Permettre l'autonomie dans l'activité de programmation par blocs pour des enfants non-voyants

Ken Andriamahery-Ranjalahy
LLA-CREATIS, Université de Toulouse,
UT2J
Toulouse, France
ken.andria@univ-tlse2.fr

Philippe Truillet
IRIT, Université de Toulouse,
CNRS, UT3
Toulouse, France
Philippe.Truillet@irit.fr

Abstract— Au collège, les langages visuels de programmation tels que Scratch sont utilisés en raison de leur simplicité de manipulation et ceux-ci ont même intégré les enseignements généraux depuis la réforme de 2016.

Nous avons développé le prototype TaBGO, permettant à des enfants malvoyants ou non-voyants de concevoir et d'exécuter des programmes Scratch en autonomie ou en collaboration. Dans cet article, nous présentons le prototype en nous focalisant sur les feedbacks (retours utilisateur) multimodaux audio-tactiles liés à l'exécution des programmes.

Nous discuterons des perspectives selon deux axes : le premier s'organise autour des aspects logiciel d'une part afin de permettre l'adaptation des activités de programmation au collège pour les non-voyants et d'autre part, le second axe se concentre sur les outils à mettre en place et sur leurs usages en classe inclusive.

Mots-clés—programmation, construction d'algorithmes, objets tangibles, multimodalité, autonomie

I. INTRODUCTION

Depuis 2009, de nombreuses enquêtes professionnelles prévoient une augmentation importante du nombre d'offres d'emploi dans le domaine de l'informatique [1]. Cette croissance trouve sa source dans l'importance grandissante du numérique dans le monde actuel. En corrélation avec ces changements technologiques, l'informatique commence également à atteindre les jeunes apprenants et les contextes éducatifs liés. Il est important de souligner la réforme de 2016 en France, qui intègre les notions d'informatique au programme de collège. Afin d'introduire ces notions, les professeurs de collège utilisent des plateformes en ligne (comme Scratch, Blockly ou Alice par exemple), car elles sont faciles à comprendre et à utiliser pour les néophytes. En raison de leurs syntaxes simples, leurs associations entre couleurs et fonctions, et leurs tutoriels intégrés, ces plateformes et les approches associées sont faciles à prendre en main. Cependant, ces supports reposent essentiellement sur des interactions visuelles, qui restent inaccessibles pour les non-voyants.

Il est néanmoins important de souligner les bénéfices de ces activités pour les non-voyants au-delà de la nécessaire inclusion

des personnes à besoin spécifique. Premièrement, il est important de préciser que la période du collège est très importante dans le développement sensori-moteur des jeunes apprenants, particulièrement pour les non-voyants en raison des troubles associés à leur handicap qui sont susceptibles d'apparaître [2]. Une approche simple et intégrable en milieu scolaire peut alors représenter une opportunité pour les élèves non-voyants de participer à diverses activités susceptibles de stimuler leurs compétences motrices, sensorielles et de favoriser leurs développements sensori-moteurs [3]. Deuxièmement, ces activités de programmation peuvent également représenter des opportunités de stimuler la collaboration entre élèves voyants et non-voyants dans un contexte éducatif. Ces collaborations sont susceptibles de faciliter l'inclusion des personnes non-voyantes, notamment en milieu scolaire, dès le niveau collège [4].

Ainsi, le présent article aborde cette problématique : est-il possible de proposer un médium non-visuel pour les non-voyants, afin de leur permettre un accès facile à la plateforme Scratch au même titre que les voyants ? De plus, est-il possible d'intégrer cette solution dans un environnement éducatif afin de favoriser l'inclusion de ces populations ?

Pour répondre à ces interrogations, le présent document propose une interface utilisateur tangible (TUI) composée d'une valise contenant des blocs physiques Scratch, d'une webcam et d'un logiciel de reconnaissance. En connectant les blocs, n'importe quel utilisateur (voyant ou non-voyant) peut construire des algorithmes. Ces algorithmes sont ensuite analysés par la webcam et traduits par le logiciel en fichier .sb3 (extension de fichier exploitable par la plateforme Scratch). En utilisant cette interface physique, les utilisateurs construisent des algorithmes de façon tangible, comme ils l'auraient fait visuellement (avec un clavier et une souris) sur la plateforme Scratch.

Afin d'explicitier cette solution, le présent article expose d'abord un bref état de l'art des technologies qui ont influencé la réalisation du projet TaBGO (acronyme de "Tangible Blocks Go Online"). Ensuite, une présentation rapide du prototype TaBGO est proposée et détaillée selon trois axes : matériel,

logiciel et un dernier se concentrant sur les fonctionnalités additionnelles utiles à la réalisation des exercices.

II. ETAT DE L'ART

A. Communication non-visuelle et multimodalité

Le projet TaBGO s'inscrit dans le domaine des technologies d'assistance [5, 6]. Si ces technologies ne sont pas nouvelles pour les non-voyants – le système à points de Louis Braille date des années 1850 par exemple –, ce domaine connaît cependant une récente augmentation des travaux de recherches liés. Cette augmentation peut s'expliquer par les progrès dans le domaine des composants électroniques libres (open source), comme Arduino, BeagleBone et Raspberry Pi. Ces compagnies proposent de la technologie accessible en matière de prix et de simplicité d'usage. Pour cette raison, ce type de technologie est de plus en plus utilisé dans les recherches universitaires depuis les vingt dernières années [7] qui peuvent aussi permettre de développer de nouvelles interfaces accessibles faciles à implémenter. En utilisant des blocs Peltier ou des buzzers vibrants, il est ainsi possible de construire une interaction non-visuelle, adaptée pour des utilisateurs non-voyants [8].

Cette interaction non-visuelle vise à être aussi efficace que l'interaction visuelle, mais ce but peut être difficile à atteindre, car les sens humains ne sont pas équivalents en matière de vitesse de transmission et de réflexes [9]. Néanmoins, il est possible d'approcher cette efficacité en utilisant la multimodalité en tant que ligne directrice principale [10] en utilisant des stimuli audio et tactiles par exemple. Cette utilisation de multiples modalités s'est révélée efficace si elle est correctement mise en place, notamment en évitant les effets délétères tels que ceux causés par le phénomène de redondance par exemple [11]. Pour être correctement compris, chaque stimulus de chaque modalité doit encoder des informations complémentaires, et non pas des informations redondantes. De plus, la zone ciblée par ces stimuli non-visuels revêt une importance particulière. Par exemple, les stimuli tactiles ciblent souvent les bras et les mains car ces zones sont particulièrement sensibles aux vibrations et aux textures [12]. La multimodalité au sein des technologies d'assistance peut être remarquée dans le projet ReacTable [13] par exemple : un instrument de musique en forme de table, qui associe des cubes (retours tactiles) et des procédés de *sound design* (retours audio) dans un but de création musicale.

Les retours audios liés au langage sont déjà employés au sein de nombreuses technologies d'assistance. On peut par exemple mentionner les technologies centrées autour de la synthèse vocale. Un tel procédé est également utilisé dans de nombreux lecteurs d'écran pour les non-voyants, comme JAWS¹ ou NVDA². Dans le domaine de l'informatique, la synthèse vocale est utilisée pour aider les développeurs non-voyants. Par exemple Javaspak [14, 15], Emacspeak [16] et CAITLIN [18] sont des environnements de développement (IDE) qui intègrent la synthèse vocale dans leur éditeur de texte et permettent leur accessibilité pour les non-voyants.

Les retours audios utilisant des stimuli audios courts – ou earcons [19, 20] – sont souvent superposés à des stimuli visuels : les exemples sont nombreux dans les études dans le domaine

de l'audiovisuel [21]. Ces stimuli audio sont souvent basés sur les principes de consonances et dissonances, définies dans un contexte tonal et/ou psychoacoustique [22]. Par exemple, les stimuli de validation emploient des intervalles ou des harmoniques consonants, alors que les stimuli négatifs (comme les messages d'erreur par exemple) utilisent des intervalles ou des harmoniques dissonants. Le sens de la mélodie peut également être associé avec les informations correspondantes ; une mélodie ou un intervalle ascendant est souvent perçu(e) comme plus engageant(e) qu'une mélodie ou intervalle descendant [23]. Une telle logique peut être employée dans la construction d'une interaction non-visuelle efficace, en utilisant des earcons en tant que stimuli additionnels.

Enfin, les retours tactiles sont également de plus en plus utilisés dans la communauté des technologies d'assistance, notamment dans le cas de cartes et de navigateurs internet [24] rendus accessibles pour des non-voyants en utilisant des vibrations. Des stimuli tactiles comme des textures (TeslaTouch) [25] ou des messages thermiques [26] peuvent également être intégrés. L'utilisation d'une interaction haptique peut représenter une opportunité pour les non-voyants d'utiliser leurs capacités motrices, surtout si celle-ci est intégrée à un contexte éducatif.

B. Contexte éducatif

La plateforme Scratch (projet du MIT) est utilisée en tant qu'outil éducatif pour faciliter l'apprentissage de l'informatique [27] mais il est important de noter que ce n'est pas la seule : ces outils sont fréquemment dérivés de jouets mécaniques. Ces artefacts représentent alors d'excellents exemples de TUI (Tangible User Interface) intégrables en milieu scolaire. Par exemple, on peut citer le Bee-bot [28] qui est un contrôleur en forme d'abeille (associé aux logiciels "*Lady Beetle*" et "*World of Sounds*"), dont l'une des principales fonctions est d'aider les élèves à programmer des séquences musicales.

Les compétences de programmation sont également introduites dès l'école primaire, comme le montre le projet Torino [29]. Ce dernier se base sur des unités rondes que l'on connecte afin de construire des algorithmes. De par cette connectique particulière, il est possible d'affirmer que la logique utilisée par Microsoft est proche de celle utilisée au sein de Scratch et de Blockly. La logique centrée autour des blocs peut également être remarquée dans certaines TUI en utilisant des blocs semblables à ceux de LEGO et une grille associée [30] ou en utilisant des blocs pour créer et s'échapper de labyrinthes basés sur des algorithmes [31]. L'utilisation simultanée de la multimodalité (stimuli audio et tactiles) et de TUI peut être également soulignée dans toutes ces plateformes.

Il convient alors de noter que d'autres projets plus analogues à des androïdes ont également été adaptés pour des activités informatiques car les mouvements et actions haptiques sont faciles à programmer. Le Roamer, un robot en forme de tortue, est un exemple représentatif [32]. Cette approche basée sur les androïdes permet de traduire des algorithmes en actions et en stimuli tactiles. Ainsi, cette traduction ne dépend donc pas de

¹ <https://www.freedomscientific.com/products/software/jaws>

² <https://www.nvaccess.org/download>

stimuli visuels, et peut être implémentée dans la construction d'une communication non-visuelle multimodale.

Au niveau du lycée, beaucoup de technologies d'assistance se sont concentrées sur les plateformes en ligne, et particulièrement sur Blockly. Blocks4All [33] présente une IDE sensiblement "augmentée" en utilisant une tablette Android (qui émulait alors différentes textures). AccessibleBlockly [34] permet d'avoir un accès non-visuel à chacun des modules Blockly (ArduBlockly, OzoBlockly et BlocklyTalky [35]) grâce à des retours audio.

Les chercheurs se sont également penchés sur l'accessibilité de Scratch pour les utilisateurs non-voyants. Ces recherches représentent des influences majeures pour le présent projet [36], utilisant les concepts de TUI et de multimodalité, de même que l'utilisation de composants électroniques *open source* (arduino). Parmi ces influences, il convient de citer la valise Accessi-DV [37] basée sur des blocs tangibles analogues à ceux utilisés par Scratch ; ainsi que le prototype CodeBox64 [38], un contrôleur Scratch inspiré des manettes de jeu, utilisant la technologie arduino.

Ces prototypes favorisent l'accès des non-voyants à la plateforme Scratch mais nécessitent l'intervention d'une tierce personne voyante pour contrôler et exécuter les programmes. Par exemple le prototype CodeBox64 utilise la technologie arduino, nécessitant une personne dotée de compétences en soudure et en prototypage électronique afin d'être utilisée. D'un autre côté, la valise Accessi-DV ne requiert pas de soudure, mais en revanche, elle ne permet pas non plus de communiquer directement avec la plateforme Scratch. Cette communication ne peut alors se faire que par la reproduction de l'algorithme par une personne voyante, directement sur la plateforme en ligne. Enfin, si la programmation débranchée (« *unplugged coding* ») représente une solution qui peut s'avérer utile pour l'apprentissage de l'informatique, celle-ci reste limitée par l'impossibilité d'accéder aux ressources numériques en ligne.

Notre projet s'inspire énormément de ces prototypes et l'un des principaux objectifs de notre travail vis-à-vis de ces technologies est de surmonter les obstacles sus cités liés à l'autonomie. Cette amélioration de l'autonomie se base sur la construction d'une communication non-visuelle efficace, un autre objectif majeur de ce projet.

Grâce à cet état de l'art, il a été possible de souligner quelques caractéristiques-clés qui ont favorisé la création de solutions viables afin de rendre accessibles les notions d'informatique aux collégiens (voyants et non-voyants). Ces caractéristiques incluent l'utilisation d'une interaction non-visuelle, basée sur des stimuli multimodaux (stimuli audio et tactiles). Cette communication est rendue possible en implémentant de la technologie libre, peu coûteuse et accessible pour les communautés associées aux contextes éducatifs (étudiants, chercheurs, enseignants). D'autres caractéristiques incluent également l'intégration en milieu scolaire (en utilisant des TUI en forme de jouets), et la nécessité d'une solution

autonome. Ces éléments-clés représentent des lignes directrices fortes pour la solution implémentée par le projet TaBGO

III. LE PROTOTYPE TABGO

Le prototype TaBGO (Tangible Blocks Go Online)³ comporte trois grandes parties (voir Figure 1) : des blocs Scratch tangibles (inspirés par la plateforme Scratch online et le projet Accessi-DV), une webcam et un logiciel associé.

Ces trois parties interagissent entre elles comme montré dans la figure 2 ci-dessous :

- L'utilisateur construit des algorithmes en connectant les blocs ;
- Les blocs sont ensuite reconnus via une webcam et notre solution traduit l'algorithme tangible en fichier .sb3 (extension de Scratch),
- Le fichier est généré automatiquement et exploité pour effectuer l'exécution multimodale de l'algorithme.

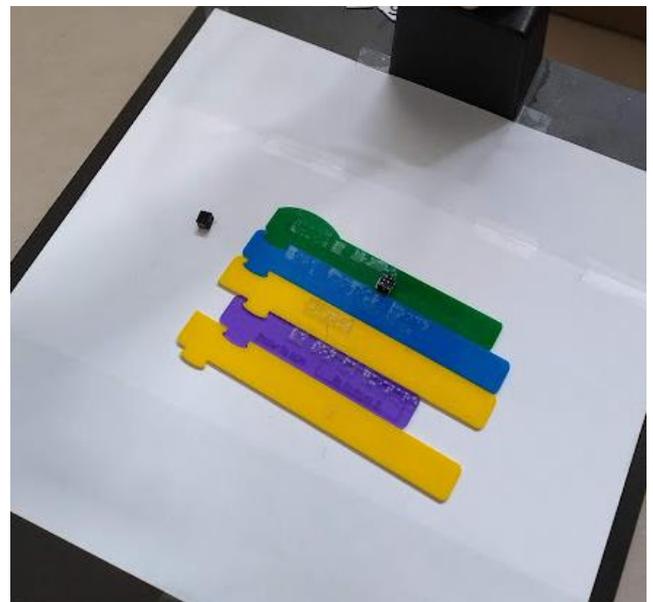


Fig. 1. : Vue générale du prototype physique TaBGO.

Le prototype TaBGO peut être détaillé en se concentrant sur trois de ses aspects fondamentaux : les composants tangibles (hardware), les composants logiciels (software) et l'équipement additionnel inclus.

A. Partie matérielle

Le premier aspect fondamental du prototype TaBGO dont il est question dans cet article est en lien avec les composants tangibles.

Le prototype actuel est composé de blocs tangibles en plexiglas, ayant une hauteur de 3,5 mm pour une longueur de 28,5 mm et une largeur de 7,5 mm de large. Ces dimensions ont été spécialement choisies afin de rendre les blocs faciles à agripper tout en restant suffisamment solides pour être maniés

³ Le code de notre prototype est accessible ici : <https://github.com/truillet/tabgo>

par des collégiens. Les blocs partagent les fonctions et les couleurs de leurs équivalents sur la plateforme Scratch. Les blocs peuvent être connectés grâce à leur forme rappelant celle des puzzles. Ce système de connexion vise à reproduire la syntaxe et les fonctionnalités utilisées dans la plateforme Scratch. Dans le cas de boucles conditionnelles ou booléennes, une cordelette est intégrée aux blocs afin de permettre un assemblage facile de ceux-ci, ainsi qu'une compréhension aisée des notions liées.

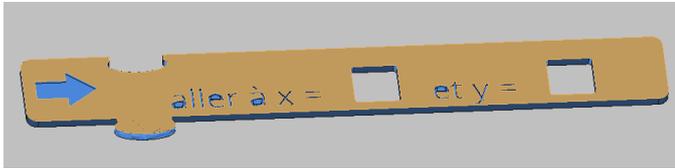


Fig. 2. exemple de modélisation 3D d'un bloc utilisé par TaBGO

Chaque bloc possède des inscriptions braille sur son recto, une traduction des fonctions permises par les blocs. Ces marques en braille représentent un premier pas vers une communication non-visuelle. De plus, certains blocs disposent de trous (cf. Figure 2) afin d'intégrer des cubarithmes (dés en braille) en leur sein. Ceux-ci peuvent être configurés afin d'afficher une valeur et associer celle-ci aux blocs. Grâce à ces améliorations, ces blocs peuvent facilement être lus et maniés par les non-voyants.

Dans le langage Scratch, le code couleur est directement lié aux catégories des blocs (opérateurs, musique, synthèse vocale, etc.). Celui-ci a été pris en compte lors de la construction des blocs tangibles. Cependant, ce code couleur repose sur des stimuli visuels inaccessibles pour les non-voyants. Afin de pallier ce problème, des gravures ont été utilisées afin d'associer chaque catégorie de blocs (et donc chaque fonction) à des stimuli tactiles. De plus, les blocs sont contenus dans une valise à six compartiments. La valise souligne les différentes catégories, et aide les utilisateurs (voyants ou non-voyants) à être plus organisés et efficaces dans la construction d'algorithmes.

Étant donné que les retours utilisateur tiennent une place importante dans la communication non-visuelle suggérée, il est important de souligner le parti pris du projet de se concentrer sur les extensions Scratch. Ces catégories additionnelles de blocs comprennent les extensions Scratch Music et Scratch Text-to-Speech (TTS, synthèse vocale), et permettent d'utiliser des retours audios pour les collégiens, qu'ils soient voyants ou non-voyants. De plus, le projet utilise également l'extension *micro:bit*⁴, qui se base sur une carte électronique à bas coût qui permet d'implémenter des retours haptiques. Toutes ces extensions permettent au projet d'implémenter simplement et rapidement des stimuli multimodaux, afin de construire une communication non-visuelle efficace.

B. Partie logicielle

En plus de ces composants physiques, notre solution comprend également un composant logiciel dont les fonctions principales comprennent l'analyse des photographies prises par la webcam et la traduction de cette analyse en un fichier *.sb3* (voir Figure 3)

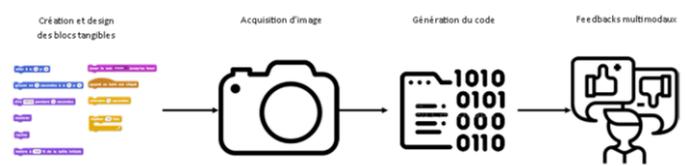


Fig. 3. Schéma résumant le processus de reconnaissance de TaBGO

Ce processus d'analyse détecte la fonction et la configuration de chaque bloc, du texte en braille et des cubarithmes. Ces analyses permettent une détection précise des algorithmes construits, et permettent donc une traduction robuste vers un fichier *.sb3*.

Le processus de traduction est la deuxième partie de l'aspect logiciel du prototype. Celle-ci représente un moyen efficace pour les utilisateurs non-voyants de bénéficier de Scratch de manière totalement autonome. Un fichier *.sb3* (extension de Scratch, résultat du processus TaBGO) peut facilement être ouvert dans la plateforme Scratch afin que l'utilisateur exécute son algorithme autant de fois qu'il/elle le souhaite. L'accès facile aux extensions non-visuelles permet à l'utilisateur de comprendre plus aisément si l'algorithme qu'il/elle construit est conforme à ce qui est attendu (vis-à-vis de l'activité organisée). L'installation d'une boucle de feedback efficace est particulièrement utile dans un contexte éducatif, étant donné que cette boucle conforte l'apprenant dans une méthode d'essai/erreur, et lui permet ainsi de devenir de plus en plus familier avec les notions et les syntaxes de programmation utilisées.

Ces boucles de retours nécessitent d'être rapides afin d'être efficaces, mais ne sont volontairement pas intégrées dans un processus en temps réel au sein du prototype. En effet, cet usage présente de nombreux désavantages, comparé aux possibilités qu'elle permet. Tout d'abord, l'utilisation du temps réel est généralement gourmande en ce qui concerne les ressources disponibles, et donc nécessite un ordinateur suffisamment puissant pour pouvoir en bénéficier. Étant donné que les classes françaises n'ont pas toutes des ordinateurs récents et/ou puissants, l'utilisation du temps réel peut ne pas être adaptée. De plus, ces ressources technologiques ne sont pas nécessairement accessibles pour tous les élèves, et peuvent ainsi représenter un frein au niveau de l'accessibilité, ce qui est antithétique à l'objectif du projet TaBGO. Ensuite, l'utilisation du temps réel peut s'avérer inadaptée pour les utilisateurs néophytes de Scratch (qu'il s'agisse de la version tangible ou en ligne) car celle-ci peut perturber l'utilisateur par excès d'information. Cet excès d'information contribuerait alors à augmenter la charge cognitive expérimentée [40, 41], et serait à même de rendre l'approche Scratch plus difficile à comprendre et à intégrer pour des collégiens. Ainsi, et bien que l'utilisation du temps réel puisse être intéressante, celle-ci doit être correctement implémentée afin d'être facilement appréhendée, surtout si elle s'ajoute à l'utilisation de la multimodalité. Enfin, l'utilisation du temps réel peut présenter des problèmes de compatibilité quand

⁴ <https://microbit.org>

il est question d'utiliser des équipements additionnels, tels que les lecteurs d'écran ou les cartes micro:bit.

C. Fonctionnalités additionnelles

L'implémentation de fonctions additionnelles représente le troisième aspect du prototype TaBGO. Afin de construire une interaction non-visuelle efficace, le présent article a déjà souligné l'importance des stimuli multimodaux et des boucles de retours associées. Pour permettre l'implémentation de stimuli audio et tactiles, les extensions Scratch sur lesquelles le projet se concentre comprennent Scratch Music, Scratch Text-to-Speech et micro:bit. Ces retours permettraient d'employer de nouvelles modalités d'accès en ce qui concerne l'approche Scratch de l'informatique, et ce indépendamment du fait que l'utilisateur soit voyant ou non-voyant.

Ces retours multimodaux peuvent être particulièrement utiles dans le cas de l'avatar Scratch représenté par un dessin de chat. Cet avatar ne permet pas sa manipulation par les non-voyants. Néanmoins, les épreuves du Diplôme National des Collèges incluent souvent un trajet à faire effectuer par l'avatar ou une figure géométrique à dessiner : l'accès à la fenêtre de l'avatar est donc particulièrement primordial dans ce cadre.

En effet, une solution possible serait de faire ressentir aux utilisateurs une sensation d'espace audio sans utiliser de stimuli visuels. Les stimuli audios et leur spatialisation peuvent alors s'avérer riches de possibilités. Avec l'utilisation de la stéréophonie, il est déjà possible de donner une direction (gauche-droite) aux stimuli audios afin de recréer cette sensation d'espace. Par exemple en utilisant une paire d'écouteurs, un mouvement de l'avatar Scratch vers la droite peut être associé à un bip sonore à droite de sorte à ce qu'un non-voyant puisse percevoir ce mouvement. Il est également possible de recréer une sensation de profondeur (distance de la source par rapport à l'auditeur) en utilisant des procédés de réverbération. En utilisant une réverbération numérique, les stimuli audios ont la possibilité de se déployer sur deux axes (gauche/droite, devant/derrrière), qui peuvent être associés aux axes horizontaux et verticaux de l'avatar. Afin d'augmenter cette sensation d'espace sonore perçu, nous avons pris le parti d'utiliser des procédés binauraux : ces procédés s'appuient sur des théories et des effets psycho-acoustiques afin de recréer la sensation d'un son 3D avec seulement une paire d'écouteurs.

Cette approche binaurale peut donc représenter un moyen facile et accessible de préciser la communication audio utilisée. Avec les éléments-clés cités plus haut en tant que lignes directrices, un logiciel de spatialisation audio a été développé en utilisant Max/MSP qui permet d'ajouter de la profondeur, une direction et une localisation aux stimuli audios utilisés au sein de la plateforme Scratch. Il est important de préciser que le logiciel de spatialisation intervient en sortie de chaîne audio et non pas pendant l'analyse, pour les raisons de vitesse et d'efficacité mentionnées plus haut. Grâce à ce placement dans la chaîne, les problèmes éventuels de compatibilité avec Scratch sont évités : l'outil de spatialisation s'interface directement avec le périphérique de sortie sans utiliser la plateforme Scratch.

Grâce à diverses commandes intégrées dans l'interface utilisateur, les créateurs d'activités basées sur Scratch ont la possibilité de prévoir des parcours sonores à réaliser par les élèves via la plateforme en ligne. Vis-à-vis du prototype TaBGO, il est alors possible d'associer des commandes de spatialisation aux blocs détectés, de sorte à ce que le parcours soit entièrement traduit en même temps que l'algorithme. Simultanément à la traduction de l'algorithme tangible en fichier .sb3, des instructions de spatialisation sont produites, qui contrôlent le logiciel de spatialisation via un bus logiciel. Ce logiciel de spatialisation représente donc un moyen facile pour les enseignants et éducateurs de programmer des retours audios adaptés : il est alors possible pour eux de construire des activités Scratch se basant sur l'avatar tout en restant accessible pour les non-voyants.

En résumé, notre solution, avec ses nombreux composants, vise à une approche alternative non-visuelle à la plateforme Scratch en proposant une communication multimodale et en utilisant des outils intégrables en contexte éducatif.

CONCLUSION

En s'appuyant sur des recherches connexes antérieures dans le milieu des technologies d'assistance, le projet TaBGO propose une solution d'accessibilité de Scratch en trois parties : des blocs tangibles pour construire les algorithmes, une webcam pour identifier les blocs et un logiciel de traitement associé pour produire un fichier scratch.

Étant donné que le principal objectif est la construction d'une interaction non-visuelle efficace, le projet a mis l'accent sur les stimuli audios et tactiles, en intégrant notamment des technologies telles que la spatialisation audio pour représenter les déplacements dans l'espace.

Tout au long de cet article, le projet a souligné l'utilisation de stimuli multimodaux en utilisant de la technologie open source et des TUI.

La phase expérimentale est en cours et a pris beaucoup de retard dû à la pandémie de COVID. Des pré-tests et les tests en milieu scolaire ont été réalisés, et ont révélé des résultats encourageants et des retours utiles à propos du prototype et du protocole expérimental à mettre en œuvre.

Il est néanmoins important de souligner les possibilités qui sont encore à explorer en ce qui concerne la construction de communications non-visuelles efficaces : relecture rapide des algorithmes produits par exemple et l'utilisation en complète autonomie de notre prototype de la conception à l'exécution et modification des programmes.

REMERCIEMENTS

Le présent projet et les recherches associées sont soutenus par l'association française UNADEV (Financement UNADEV 2019.49).

REFERENCES

- [1] Das, M., Marghitu, D., Jamshidi, F., Mandala M. and Howard A. (2020). Accessible Computer Science for K-12 Students with Hearing Impairments. 10.1007/978-3-030-49108-6_13.
- [2] Flammant, J. (2016). De l'oeil au Regard [Monographie, CSEMSH].
- [3] Hatwell, Y, Le développement perceptivo-moteur de l'enfant aveugle, *Enfance* 2003/1, Vol. 55, pages 88 à 94, Paris, 2003.
- [4] Metelja O., Thieme A., Brûlé, E., Benett C., Serrano M., Jouffrais Ch., Toward classroom experiences inclusive of students with disabilities, vol XXVI.1, ACM Interactions, january-february 2019.
- [5] Truillet Ph., « L'informatique, pour un monde plus accessible ». *Revue* 1024, Dossier Accessibilité informatique, 2020, numero 15, Article 7, pp. 45-57. (hal-03116648)
- [6] Senjam S., Assistive technology for students with visual disability: Classification matters, *Kerala Journal of Ophthalmology*, 2019, Bombay, India.
- [7] Archambault, D., Interaction et usages des modalités non visuelles, accessibilité des contenus complexes, (Thèse) Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris 2010.
- [8] Andriamahery Ranjalaly K. H., La PACMAM : une approche multimodale accessible des supports de composition musicale, *Journal de Recherche en Education Musicale* vol.12 n°2-2021, Février 2022.
- [9] Dale E. 1969. Cone of experience, in *Educational Media: Theory into Practice*. Wiman RV (ed). Charles Merrill: Columbus, Ohio
- [10] Adami, E., "Multimodality", as published in O. Garcia, N. Flores and M. Spotti (2016) *Oxford Handbook of Language and Society*. Oxford: Oxford University Press
- [11] Le Bohec, O. & Jamet, É. (2005). Les effets de redondance dans l'apprentissage à partir de documents multimédia [1]. *Le travail humain*, 68, 97-124. <https://doi.org/10.3917/th.682.0097>
- [12] Hoffmann, R., Valgeirsdottir, V. V., Johannesson, O. I., Unnthorsson, R., & Kristjansson, A. (2018). Measuring relative vibrotactile spatial acuity: Effects of tactor type, anchor points and tactile anisotropy. *Experimental Brain Research*, 236, 3405-3416. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5387-z>
- [13] Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M., & Kaltenbrunner, M. (2007). The reacTable : Exploring the Synergy between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces.
- [14] Cheong, C.; Andrew Burge (ed.), Coding without sight: Teaching object-oriented java programming to a blind student », 8th Annual Hawaii International Conference on Education, Honolulu, Hawaii, 7-10 January 2010, pp. 1-12.
- [15] Francioni, J. M., Matzek, S. D. & Smith, A. C., A Java Programming Tool for Students, with Visual Disabilities, ASSETS '00, November 2000, Arlington, Virginie, USA.
- [16] Raman, T.V., Michael J. Tauber (Ed.) « Emacspeak—A speech interface » *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'96)*, p.66-71, ACM, New York, USA.
- [17] Vickers, P. , Alty, J. "Musical Program Auralisation: A Structured Approach to Motif Design", *Interacting with computers*, n°14, p.457-485, october 2002, USA
- [18] Owen Ch. B., Teaching Modern Object-Oriented Programming to the Blind: An Instructor and Student Experience, Michigan State University; Sarah Coburn, Michigan State University, Ms. Jordyn Castor
- [19] Collins, Karen, *Game Sound*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis, 2008
- [20] Lequai, Cl., Muse #5 « Industries Culturelles Et Créatives : Musiques & Jeux Vidéo », conférence de 2018, Toulouse, France.
- [21] Johannesson, G., Auditory Icons vs Earcons in Games: What Makes the Most Efficient Nonverbal Sound Cue? 2016, Lulea
- [22] Terhardt, E. "The Concept of Musical Consonance: A Link between Music and Psychoacoustics" *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, Vol. 1, No. 3, Dedicated to Helmholtz, Printemps 1984, pp. 276-295, University of California Press, Californie, Etats-Unis
- [23] Meredith, D., "Statistical Regularities in Melodic Phrases: Effects on Aesthetic Ratings" (2018). CUNY Academic Works., https://academicworks.cuny.edu/gc_etds/2445
- [24] Bigham, J. P., Kane, S. K. "Tracking @stemxcomet: Teaching Programming to Blind Students via 3D Printing, Crisis Management, and Twitter", SIGCSE '14, Mars 2014, Atlanta, Etats-Unis.
- [25] Bau, O., Israr, A., Poupyrev, I., Harrison, C. (2010). Teslatouch : Electro vibration for Touch Surfaces. *UIST'10*. <https://doi.org/10.1145/1866029.1866074>
- [26] Sato, K., & Maeno, T. (2012). Presentation of Sudden Temperature Change Using Spatially Divided Warm and Cool Stimuli (p. 468). https://doi.org/10.1007/978-3-642-31401-8_41
- [27] Maloney, J., Resnick, M., Rusk, N., Silverman, B. and Eastmond, E. (2010). The Scratch Programming Language and Environment. *ACM Transactions on Computing Education (TOCE)*. 10. 16. 10.1145/1868358.1868363.
- [28] Jaskova, L., Kaliakova, M., Programming Microworlds for Visually Impaired Pupils, Conférence de Constructionism 2014, 2014, Vienne, Autriche.
- [29] Morrison, C., Villar, N., Hadwen-Bennett, A., Regan, T., Cletheroe, D., Thieme, A. & Sentance, S.. (2019). Physical Programming for Blind and Low Vision Children at Scale. *Human-Computer Interaction*. 1-35. 10.1080/07370024.2019.1621175.
- [30] Utreras, E., Pontelli, E.. (2020). Design of a Tangible Programming Tool for Students with Visual Impairments and Low Vision. 10.1007/978-3-030-49108-6_22.
- [31] Wang, D, Zhang, Ch, Wang, H.. (2011). T-Maze: A tangible programming tool for children. 127-135. 10.1145/1999030.1999045.
- [32] Renaud P., Virey M., Le Roamer: un robot déjà ancien au service d'apprentissages bien actuels, dans la nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation (N°52), pp 231-239, INSHEA, 2010
- [33] Ladner, R. E., Milne, L. R., Blocks4All: Overcoming Accessibility Barriers to Blocks Programming for Children with Visual Impairments, CHI 2018, Avril 2018, Montréal Canada
- [34] Ludi S., Merchant W.; Simpson, J., Exploration of the Use of Auditory Cues in Code Comprehension and Navigation for Individuals with Visual Impairments in a Visual Programming Environment, ASSETS'16, 23-26 October 2016, Reno, Nevada, USA
- [35] Deitrick, E.; Sanford, J., Shapiro, B. R., BlockyTalky: A Low-Cost, Extensible, Open Source, Programmable, Networked Toolkit for Tangible Creation, IDC2014, 17-20 juin 2014, Aarhus, Danemark
- [36] Andriamahery-Ranjalaly K, Berquez L., Jessel N., Truillet Ph., TaBGO: towards accessible computer science in secondary school. 23rd International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2021), Jul 2021, virtual place, United States, pp. 12-24. (hal-03168307)
- [37] Boissel S., Mallette Accessi DV Scratch « Scratch débranché en braille et gros caractères », dans la nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation (N°77), pp 183-192, INSHEA, 2017
- [38] Wagner A., Wang Z., Evaluating a Tactile Approach to Programming Scratch, ACMSE 2019, Avril 2019, Kennesaw, USA
- [39] Metin, S. (2020). Activity-based unplugged coding during the preschool period. *International Journal of Technology and Design Education*. 10.1007/s10798-020-09616-8.
- [40] Puma, S., Matton, N., Paubel, PV. et al. Cognitive Load Theory and Time Considerations: Using the Time-Based Resource Sharing Model. *Educ Psychol Rev* 30, 1199–1214 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10648-018-9438-6>
- [41] Sweller J. et al., Cognitive Load Theory, Explorations in the Learning Sciences, *Instructional Systems and Performance Technologies* 1, DOI 10.1007/978-1-4419-8126-4_6, © Springer Science+Business Media, LLC 2011

Assistant en accessibilité, rendre accessible une activité d'analyse d'article

GÉRARD UZAN
CHArt EA4004
Université Paris 8,
Saint-Denis, France
gerard.uzan@univ-paris8.fr

ALEXIS CULPIN
Licence Frontières du Vivant,
Université Paris Cité,
Paris, France

ESTELLE DUPRÉ
Licence Frontières du Vivant,
Université Paris Cité,
Paris, France

JULIETTE GAETAN
UMR 7590
UPMC/CNRS/IRD/MNHN
PARIS, FRANCE

ANTOINE TALY
Laboratoire de Biochimie Théorique,
CNRS, Université Paris Cité,
Paris, France
taly@ibpc.fr

Résumé—Le point de départ de cet article est une activité de description de figures qui trouve sa place dans un objectif plus global d'enseigner la lecture d'articles scientifiques à des étudiants. Nous décrivons une adaptation de l'activité menée pour un étudiant en situation de handicap (cécité totale). Notre projet visait donc à 1) aider l'étudiant en situation de handicap à améliorer son expérience d'apprentissage et son assistante en accessibilité, à mieux l'accompagner, 2) documenter notre parcours pour partager les progrès réalisés grâce à cette opportunité, 3) proposer une activité utile pour tous. Nous présenterons d'abord la place des figures dans la lecture d'un article; Nous analyserons ensuite des stratégies de description des figures utilisées par l'assistante en accessibilité et relaterons les interactions sous forme de dialogue avec l'étudiant-chercheur; Nous proposerons ainsi une activité qui formalise le dialogue; Nous présenterons enfin une évaluation du dispositif.

Mots Clefs—Accessibilité, Assistant, Article, Figure, Littérature visuelle

I. INTRODUCTION

A. Contexte

La littérature informationnelle est une compétence importante pour les étudiants, et pour les étudiants en biochimie elle inclut une composante significative de littérature visuelle [1]. Ces éléments font donc partie des objectifs pédagogiques du cours de biologie, au premier semestre de la deuxième année de la licence Frontières du vivant. Pour atteindre ces objectifs une activité de description de figures est réalisée. En effet, un article étant un document composé d'items dont certains sont textuels et d'autres des figures [2], les étudiants doivent apprendre à tirer les informations de ces deux sources. Les articles analysés sont en lien direct avec les chapitres étudiés et sont issus de journaux généralistes: *Science* (trois articles tirés du site 'science in the classroom'), *P.N.A.S.* (deux articles) et *P.L.O.S.* (un article).

Nous décrivons une adaptation de l'activité menée pour un étudiant étant en situation de handicap (aveugle). Notre

intention pédagogique est d'entrer dans une démarche inclusive cohérente avec l'objectif didactique initial. Nous avons donc regroupé une équipe constituée des enseignants (AT et JG), l'étudiant en situation de handicap (AC), l'étudiante qui l'assiste en termes d'accessibilité (ED) et un spécialiste des questions de handicap et d'accessibilité (GU).

Notre projet visait à 1) aider l'étudiant en situation de handicap à améliorer son expérience d'apprentissage et son assistante en accessibilité, à mieux l'accompagner, 2) documenter notre démarche, 3) proposer une activité utile pour tous les étudiants.

B. Démarche de conception et recherche

Nous avons adopté la démarche THEDRE qui permet de structurer le travail de conception mais aussi de recherche sur des systèmes d'information [3]. Dans notre cas, les acteurs internes sont AT, JG et GU et ils sont responsables de la recherche (AT, JG et GU), du développement (AT) et de la méthodologie (GU). Les étudiants, pleinement associés à la démarche, endossent le rôle d'"utilisateurs" de la méthode.

Une des propriétés de la méthode THEDRE est de structurer un travail par cycles successifs, chaque cycle étant constitué de quatre étapes: planification, expérimentation, contrôle et décision. La décision consiste soit à communiquer les résultats soit à initier un nouveau cycle permettant d'améliorer le protocole de recherche, depuis la question jusqu'au dispositif technique. Dans notre cas il y a deux cycles réalisés sur deux années, avec deux promotions différentes:

- Au cours de la première année le dispositif utilisé les années antérieures a été adapté pour AC. Au cours des premières semaines plusieurs entretiens ont été organisés avec AC et ED pour identifier les difficultés rencontrées et adapter le dispositif. Une première analyse est également réalisée après le semestre [4].
- L'année suivante une expérience est mise en place avec la promotion suivante. Une nouvelle version des

documents fournis aux étudiants est réalisée pour permettre les observations.

Le plan de l'article est le suivant:

- L'étape de planification se base sur l'état de l'art, qui sera présenté dans la section II qui traite de la place des figures dans la lecture d'un article.
- Les observations initiales réalisées au début du semestre, au cours d'entretiens avec ED et AC, sont présentées dans la section III qui analyse les stratégies de description des figures.
- L'activité proposée suite à ces observations est détaillée dans la section IV.
- L'évaluation initiale de la démarche est présentée dans la section V.
- Une expérimentation réalisée l'année suivante est présentée dans la section VI.

C. Forme du document

Le présent document est rendu accessible par le choix de remplacer les figures par une description sous forme de texte, aussi proche que possible de celle que pourrait faire un assistant en accessibilité. Nous faisons le pari qu'en plus de faciliter le travail de notre équipe et la lecture pour les personnes en situation de handicap avec une cécité partielle ou totale, cela permettra aux autres lecteurs d'avoir un aperçu de la difficulté liée à un empêchement d'accès aux figures. Par souci de clarté dans le reste du document les étudiant seront désignés en fonction de leur rôle: l'étudiant en situation de handicap sera désigné « chercheur », et l'étudiante qui est son assistante en accessibilité « assistante ».

II. LA PLACE DES FIGURES DANS LA LECTURE D'UN ARTICLE

L'analyse de la façon dont chacun des agents, chercheur et assistante, intervient peut-être formalisée via une approche ergonomique. Nous considérons ici la notion de compatibilité de la tâche, c'est-à-dire d'accord des caractéristiques des tâches avec celles des utilisateurs [5]. Dans notre cas, a priori toutes les étapes conceptuelles sont accessibles par le chercheur, seule l'étape visuelle lui étant inaccessible. Un aspect à déterminer est celui de l'étendu de la contribution de l'assistante vis-à-vis des autres étapes. Nous discuterons également de la notion d'utilisabilité [6], en particulier la possibilité pour le lecteur de trouver l'information pertinente.

A. Connaissances présentées dans un article scientifique

Les principales informations que l'on peut trouver dans un article sont liées à la démarche scientifique elle-même: Objectif, Hypothèses, Design et Résultats [7]. Ces éléments sont déjà présents dans le résumé de l'article et peuvent donc être anticipés [8]. Dans le corps de l'article les informations peuvent être présentées via des expressions formelles (texte) et des diagrammes (figures) [9]. Pour la conception de notre dispositif, nous nous concentrons sur l'articulation entre les

informations présentes dans le texte, accessible, et les figures, pour lesquelles une mise en accessibilité est nécessaire. Nous nous concentrons en particulier sur l'utilisation des figures pour représenter les résultats.

B. Visualisation des connaissances scientifiques

Nous utilisons l'ontologie proposée pour la visualisation des connaissances scientifiques [9]. Cette formalisation est basée sur quatre étapes: 1) les connaissances à visualiser, 2) le modèle abstrait de ces connaissances, 3) le modèle visuel abstrait, 4) la visualisation. Nous notons que trois étapes apparaissent dans l'article sous forme de texte, et sont donc accessibles, alors que la dernière est inaccessible. Le rôle de l'assistante sera de partager cette étape visuelle, mais la description de la figure implique de travailler sur la présence implicite des autres étapes. C'est pour cette raison que le protocole proposé dans ce document vise à favoriser le dialogue entre le chercheur et son assistante et à le rendre aussi explicite que possible.

III. ANALYSE DES STRATÉGIES DE DESCRIPTION DES FIGURES

A. Profil de l'assistante en accessibilité

L'assistante en accessibilité est une étudiante de la même promotion que l'étudiant en situation de handicap. Elle a donc toutes les compétences scientifiques requises pour le travail demandé. Il est probable que cet aspect soit important pour les étapes non visuelles présentées en section II.

Il est notable que c'est un profil différent de celui des accompagnants d'élèves en situation de handicap (AESH) auquel AC a été confronté dans le secondaire. En effet, les AESH sont souvent peu qualifiés [10]. Par ailleurs, il n'y a pas dans notre cas de tension entre enseignants et AESH comme cela a été observé dans le secondaire [11]. Enfin le rôle de ED est strictement tourné vers les apprentissages dans une logique d'accessibilité et pas vers les missions de compensation qui peuvent aussi être assignées aux AESH [12].

B. Description de la stratégie de l'assistante en accessibilité

La stratégie que nous avons pu identifier s'appuie sur plusieurs étapes:

- Tout d'abord, elle donne le titre des figures, ce qui aide à avoir une idée du contenu.
- Ensuite, si la figure est composée de plusieurs parties, elle l'indique et décrit rapidement chaque partie: par exemple la première partie est un graphique, la deuxième un dessin. Elle donne ainsi une idée de ce à quoi ressemble la figure.
- Ensuite, elle détaille chaque partie, en essayant de trouver une analogie si besoin.
- Elle ajoute l'indication donnée par les légendes, et commence l'interprétation.

On remarque que cette stratégie de description est de type constructive, c'est-à-dire qu'elle permet une reconstruction

mentale de la figure [13]. C'est une stratégie qui a déjà été décrite comme efficace par une chercheuse en chimie computationnelle [14]. Par ailleurs, cette stratégie permet au chercheur de poser des questions [15].

On note aussi l'utilisation d'analogies lorsqu'il ne s'agit pas d'une forme bien connue. En effet, la description des formes basiques peut être réalisée en utilisant des références en géométrie simple, mais certaines caractéristiques, comme la présence de formes non closes, rendent très vite l'exercice difficile à réaliser voire impossible justifiant l'utilisation d'analogies [16].

B. Dialogue entre le chercheur et l'assistante et mise en place d'un langage opératif

La structure de l'activité proposée (section IV) est conçue pour forcer un dialogue pas à pas entre chercheur et assistante. L'objectif est la mise en place d'un langage opératif [17]. En effet, comme nous l'avons déjà noté, la visualisation des connaissances scientifiques est basée sur quatre étapes dont seule la dernière est visuelle, mais le rôle de l'assistante nécessite de prendre en compte la totalité du processus. Un point important dans notre cas est que l'assistante possède des compétences scientifiques. Elle peut donc répondre aux questions [15]. Il se crée ainsi un dialogue entre deux scientifiques.

Il est notable que les compétences scientifiques de l'assistante permettent un accompagnement plus efficace [18]. On observe ainsi une différence avec le travail réalisé par une AESH, sans bagage scientifique, au lycée.

C. Stratégie et intentionnalité de communication

Un point important dans cette activité est d'aborder la question de l'intentionnalité de communication de celui qui décrit la figure. Deux niveaux de description peuvent ainsi être comparés: un niveau descriptif et fidèle et un niveau qui va plus directement à l'information essentielle par analogie avec les images cognitives et les images opératives introduites par Ochanine [19]. Il nous a semblé intéressant de faire travailler les étudiants sur ces deux niveaux, de manière successive. Ainsi la partie D amène une description opérative alors que la partie F amène elle une description détaillée.

Il nous semble intéressant de connaître ces deux modes de communication pour les deux étudiants:

- Pour le chercheur, ces deux types de description permettent d'accéder à des informations différentes. La description opérative permet d'avoir une perception globale de la figure, voire de l'intention de communication de l'auteur. La description détaillée peut lui permettre d'accéder aux détails des expériences et, via un dialogue avec l'assistante, à l'intentionnalité de cette dernière.
- Pour l'assistante, cela permet de décomposer de manière explicite la source des informations, texte et/ou figure.

De plus, le chercheur est confronté à deux interprétations, celle de l'auteur (texte) et celle de l'assistante (description de l'image). Dans notre cas, le chercheur analyse l'intentionnalité de manière consciente, pour se faire une opinion/trouver les points à creuser. Par exemple, le titre d'une figure donne des informations sur ce qui est pertinent, mais ne permet pas de savoir si on est en accord avec l'interprétation de l'auteur. Les questions posées à l'assistante auront alors pour but d'interroger cette interprétation.

Il est probable que le profil scientifique de l'assistante influe sur le choix des informations présentées. Ainsi, il est possible d'utiliser les informations présentes dans la légende d'une figure, mais on est rapidement confronté au trop plein d'informations. L'assistante est donc amenée à filtrer les informations pour permettre au chercheur d'interroger l'interprétation des données, par exemple, changement de niveaux graphique, sémantique ou conceptuel, recours à l'analogie ou la métaphore, ou encore focus sur un ou plusieurs éléments figurés ou interprétatifs. Ce choix est en partie fait via un dialogue avec le chercheur, en lui demandant de confirmer que certaines informations sont non essentielles. L'assistante note par ailleurs que cette étape est compliquée dès lors que la figure est plus difficile d'accès pour elle, par exemple dans le cas d'une représentation atypique.

IV. L'ACTIVITÉ PROPOSÉE

L'activité est une analyse d'article centrée sur le décryptage des figures et est réalisée avec deux protagonistes:

- Un qui prend le rôle d'assistant et décrit les figures. Dans ce rôle, l'étudiant doit pouvoir faire une description précise mais aussi réaliser une description opérative;
- Un qui prend le rôle de récepteur de l'information, qu'il soit lui-même en situation de handicap ou pas. Dans ce rôle, l'étudiant doit pouvoir guider la lecture, notamment en précisant ses intentions et donc les informations sur lesquelles son partenaire devra insister.

A. Mise en place

Un article peut être fourni aux étudiants en deux versions:

- Pour l'assistant, une version sans résumé, ce qui a pour but de renforcer le rôle du chercheur.
- Pour le chercheur, une version sans figure, ce qui permet aux étudiants qui ne sont pas en situation de handicap d'avoir une situation approuvante.

Pour l'étudiant en situation de handicap, il est nécessaire de fournir le document en avance. En effet, la prise de connaissance du texte en amont peut faciliter la démarche d'accessibilité [15], parce que, parmi les difficultés que doit surmonter un chercheur en situation de handicap visuel, on trouve la nécessité d'opérer une lecture linéaire du texte [14].

B. Détail des questions

Une série de questions est également proposée pour structurer le travail. Les documents proposés aux étudiants sont ici fournis directement dans le texte, mais existent sous forme de figure en ligne [20].

- Partie A (chercheur)
La consigne est: Que peut-on attendre des figures ? Sur la base du résumé, choisissez les trois principaux résultats que vous attendez des figures.
- Partie B (assistante d'accessibilité) - Choix des figures?
La consigne est: Sur la base des résultats attendus par le chercheur, proposez des figures qui répondent aux attentes.
- Partie C (chercheur) - En fonction des résultats attendus, anticipez le contenu de chaque figure.
La consigne est: Pour chaque figure répondez aux questions: Quel est l'objectif ? Quel est le principe/la méthode de l'expérience ?
- Partie D (assistante d'accessibilité) - Décrivez chaque figure.
La consigne est: Pour chaque figure: décrivez la figure. Décrivez brièvement les résultats. Quelle est la conclusion ?
Ici on demande une description synthétique de chacune des trois figures.
- Partie E (chercheur)- Parmi les figures décrites, choisissez celle pour laquelle vous avez besoin de tous les détails
La consigne est alors: Expliquez pourquoi cette figure nécessite plus de détails
- Partie F (assistante d'accessibilité)- Décrivez la figure.
La consigne est alors: Décrivez en détail la figure choisie.
Cette description va donc être différente de la description synthétique précédente, ici tous les détails devront être transmis.

C. Memento proposé à l'assistant en accessibilité

Pour aider à décrire les figures nous proposons de fournir aux étudiants une carte mentale qui regroupe tous les types de figures. Les 28 catégories identifiées par Jobin [21] semblaient être un bon point de départ. L'idée a ensuite été d'identifier les catégories pertinentes. Une catégorie assez évidente était celle des photographies [22], qui contient des images naturelles, des images médicales et des objets en 3D. Ensuite, les autres types de figures ont été regroupés par type de représentation des données :

- Graphiques en 2D (nuage de points, graphique linéaire, histogramme, diagramme polaire),
- Graphiques 3D (carte thermique, graphique de surface, graphique vectoriel, graphique de contour, graphique à bulles),
- Les données montrant la relation entre les données (diagramme de Venn, matrice de confusion, diagramme en arbre),

- Représentation des procédures (organigramme, algorithme, schéma fonctionnel),
- Données sur les séries (diagramme à barres, diagramme de Pareto, carte de zone, box plot, diagramme circulaire, carte radar)
- Autres types (carte géographique, croquis, masque).

Une version visuelle de la carte mentale peut être trouvée en ligne [23].

V. ÉVALUATION INITIALE DE LA DÉMARCHE

A. Bénéfices pour les étudiants impliqués

Le travail d'assistante est associé au développement de la compétence de décrire les figures de manière didactique. La progression dans cette compétence est explorée plus en détail dans la section VI.

La lecture des figures est un élément important de l'appropriation d'un article scientifique et peut être utilisé au moment du choix d'inclure ou pas un article dans un corpus bibliographique. L'enseignant présente ainsi aux étudiants une stratégie de criblage des articles en trois étapes au niveau du titre, puis du résumé et enfin des figures. ED note que le travail d'assistante lui a permis de s'approprier cette démarche qui implique la capacité à juger un jeu de figures sans avoir lu le texte correspondant.

B. Réfléchir l'accessibilité: plutôt une opportunité qu'une contrainte pour l'enseignant

Il est généralement reconnu dans le monde du design que les contraintes ne sont pas un frein à la créativité mais une opportunité [24], [25]. Ici, la présence d'un étudiant en situation de handicap nous a amené à repenser la situation d'apprentissage. Nous avons adopté une approche centrée sur l'utilisateur [26] en décomposant le travail en sous-tâches et tenté d'analyser séparément perception et conceptualisation/représentation pour chaque sous-tâche. Cette décomposition était nécessaire pour répartir les tâches entre le chercheur et son assistante, tout en maximisant la part du travail réalisée par le chercheur, et donc ses compétences. Mais cette décomposition nous a aussi conduit à identifier toutes les sous-tâches d'un point de vue cognitif. L'activité résultante est beaucoup plus détaillée et décrit de manière explicite les différentes étapes. Ainsi l'intention, initialement implicite, de développer la compétence de recherche d'information dans les figures est devenu un objectif explicite ce qui est probablement, en soi, favorable à tous les étudiants.

L'opportunité d'écrire ce document s'est également révélée être une occasion de formaliser la réflexion et constitue un avantage *per se*, sans compter les possibilités de recevoir des retours [27].

VI EXPÉRIENCE DU SECOND CYCLE THEDRE

L'activité proposée plus haut a été réalisée avec tous les étudiants de l'année suivante. Il s'agit de mesurer les bénéfices pour les étudiants de l'activité, même si le groupe d'étudiants ne comporte pas d'étudiant en situation de handicap.

Un point important de la méthodologie THEDRE est de permettre de préciser la question de recherche à chaque cycle. Notre expérimentation étant initialement orientée vers le service rendu à l'étudiant en situation de handicap a été initiée avec des questions vagues: est-ce que le dispositif permet à l'étudiant en situation de handicap d'atteindre les objectifs pédagogiques? Est-ce qu'il y a des bénéfices pour les autres acteurs, i.e. l'assistante en accessibilité, l'enseignant et les autres étudiants?

Pour cette expérience, la question concerne le bénéfice pour tous les étudiants. L'évaluation est centrée sur un aspect qui n'est pas réalisé spontanément par les étudiants: la description du modèle visuel abstrait. Nous nous sommes ainsi demandé si les annexes fournies avec le document initial permettaient de structurer la description des figures, i.e. en facilitant l'appellation du modèle visuel abstrait.

Au cours du semestre 6 séances d'analyse d'article ont été réalisées avec les documents et annexes. L'analyse est réalisée en observant l'utilisation des éléments du memento en tant qu'indice de l'effet de la formation [28]. Cette observation a été réalisée sur les copies de l'examen de fin de semestre alors que celui-ci ne contenait pas le memento et que la consigne ne mentionnait pas son utilisation. Une utilisation spontanée des éléments du memento est alors interprétée comme une indication d'une compétence acquise dans le cadre de l'exercice.

Nous constatons que 18/25 étudiants l'ont utilisé spontanément. Quoique le niveau de preuve soit limité, cette observation est cohérente avec l'acquisition de la compétence entraînée par au moins une partie des étudiants.

VII CONCLUSION

Notre travail peut s'analyser dans un contexte d'ergonomie [18], [29]. Brangier propose notamment une matrice d'analyse à double entrée (tableau 2). Dans la première dimension, il place les différents niveaux d'analyse (technologie, homme et organisation). Dans la deuxième dimension, il définit trois éléments du processus de symbiose (fonctionnalité, utilisabilité et accommodement).

Dans ce cadre on pourrait placer les interventions déjà réalisées:

- Au niveau du contexte organisationnel, nous avons mis en place un accompagnement par une assistante.
- Au niveau fonctionnalité/contexte, l'enseignant a réalisé une modification de l'activité en décomposant les tâches du chercheur et de l'assistante.
- Au niveau technologie/accommodement, nous avons proposé des documents ressources permettant la mise en place d'un langage commun (cf Memento).

On peut aussi proposer comme perspectives, au niveau humain/Accommodement, de réaliser des documents de

formation, le présent document étant un point de départ.

L'enseignement des sciences représente un défi en termes d'inclusivité, si bien que cette voie est parfois déconseillée à un étudiant en situation de handicap [15]. L'activité que nous proposons pourrait participer à réduire un peu ce défi. D'autre part, dans une perspective d'accessibilité universelle, il nous semble pertinent d'analyser les bénéfices plus largement que pour les étudiants initialement concernés [30]–[32]. Nous imaginons ainsi plusieurs leviers:

- On voit ici que le rôle d'assistant revêt un intérêt pédagogique pour l'étudiant qui joue ce rôle. Il est donc envisageable que ce rôle soit démultiplié par exemple via les UEs libres.
- Ce type d'activité peut être proposé qu'un étudiant en situation de handicap soit présent ou pas.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Charlotte Tempier, Mathieu Vermeulen et Jérôme Dupire pour leur discussion/relecture.

REFERENCES

- [1] D. L. Evans, S. G. Bailey, A. E. Thumser, S. L. Trinder, N. E. Winstone, and I. G. Bailey, "The Biochemical Literacy Framework: Inviting pedagogical innovation in higher education," *FEBS Open Bio*, vol. 10, no. 9, pp. 1720–1736, 2020, doi: 10.1002/2211-5463.12938.
- [2] A. Constantin, S. Peroni, S. Pettifer, D. Shotton, and F. Vitali, "The Document Components Ontology (DoCO)," *Semantic Web*, vol. 7, no. 2, pp. 167–181, Jan. 2016, doi: 10.3233/SW-150177.
- [3] N. Mandran and S. Dupuy-Chessa, "Supporting experimental methods in information system research," in *2018 12th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)*, May 2018, pp. 1–12. doi: 10.1109/RCIS.2018.8406654.
- [4] G. Uzan, E. Dupré, A. Culpin, and A. Taly, "Assistant en accessibilité, rendre accessible une activité d'analyse d'article," Zenodo, Apr. 2021. doi: 10.5281/zenodo.4730470.
- [5] C. Bach, D. Scapin, and E. Brangier, "Comment s'assurer de la facilité d'utilisation d'une nouvelle technologie," 2006, pp. 413–428.
- [6] J. M. C. Bastien and A. Tricot, *L'évaluation ergonomique des documents électroniques*. Presses Universitaires de France, 2008. Accessed: Feb. 13, 2021. [Online]. Available: <https://www.cairn.info/ergonomie-des-documents-electroniques-9782130559924-page-205.htm>
- [7] L. N. Soldatova and R. D. King, "An ontology of scientific experiments," *J. R. Soc. Interface*, vol. 3, no. 11, pp. 795–803, Dec. 2006, doi: 10.1098/rsif.2006.0134.
- [8] L. Ermakova, F. Bordignon, N. Turenne, and M. Noel, "Is the Abstract a Mere Teaser? Evaluating Generosity of Article Abstracts in the Environmental Sciences,"

- Front. Res. Metr. Anal.*, vol. 3, 2018, doi: 10.3389/firma.2018.00016.
- [9] V. Daponte and G. Falquet, “Une ontologie pour la formalisation et la visualisation des connaissances scientifiques,” in *29es Journées Francophones d’Ingénierie des Connaissances, IC 2018*, 2018, pp. 129–136. Accessed: Feb. 13, 2021. [Online]. Available: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:138011>
- [10] V. Jendoubi, F. Benninghoff, P.-A. Wassmer, and Genève (canton). Service de la recherche en éducation, Eds., *Evaluation du dispositif d’assistants à l’intégration scolaire (AIS)*. Genève: SRED.
- [11] A. Ployé and V. Barry, “Étude des ressorts et obstacles de la coopération entre professeurs, enseignants spécialisés et auxiliaires de vie scolaire dans le cadre de la scolarisation d’élèves handicapés,” Paris, France, Jun. 2015. Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01184734>
- [12] J.-M. Perez and T. Assude, *Pratiques inclusives et savoirs scolaires*. Presses universitaires de Nancy : Éditions universitaires de Lorraine, 2013. Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01443840>
- [13] D. Chambers and D. Reisberg, “Can Mental Images Be Ambiguous?,” p. 12.
- [14] M. S. Minkara, “Dr. Mona Minkara | Access Assistants.” <https://monaminkara.com/access-assistants/> (accessed Feb. 25, 2021).
- [15] M. S. Minkara, M. N. Weaver, J. Gorske, C. R. Bowers, and K. M. Merz, “Implementation of Protocols To Enable Doctoral Training in Physical and Computational Chemistry of a Blind Graduate Student,” *J. Chem. Educ.*, vol. 92, no. 8, pp. 1280–1283, Aug. 2015, doi: 10.1021/ed5009552.
- [16] D. Sperber and D. Wilson, “A Deflationary Account of Metaphors,” *Camb. Handb. Metaphor Lang. Thought*, pp. 84–105, 2008.
- [17] P. Falzon, “Langages opératifs et compréhension opérative,” *Trav. Hum.*, vol. 50, no. 3, pp. 281–286, 1987.
- [18] E. Brangier, “Psychologie ergonomique de l’assistance technique: Approche symbiotique des relations homme-technologie-organisation,” HDR, Université Paris-V., 2000.
- [19] P. Pastré, “Apprendre à faire.,” in *Apprendre et faire apprendre*, Etienne Bourgeois, Gaëtane Chapelle., P.U.F., 2006, pp. 109–121.
- [20] A. Taly, “Accessibility assistant exercise,” *figshare*, Feb. 27, 2021. [/articles/figure/Accessibility_assistant_exercise/14129939/1](https://figshare.com/articles/figure/Accessibility_assistant_exercise/14129939/1) (accessed Feb. 27, 2021).
- [21] K. V. Jobin, A. Mondal, and C. V. Jawahar, “DocFigure: A Dataset for Scientific Document Figure Classification,” in *2019 International Conference on Document Analysis and Recognition Workshops (ICDARW)*, Sep. 2019, vol. 1, pp. 74–79. doi: 10.1109/ICDARW.2019.00018.
- [22] X. Yuan and D. Ang, “A novel figure panel classification and extraction method for document image understanding,” *Int. J. Data Min. Bioinforma.*, vol. 9, no. 1, pp. 22–36, Dec. 2013, doi: 10.1504/IJDMB.2014.057779.
- [23] A. Taly, “Figures’ types Mindmap,” *figshare*, Feb. 23, 2021. [/articles/figure/Figures_types_Mindmap/14095601/1](https://figshare.com/articles/figure/Figures_types_Mindmap/14095601/1) (accessed Feb. 25, 2021).
- [24] C. P. Moreau and D. W. Dahl, “Designing the Solution: The Impact of Constraints on Consumers’ Creativity,” *J. Consum. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 13–22, Jun. 2005, doi: 10.1086/429597.
- [25] P. D. Stockes, *Creativity from Constraints: The Psychology of Breakthrough*. Springer Publishing Company, 2005.
- [26] I. Luka, “Design Thinking in Pedagogy,” *J. Educ. Cult. Soc.*, vol. 5, no. 2, pp. 63–74, 2014.
- [27] P. Poulain, M. Bertrand, H. Dufour, and A. Taly, “Ten Simple Rules for Implementing a Flipped Classroom.” Preprints, 2020. [Online]. Available: doi: 10.20944/preprints202007.0030.v1
- [28] L. Martin, J. Alvarez, and A. Taly, “Serious Games for Vocational Training: From Emotional Labor to Knowledge Transfer,” in *Digital Transformations in the Challenge of Activity and Work*, John Wiley & Sons, Ltd, 2021, pp. 57–70. doi: 10.1002/9781119808343.ch5.
- [29] C. Delgoulet, C. Vidal-Gomel, P. Falzon, and C. Teiger, “Ergonomie, formation et développement,” in *Traité des sciences et des techniques de la formation. Quatrième édition entièrement revue et augmentée.*, P. Carré (dir.) and P. Caspar (dir.), Eds. Dunod, 2017, pp. 175–191. Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01895383>
- [30] M. Barile, M. N. Nguyen, A. Havel, and C. S. Fichten, “L’accessibilité universelle en pédagogie : des avantages pour toutes et pour tous!,” 2012, Accessed: Feb. 11, 2021. [Online]. Available: <https://eduq.info/xmlui/handle/11515/21864>
- [31] D. L. Edyburn, “Would You Recognize Universal Design for Learning if You Saw it? Ten Propositions for New Directions for the Second Decade of UDL,” *Learn. Disabil. Q.*, vol. 33, no. 1, pp. 33–41, Feb. 2010, doi: 10.1177/073194871003300103.
- [32] S. Iwarsson and A. STÅHL, “Accessibility, usability and universal design—positioning and definition of concepts describing person-environment relationships,” *Disabil. Rehabil.*, vol. 25, no. 2, pp. 57–66, Jan. 2003, doi: 10.1080/dre.25.2.57.66.

Session Posters

Président de session : Gérard Uzan

Les enseignants en école élémentaire française connaissent-ils le Facile à Lire et à Comprendre ?

Enquête préliminaire par questionnaire

Floriane Balssa
Laboratoire IMS-Cognitive
Université de Bordeaux
Bordeaux, France
floriane.balssa@u-bordeaux.fr

Véronique Lespinet-Najib
Laboratoire IMS-Cognitive
Bordeaux INP
Bordeaux, France
veronique.lespinet@ensc.fr

Résumé— Cet article présente les résultats d'une enquête préliminaire sur le Facile à Lire et à Comprendre (FALC) menée auprès des enseignants en école élémentaire. Les règles FALC s'adressent à toute personne en difficulté de lecture et de compréhension, comme les enfants à l'école primaire. Elles sont surtout utilisées en France dans le domaine du handicap, mais il nous paraissait intéressant de nous questionner sur la connaissance et l'usage du FALC dans l'éducation afin d'étudier son application au sein d'une classe élémentaire. Cette enquête par questionnaire en ligne a été menée auprès de 499 enseignants en France afin de savoir si le FALC était connu des enseignants et s'il pouvait présenter un intérêt pour eux. Nous présentons ici, la méthode de recueil de données mise en place, l'analyse des résultats et les perspectives pour la suite de l'étude. D'après les résultats présentés dans cet article, le FALC est peu connu des enseignants et son application reste marginale. Cependant, les enseignants de l'étude montrent un intérêt pour les règles FALC et son application en classe. Suite à ce questionnaire, des entretiens seront réalisés avec les enseignants pour mieux comprendre leurs besoins et attentes autour du FALC.

Mots clés—FALC, éducation, accessibilité, enquête

I. INTRODUCTION

En 2009, dans le cadre du projet Pathways, Inclusion Europe publie une liste de règles permettant de rendre l'information Facile à Lire et à Comprendre (FALC) ou Easy-to-read en anglais [5]. Porté par huit pays européens dont la France, ce projet a pour but de rendre l'information plus accessible au public ayant des difficultés de lecture ou de compréhension. En effet, le droit à l'information est un droit fondamental [8] et aucun citoyen ne doit en être privé au risque d'être mis à l'écart de la société. Le FALC peut s'appliquer pour les informations écrites, électroniques, vidéo et audio. Ces règles concernent le lexique, la syntaxe, la sémantique et la structure du document. La Fig. 1 montre un exemple de texte écrit en FALC [15]. Nous pouvons remarquer les règles principales : le titre est clair (1), un encadré permet d'attirer l'attention sur les informations importantes (2) et les termes compliqués sont expliqués (3). De plus, les phrases sont coupées pour respecter les temps de respiration pendant la lecture (4) et les pictogrammes (5) permettent d'illustrer le texte et de compléter l'information. Il est également important de faire relire le document par les

personnes concernées pour s'assurer de son adaptation et le modifier si nécessaire.

Votre enfant peut faire des études après le bac (1)

Le bac est un diplôme.

Un diplôme est un document officiel. Ce document dit que votre enfant a suivi des études et qu'il a réussi ses examens. (3)

Un examen est un test pour vérifier que votre enfant a bien compris ce qu'il a appris à l'école.

Vous enfant passe le bac (4) à la fin de la classe de terminale au lycée. (5)

Fig.1. Exemple de texte FALC

En France, l'usage des règles FALC est connu dans le domaine du handicap mental, mais reste peu connu en dehors de cette sphère. Pourtant, le FALC ne s'adresse pas uniquement à ce public-là. Il est destiné aux personnes rencontrant des difficultés de lecture et de compréhension, telles que les personnes en situation de handicap mental, avec troubles dys, troubles des apprentissages, non-entendants..., mais aussi aux personnes en situation d'illettrisme, aux étrangers et immigrés, aux personnes avançant en âge et aux enfants en école maternelle et élémentaire. D'autres pays comme la Suède [9] ou l'Allemagne [1] utilisent notamment le FALC dans l'éducation pour faciliter la lecture et la compréhension. En France, depuis la loi du 11 février 2005 pour l'égalité des chances [11], la scolarisation des élèves en situation de handicap en milieu scolaire dit « ordinaire » ne cesse d'augmenter. De plus, le principe de l'école inclusive vise à « assurer une scolarisation de qualité pour tous les élèves, de la maternelle au lycée par la prise en compte de leurs singularités et de leurs besoins éducatifs particuliers. » [6]. Néanmoins, offrir les conditions

d'apprentissage adaptées aux besoins de tous les élèves représente une charge de travail supplémentaire pour ces enseignants, non spécialisés, et qui n'ont pas toujours les ressources nécessaires pour adapter leur enseignement à ces élèves et se retrouvent donc démunis [3]. Aussi nous semblait-il pertinent de nous interroger sur l'apport des règles FALC pour répondre aux singularités d'apprentissage et besoins éducatifs de chacun. Une première question se pose alors : Les enseignants du CP au CM2 en France connaissent-ils et appliquent-ils le FALC ?

II. METHODE DE L'ENQUETE

Pour répondre à cette question, il nous paraissait indispensable d'interroger un large panel d'enseignants, du CP au CM2, de tout âge et travaillant dans différentes régions. Nous avons donc choisi la méthode du questionnaire pour recueillir des données sur tout le territoire français et avoir un premier aperçu de la connaissance du FALC par ces professionnels.

A. Objectifs du questionnaire

Ce questionnaire avait trois objectifs principaux : 1- Répondre à la question : Le FALC est-il connu et appliqué par les enseignants de l'élémentaire en France ? 2-Avoir une vision globale à l'échelle de la France (DOM.TOM inclus) de la perception du FALC par ces enseignants. 3- Comprendre les enjeux du FALC dans l'éducation pour co-construire, avec les enseignants, une méthode d'application du FALC en école élémentaire ordinaire.

B. Construction du questionnaire

Afin d'avoir une idée générale de la connaissance du FALC par les enseignants en école élémentaire, nous avons choisi de diffuser un questionnaire en ligne. Ce questionnaire a été construit pour recueillir, d'une part, des informations générales sur la population interrogée, d'autre part des informations plus spécifiques liées à la connaissance du FALC (Fig. 2). Nous avons utilisé l'outil Framiform [7] pour réaliser ce questionnaire. Tout d'abord, les répondants en lisaient la présentation puis répondaient aux questions concernant le profil de l'enseignant (formé ou en formation) et les niveaux scolaires à charge.

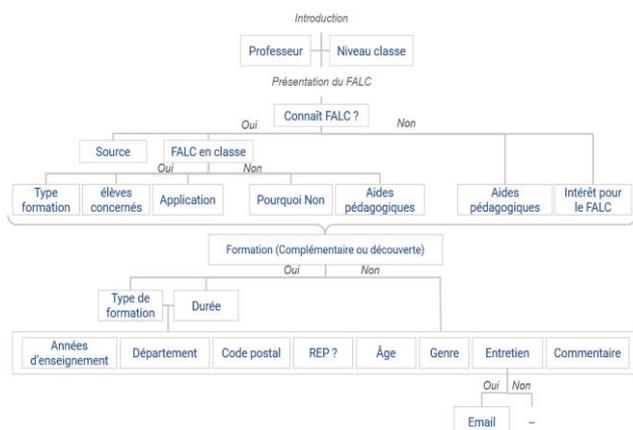


Fig.2. Structure du questionnaire

Ils consultaient ensuite une présentation générale du FALC et un extrait du conte de Cendrillon de Charles Perrault traduit en FALC. Après, nous leur demandions s'ils connaissaient le FALC, ce qui nous permettait d'adapter les questions au profil des enseignants. Pour ceux qui ne connaissaient pas le FALC, une question concernait les aides pédagogiques mises en place pour les élèves à besoin éducatifs particuliers. Une autre concernait l'intérêt présenté par le FALC pour leur profession. Ceux qui connaissaient le FALC devaient indiquer comment ils le connaissaient (source) et s'ils l'appliquaient en classe. Les questions étaient à nouveau divisées selon l'application ou non du FALC. Trois questions suivaient : le type de formation suivi pour apprendre à appliquer le FALC, les élèves concernés par cet usage et comment ils appliquent le FALC. Pour ceux qui ne l'appliquent pas, une question visait à en déterminer la raison. Enfin tous les répondants pouvaient indiquer s'ils souhaitaient suivre une formation, et si oui, de quelle durée et de quel type.

Enfin, tous les enseignants répondaient aux questions suivantes : Années d'enseignement, département et code postal de l'école, école en REP ou REP+, âge, genre. Enfin, ils indiquaient s'ils souhaitaient participer à un entretien et pouvaient ajouter un commentaire.

C. Diffusion du questionnaire

Le but du questionnaire était d'avoir un échantillon représentatif des enseignants en école élémentaire en France, en visant toutes les académies, les zones rurales et urbaines mais aussi toutes les tranches d'âges. Afin de diffuser le questionnaire le plus largement possible, nous sommes passés par différents réseaux et avons réalisé plusieurs sessions de diffusion. Le questionnaire est resté ouvert aux réponses pendant 2 mois.

D. Par mail via les réseaux professionnels

Nous avons d'abord diffusé le questionnaire via nos réseaux professionnels, que ce soit par liste de diffusion d'email ou via LinkedIn, qui a ensuite été rediffusé par notre réseau. La majorité des réponses étaient donc ciblées en Nouvelle-Aquitaine, majoritairement en Gironde.

E. Par mail directement à la direction des écoles

La seconde méthode de diffusion, toujours par e-mail, consistait à envoyer le questionnaire directement aux écoles. Nous avons utilisé l'annuaire des écoles disponibles sur le site, data.education.gouv.fr [2]. Pour certains départements, il n'y avait pas ou peu d'écoles dans l'annuaire, nous avons donc utilisé les sites lesecoles.fr [10] et education.gouv.fr [13]. La diffusion s'est faite en sélectionnant aléatoirement une quinzaine d'écoles publiques par département, en excluant les départements ayant déjà fourni au moins cinq réponses. Environ 200 mails ont été diffusés par jour sur une dizaine de jours. Si un département ou un territoire n'envoyait pas de réponse, une nouvelle diffusion était réalisée sur le même principe, au minimum cinq jours après.

F. Méthode d'analyse du questionnaire

L'analyse des résultats du questionnaire a été réalisée avec le logiciel R. L'article suivant présente les résultats de l'analyse

statistique descriptive. Nous avons choisi de séparer notre analyse en trois parties : description générale de la population interrogée, analyse des réponses des enseignants en élémentaire connaissant le FALC, analyse des réponses des enseignants en élémentaire ne connaissant pas le FALC.

III. RESULTATS

Dans cette partie nous présenterons l'analyse des résultats du questionnaire. L'objectif est d'avoir une vision générale de la connaissance du FALC par les enseignants interrogés.

A. Description de la population

Nous allons d'abord décrire de façon générale la population des répondants. 499 enseignants en niveau élémentaire en France ont répondu au questionnaire.

D'un point de vue géographique, nous avons obtenu des réponses dans tous les départements de France métropolitaine et dans une majorité de territoires d'outre-mer (La Guadeloupe, la Réunion, La Martinique, La Guyane, Mayotte, La Nouvelle-Calédonie, La Polynésie Française et Saint-Pierre-et-Miquelon), l'objectif étant de toucher toutes les académies. Les régions ayant envoyé le plus de réponses sont : La Nouvelle-Aquitaine (19,4%), L'Auvergne-Rhône-Alpe (12,6%), L'île de France (10,2%) et L'Occitanie (9,8%).

Le TABLE I présente les profils des enseignants répondants. Ainsi, 7% d'entre eux sont en formation pour devenir enseignants et 93% sont enseignants confirmés. Concernant le genre des répondants, 86% sont des femmes contre 14% d'homme. Pour l'âge des répondants, notons une répartition équilibrée entre les tranches d'âge. En effet, 14% des répondants sont âgés de 20 à 30 ans, 24% ont entre 31 ans et 40 ans ou sont âgés de plus de 51 ans. Enfin, 38% sont âgés de 41 à 50 ans. Nous remarquons également une répartition équilibrée entre les différentes classes d'ancienneté. Ainsi, 16% des répondants ont moins de 5 années d'expérience en tant qu'enseignant, 15% ont entre 5 et 10 ans ou entre 16 et 20 ans d'ancienneté, 14% sont dans l'enseignement depuis 11 à 15 ans et 18% ont plus de 25 ans d'expérience. Ces premiers résultats montrent que notre échantillon est assez représentatif de la population des enseignants du premier degré. Ainsi, en 2020-

2021, 85,2% de ces professionnels étaient des femmes avec une moyenne d'âge de 42,2 ans [14]. Concernant les écoles en Réseau d'Éducation Prioritaire (REP ou REP+), 19% des répondants y enseignent, 1% ignore si son école en fait partie et 80% ne sont pas dans une école en REP ou REP+.

Enfin, intéressons-nous au niveau scolaire des classes des répondants. 138 répondants enseignent au CP, 164 enseignants au CE1, 151 répondants gèrent un niveau CE2, 178 enseignants encadrent des CM1 et 167 répondants enseignent au CM2. Les enseignants pouvaient indiquer plusieurs niveaux à charge : 43% d'entre eux ont notamment déclaré entre 2 et 5 niveaux à charge. De plus, Fig. 3 ci-dessous permet d'avoir une vision des cycles d'apprentissage définis dans le Décret n° 2013-682 du 24 juillet 2013 relatif aux cycles d'enseignement à l'école primaire et au collège [4]. Ainsi, le cycle 2, cycle des apprentissages fondamentaux, regroupe le cours préparatoire (CP) et le cours élémentaire première et deuxième année (CE1 et CE2). Le cycle 3 dit cycle de consolidation comprend le cours moyen première année et deuxième année (CM1, CM2). 327 répondants enseignent en cycle 2 et 243 en cycle 3. Cependant, 71 d'entre eux encadrent des niveaux dans les deux cycles.

Intéressons-nous maintenant au FALC. La Fig. 4 présente le pourcentage de réponses à la question : « Connaissez-vous le FALC ? ». Cette question faisait suite à la présentation des règles FALC et d'un extrait du conte de Cendrillon traduit en FALC. 90,6% des enseignants répondants ne connaissaient pas le FALC, 0,4% ne savaient pas s'ils connaissaient le FALC et seulement 9% connaissaient le FALC dont les règles semblent donc très peu connues par les enseignants interrogés.

Afin d'identifier au mieux l'usage du FALC par les enseignants ou l'intérêt qu'il pourrait représenter pour eux, la suite des résultats présentera séparément les réponses des enseignants connaissant le FALC, des autres.

Concernant les profils des enseignants connaissant ou non le FALC, il n'y a pas de différence pertinente entre ces deux profils, que ce soit au niveau des enseignants formés ou confirmés, du genre, de l'âge, des années d'ancienneté, des enseignants en REP ou non et des niveaux à charge.

TABLE I. PROFIL DE LA POPULATION INTERROGÉES

Profils des enseignants					
Formés			En formation		
93%			7%		
Âge					
20-30 ans	31-40 ans	41-50 ans	51 ans et plus		
14%	24%	38%	24%		
Genre					
Femme	Homme		Autre		
86%	14%		0%		
Années d'ancienneté dans l'enseignement					
< 5 ans	5 à 10 ans	11 à 15 ans	16 à 20 ans	21 à 25 ans	>25 ans
16%	15%	14%	15%	20%	18%
Niveau scolaire à charge (nombre d'enseignants)*					
CP	CE1	CE2	CM1	CM2	
138	164	151	178	167	

*Plusieurs réponses possibles

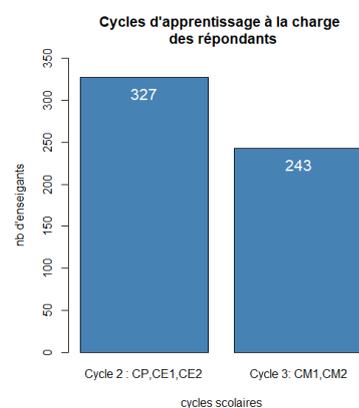


Fig. 3. Nombre d'enseignants par cycle

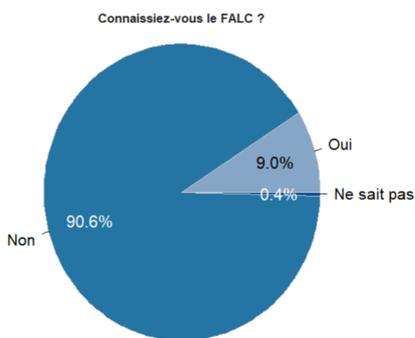


Fig. 4. Pourcentage d'enseignants connaissant le FALC

B. Enseignants connaissant le FALC

Dans cette partie, nous traiterons donc uniquement les réponses des 45 enseignants ayant répondu "Oui je connaissais" à la question "Connaissez-vous le FALC ?". Ces enseignants répondaient ensuite à plusieurs questions afin de savoir comment ils ont connu le FALC, s'ils l'appliquent et à qui, ou au contraire, quels seraient les freins qui les empêcheraient d'appliquer le FALC.

La question suivante était « Par quel moyen en avez-vous pris connaissance ? ». Les répondants pouvaient choisir plusieurs réponses. 12 d'entre eux connaissent le FALC grâce à une formation, 6 grâce à leurs collègues, 5 ont été informés via le Réseau d'Aides Spécialisées aux Elèves en Difficulté (RASED), 3 enseignants le tiennent de leurs proches, 1 enseignant connaît le FALC grâce à des parents d'élèves, 1 autre par une personne référente du FALC. Enfin 21 enseignants ont indiqué une autre source, qu'ils pouvaient préciser. Parmi ces précisions, 7 d'entre eux ont fait des recherches par eux-mêmes et 4 l'ont appris lorsqu'ils étaient enseignants spécialisés. Parmi les autres sources, on retrouve aussi les médias, les associations ou encore la littérature adaptée. Notons que 4 enseignants ont choisi plusieurs réponses.

Outre la connaissance du FALC, notre objectif était de savoir si les enseignants du primaire l'utilisent auprès de leurs élèves. La Fig. 5 illustre les réponses à la question suivante : « Appliquez-vous le FALC dans votre classe ? ». 20% des enseignants ont répondu « Oui je l'applique » contre 73% qui ne l'appliquent pas et 7% qui ne savent pas. Ainsi,

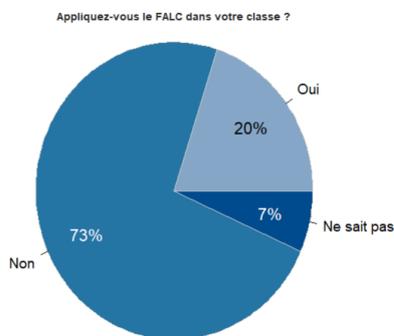


Fig. 5. Pourcentage d'enseignants appliquant le FALC

TABLE II. MISE EN APPLICATION DU FALC PAR LES ENSEIGNANTS

De quelle(s) façon(s) avez-vous appris à le mettre en application ?*					
Auto-formation	Formation en présentiel	Formation en distanciel	Formation Hybride	Formation en ligne	Autre
9	2	0	0	0	1
Pour quels élèves mettez-vous en place le FALC ?*					
Par classe	Par niveau	Selon les difficultés	Selon le handicap	Autre élève	
2	2	6	8	0	

*Plusieurs réponses possibles

connaître le FALC n'amène pas forcément les enseignants à l'appliquer en classe.

Pour les 9 enseignants qui appliquent le FALC, le TABLE II illustre, comment ils ont appris à l'appliquer et pour quels profils d'élèves. Ainsi, ces enseignants ont appris à appliquer le FALC par auto-formation. 2 d'entre eux ont également reçu une formation en présentiel. En revanche, aucun d'eux n'a reçu de formation en distanciel, hybride (divisée entre présentiel et distanciel) ou en ligne de façon autonome de type Mooc. 1 personne a précisé, comme autre formation, ses expériences professionnelles passées. Afin d'avoir une idée de la façon dont ces enseignants utilisent le FALC, un champ ouvert leur permettait de répondre à la question : « Comment appliquez-vous le FALC pour vos élèves ? ». La majorité d'entre eux utilisent le FALC pour adapter les textes de lecture et simplifier la mise en page. Certains l'utilisent aussi pour expliquer ou simplifier le vocabulaire, adapter les consignes ou illustrer les idées.

Concernant les 36 enseignants qui connaissent le FALC mais ne l'appliquent pas, l'objectif était d'identifier les raisons et de connaître les solutions qu'ils mettent en place pour aider les élèves en difficulté. La Fig.6 illustre les réponses à la question « Pour quelles raisons n'utilisez-vous pas ces règles FALC ? ». La majorité de ces enseignants estiment manquer de connaissance (22), un quart ne savent pas les appliquer ou manquent de temps (9), 3 des répondants trouvent les règles trop compliquées ou sans intérêt et une personne ne les applique pas pour une autre raison. Ainsi, le manque d'application semble plutôt lié à un manque de connaissance, de formation et de temps.

La question « Quelles aides pédagogiques mettez-vous en place ? » Fig. 7 a pour objectif d'identifier les aides mis

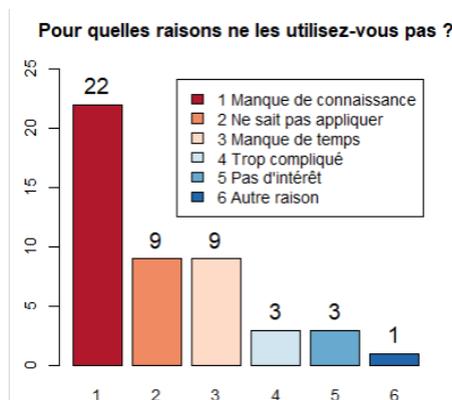


Fig. 6. Enseignants n'appliquant pas le FALC : raisons

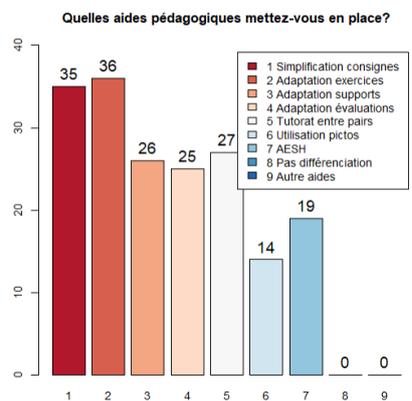


Fig. 7. Aides pédagogiques mises en place par les enseignants qui n'appliquent pas le FALC en classe

en place par ces enseignants pour aider les élèves à besoins éducatifs particuliers, indépendamment du FALC.

Plusieurs réponses étaient possibles. La majorité des enseignants adaptent les exercices (36) et simplifient les consignes (35) pour aider ces élèves. L'adaptation des supports (26), des évaluations (25) et le tutorat par les pairs sont également très utilisés (27). 14 des répondants ont recours à des pictogrammes et 19 enseignants sont aidés par des accompagnants d'élèves en situation de handicap (AESH). Les 36 enseignants mettent donc en place des adaptations pour ces élèves.

Enfin, nous avons demandé aux 45 enseignants qui connaissent le FALC, s'ils aimeraient suivre une formation complémentaire sur le FALC, la durée et le type de formation qu'ils souhaiteraient. Le TABLE III présente le résultat. Ainsi, 64,5% des répondants qui connaissent le FALC, souhaiteraient suivre une formation complémentaire, soit 30 personnes, 24,5% ne savent pas et 11% ne le souhaitent pas. Concernant la durée et le type de formation, les répondants pouvaient choisir plusieurs réponses. 14 enseignants envisagent une demi-journée de formation, 9 seraient intéressés par une journée, 6 par deux heures et 3 pour faire plus d'une journée de formation. Pour le type de formation, 20 enseignants sur 29 envisagent une formation en présentiel, 8 aimeraient une formation autonome en ligne, 8 envisagent une formation en distanciel et 2 aimeraient un format hybride. Pour la formation autonome en ligne, 6 des 8 enseignants ont également choisi un autre mode de formation.

TABLE III. INTERET DES ENSEIGNANTS POUR UNE FORMATION FALC

Aimeriez-vous suivre une formation complémentaire sur les règles FALC ?				
Oui	Non		Je ne sais pas	
64,5%	11%		24,5%	
Quelle durée de formation vous conviendrait ?* (si oui précédemment)				
2h	1 demi-journée	1 journée	Plus d'une journée	Autre durée
6	14	9	3	0
Quelle type de formation vous conviendrait ?* (si oui précédemment)				
Formation en présentiel	Formation en distanciel	Formation Hybride	Formation autonome en ligne	Autre formation
20	7	2	8	0

*Plusieurs réponses possibles

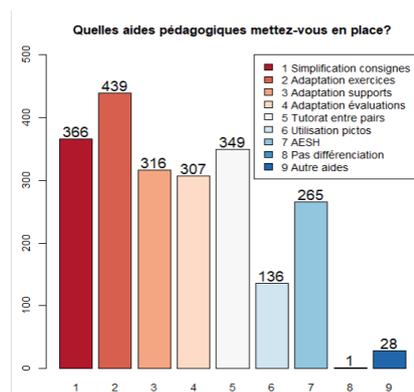


Fig. 8. Aides pédagogiques mises en place par les enseignants qui ne connaissent pas le FALC

C. Enseignants ne connaissant pas le FALC

Cette partie prend en compte les réponses des 454 enseignants ayant répondu « Non, je ne connaissais pas » ou « Je ne sais pas » à la question « Connaissez-vous le FALC ? ». Pour cette sous-population, l'objectif était double. Tout d'abord comprendre les aides mises en place pour aider les élèves à besoins éducatifs particuliers. Puis questionner les enseignants sur l'intérêt du FALC dans leur métier et leur volonté de suivre une formation.

La Fig.8 présente les réponses à la question « Quelles aides pédagogiques mettez-vous en place ? ». Plusieurs réponses étaient possibles. L'adaptation des exercices est l'aide première apportée par presque tous les répondants (439), suivie par la simplification des consignes (366), le tutorat entre pairs (349), l'adaptation des supports (316), l'adaptation des évaluations (307) ou encore l'aide d'un AESH (265) pour plus de la moitié des enseignants. L'utilisation des pictogrammes est un peu moins présente (136) et d'autres types d'aides (28) tels que du matériel, un temps individuel d'accompagnement ou encore l'oralisation des consignes. Enfin, 1 personne dit ne pas faire de différenciation, mais utilise néanmoins des pictogrammes et adapte les exercices, les supports, et simplifie les consignes.

Concernant l'intérêt du FALC, 85% de ces enseignants considèrent que les règles FALC pourraient être intéressantes dans le cadre de leur travail Fig. 9 12% ne savent pas et seulement 2% pensent que ce n'est pas intéressant. Pour rappel,

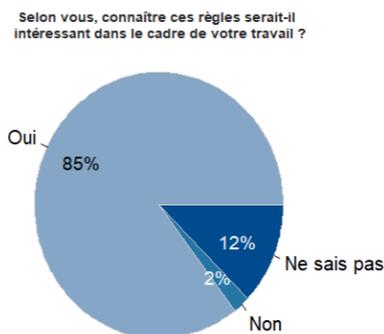


Fig. 9. Pourcentage d'enseignants intéressé par le FALC

les règles FALC étaient rapidement présentées au début du questionnaire avec un exemple de traduction FALC.

Sur les 388 répondants intéressés par le FALC, 211 aimeraient suivre une formation soit 46% (TABLE IV). 35%

TABLE IV. INTERET DES ENSEIGNANTS POUR UNE FORMATION FALC

Seriez-vous prêt à suivre une formation pour apprendre à mettre en application ces règles FALC ?				
<i>Oui</i>		<i>Non</i>		<i>Je ne sais pas</i>
46%		19%		35%
Quelle durée de formation vous conviendrait ?* (si oui précédemment)				
2h	1 demi-journée	1 journée	Plus d'une journée	Autre durée
47	85	76	38	6
Quelle type de formation vous conviendrait ?* (si oui précédemment)				
Formation en présentiel	Formation en distanciel	Formation Hybride	Formation autonome en ligne	Autre formation
117	48	46	63	0

*Plusieurs réponses possibles

sont indécis et 19% ne souhaitent pas suivre de formation. Les enseignants favorables à une formation aimeraient en majorité une formation d'une demi-journée (85) ou d'une journée (76). Notons que plusieurs réponses étaient possibles. Parmi les 6 « autres durées » envisagées, les répondants estiment que cela dépend de ce qu'il y a à savoir, aimeraient que cela soit prévu dans leur temps de travail ou souhaitent évoluer à leur rythme. Enfin, les enseignants plébiscitent en majorité une formation en présentiel (117). La formation autonome en ligne arrive en seconde position (63), suivie d'une formation en distanciel (48) et d'une formation hybride (46). Pour rappel, les enseignants pouvaient choisir plusieurs types de formation.

IV. DISCUSSION

Au vu des résultats de cette enquête, le FALC semble donc peu connu des enseignants en élémentaire en France. Les répondants qui connaissent le FALC ont été sensibilisés par différents canaux qui semblent plutôt liés à l'expérience de chaque enseignant (formation, expérience professionnelle, recherches...). Parmi ceux qui connaissent le FALC moins d'un quart l'utilisent en classe. Avoir connaissance du FALC n'est donc pas suffisant pour amener à son utilisation en classe. De plus, les enseignants qui l'appliquent en classe sont tous passés par l'auto-formation, ils ont donc investi du temps et des efforts et se sont débrouillés par eux-mêmes pour apprendre à le mettre en application. Le FALC est utilisé majoritairement selon le handicap ou les difficultés des élèves, ce qui laisse supposer une utilité pour la prise en charge des élèves à besoins éducatifs particuliers, notamment pour la lecture. Enfin, l'usage du FALC par 9 des répondants souligne une appropriation de ces règles par ces enseignants et une adaptation possible de son usage au sein d'une classe élémentaire.

Concernant les enseignants qui connaissent le FALC mais ne l'appliquent pas, la principale raison avancée est le manque de connaissance. La manque de temps et ne pas savoir comment appliquer les règles sont aussi des freins à son usage. Ces enseignants, ne sont donc pas réfractaires à son usage mais estiment ne pas avoir les connaissances nécessaires pour l'appliquer auprès de leurs élèves. De plus, une minorité d'enseignants ne semble pas favorable au FALC, trop compliqué

ou sans intérêt selon eux. Tous ces éléments représentent des freins à la mise en place du FALC à l'école et doivent être considérés dans la suite de notre étude. Cependant, ces enseignants mettent en place des adaptations, notamment l'adaptation des exercices ou la simplification des consignes. Pour les répondants connaissant le FALC, l'utilisant ou non, 64,5% aimeraient suivre une formation, et préfèrent une demi-journée en présentiel.

Les répondants ne connaissant pas le FALC, mettent également en place les adaptations citées précédemment. De plus, ils semblent voir un intérêt certain du FALC pour leur profession. Néanmoins, presque la moitié d'entre eux aimerait faire une formation sur le FALC et plus d'un tiers ne savent pas. Cette indécision est peut-être dû au manque de connaissance sur le sujet, qui ne leur permet pas de se projeter sur une formation ou au manque de temps souligné par le groupe précédent. Pour ce groupe, la formation souhaitée serait également d'une demi-journée en présentiel. Quel que soit le moyen utilisé, adapter l'enseignement à la diversité des élèves, au sein d'une classe élémentaire ordinaire, semble indispensable pour les enseignants.

Finalement le FALC semble présenter un intérêt pour les enseignants en élémentaire et son usage au sein d'une classe ordinaire, notamment pour aider les élèves à besoins éducatifs particuliers, semble possible. Néanmoins, le FALC est encore très peu connu dans le milieu de l'enseignement et son utilisation nécessiterait une formation et surtout une adaptation aux contraintes des enseignants dans leur pratique professionnelle (manquent de temps et adaptation des rythmes d'apprentissage hétérogènes de leurs élèves).

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette enquête ne prenait pas en compte les enseignants spécialisés, car l'objectif était de se focaliser sur les enseignants n'ayant pas reçu de formation particulière autour du handicap et de la prise en charge des élèves à besoin éducatifs particuliers. Cependant, pour la suite de l'étude, nous souhaitons également interroger ces spécialistes afin de mieux comprendre les stratégies mises en place par ces enseignants.

Cet article présente une première analyse statistique descriptive du questionnaire. Les analyses de corrélation sont en cours pour compléter ces résultats afin d'étudier s'il existe des liens entre la connaissance du FALC et le profil des enseignants (âge, niveau scolaire...) afin d'aboutir à la conception de Personae. Les personae sont définis comme « des archétypes d'utilisateurs créés à partir de données réelles recueillies pendant la phase d'exploration. Ils sont utilisés dans le processus de conception pour représenter et décrire les buts, besoins et caractéristiques des différents groupes d'utilisateurs. » [12]. Ils s'inscrivent dans notre démarche de Conception Centrée Utilisateur [16]. Ces personae serviront de référence pour garder les besoins enseignants au centre du projet et adapter au mieux le FALC selon leurs besoins.

Des entretiens semi-directifs sont en cours avec les différents profils d'enseignants identifiés dans cet article. L'objectif sera notamment de comprendre ce qu'ils attendent d'une formation sur le FALC, de mieux identifier les freins qui peuvent empêcher de l'appliquer mais aussi comment les enseignants qui

connaissent le FALC, l'appliquent dans leur classe. Enfin, si l'on considère les freins et réticences présentés dans cet article, l'appropriation du FALC par les enseignants doit s'inscrire dans un véritable accompagnement des pratiques professionnelles afin de ne pas engendrer de surcoût temporel et financier.

REMERCIEMENTS

Nous remercions toutes les personnes qui ont pris le temps de répondre et/ou de faire circuler ce questionnaire.

REFERENCES

- [1] B. M. Bock, U. Fix, et D. Lange, „Leichte Sprache“ im Spiegel theoretischer und angewandter Forschung. Frank & Timme GmbH, 2017.
- [2] « Annuaire de l'éducation ». <https://data.education.gouv.fr/explore/dataset/fr-en-annuaire-education/> (consulté le 26 novembre 2021).
- [3] G. Lavoie, S. Thomazet, S. Feuilladiou, G. Pelgrims, et S. Ebersold, « Construction sociale de la désignation des élèves à “besoins éducatifs particuliers” : incidences sur leur scolarisation et sur la formation des enseignants », *Alter*, vol. 7, no 2, p. 93-101, avr. 2013, doi: 10.1016/j.alter.2013.01.001.
- [4] Décret n° 2013-682 du 24 juillet 2013 relatif aux cycles d'enseignement à l'école primaire et au collège. 2013.
- [5] « Easy-to-Read – European Easy-to-Read Guidelines ». <https://easy-to-read.inclusion-europe.eu/> (consulté le 28 janvier 2022).
- [6] « École inclusive », *éduscol* | Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports - Direction générale de l'enseignement scolaire. <https://eduscol.education.fr/1137/ecole-inclusive> (consulté le 28 janvier 2022).
- [7] Framasoft, « Framaforms - Créez et diffusez vos formulaires facilement... ». <https://framaforms.org/abc/fr/> (consulté le 28 janvier 2022).
- [8] « La Déclaration universelle des droits de l'homme », 6 octobre 2015. <https://www.un.org/fr/universal-declaration-human-rights/> (consulté le 28 janvier 2022).
- [9] G. Widén et M. Kronqvist-Berg, « Läsförståelse och samarbete med bibliotek », p. 141.
- [10] « Les Écoles .fr - Toutes les écoles primaires (maternelles et élémentaires) ». <https://lesecoles.fr/> (consulté le 10 décembre 2021).
- [11] Loi n° 2005-102 du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées (1).
- [12] C. Lallemand et G. Gronier, *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles, 2015.
- [13] « Pour l'école de la confiance », Ministère de l'Éducation Nationale de la Jeunesse et des Sports. <https://www.education.gouv.fr/pour-l-ecole-de-la-confiance-221> (consulté le 10 décembre 2021).
- [14] « Repères et références statistiques 2022 », Ministère de l'Éducation Nationale de la Jeunesse et des Sports. <https://www.education.gouv.fr/reperes-et-references-statistiques-2022-326939> (consulté le 19 mai 2022). « Scola-rité : fiches en facile à lire et à comprendre », *Mon Parcours Handicap*. <https://www.monparcourshandicap.gouv.fr/handicap/scolarite-fiches-en-facile-lire-et-comprendre> (consulté le 10 mai 2022).
- [15] J. Nielsen, *Usability Engineering*. Elsevier, 1994.

Les techniques d'analyse d'images biométriques, au service des spécialistes du suivi des maladies neurodégénératives

Wagner de Aguiar

Instituto Federal de São Paulo – IFSP, São Paulo, Brasil
wagner.aguiar@unesp.br

Guillaume Thomann

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, G-SCOP, 38 000 Grenoble, France
guillaume.thomann@grenoble-inp.fr

José Celso Freire Júnior

Faculdade de Engenharia de Guaratingueta – FEG/UNESP, Brasil
jose-celso.freire@unesp.br

Gilberto Cuarelli

Instituto Federal de São Paulo – IFSP, São Paulo, Brasil
gcuarelli@ifsp.edu.br

Abstract—Un terme générique pour définir les maladies qui attaquent le système nerveux est “maladie neurodégénérative”. Actuellement, plusieurs spécialistes suivent ces patients, l'une des principales manifestations cliniques étant le trouble du mouvement. Les évolutions des outils de mesure de l'activité humaine, en situation de réhabilitation ou de diagnostic, sont nombreuses. Mais ses applications restent marginales, trop chères, ou manquent de validité auprès des communautés d'experts. La présente proposition est d'utiliser des caméras comme capteurs de mouvement appliqués à l'identification de signaux biométriques, où le besoin de percevoir la forme et le mouvement des parties du corps est essentiel. Notre proposition consiste à développer un système pour faciliter le travail du spécialiste en utilisant l'ordinateur et sa caméra comme outil de capture de données d'image. Nous voulons utiliser ces données appliquées à un du suivi des mains et des doigts grâce à la bibliothèque MediaPipe de Google, qui nous permet d'obtenir des données de positions en temps réel. Dans un premier temps, une étude des principales caractéristiques des caméras et de leur utilisation avec des programmes de traitement d'images a été réalisée. Nous nous avons procédé à une évaluation des données de ce capteur. Cette étude porte sur le suivi des patients sous traitement pour des maladies neurodégénératives. Avec l'utilisation de ce système, il est possible de mettre un outil d'aide à la disposition des spécialistes du domaine.

Keyword: *L'analyse des données; capteurs de mouvement; maladies neurodégénératives;*

I. INTRODUCTION

Pour interagir en utilisant les technologies capables de capter l'environnement, il est nécessaire d'acquérir la description géométrique de la scène. Jusqu'à présent, il était nécessaire d'utiliser des outils proposant l'utilisation de technologies avancées et de réaliser les activités en laboratoire spécifique, dans lequel il y avait la possibilité de contrôler l'environnement et d'utiliser des caméras matricielles. Ces équipements sont des capteurs capables de récupérer des informations de profondeur et de mesurer le temps pendant lequel la lumière émise par l'appareil atteint les objets

souhaités et revient au capteur. De cette façon, les données de profondeur sont disponibles dans des scènes statiques ou dynamiques [1] [2].

Selon l'Organisation Panaméricaine de la Santé - OPS, les maladies neurodégénératives figurent parmi les trois principales causes de décès dans le monde et sont responsables de près de 2 millions de décès par an. [3]. Les maladies neurodégénératives sont caractérisées par une bradykinésie, des tremblements au repos et une rigidité musculaire. Elles touchent actuellement environ 1 à 3 % des personnes âgées de 65 ans et plus, le nombre de patients augmentant, associé à une espérance de vie plus longue [4].

Avec l'objectif d'aider à l'analyse des effets de la bradykinésie permettant de vérifier l'augmentation de la maladie dégénérative, une application a été développée. Celle-ci analyse "la capacité d'engager le corps physique dans une interaction avec la technologie, par exemple par des gestes" [5].

Ce travail propose une lecture des "processus d'interaction" à l'usage des spécialistes du suivi des troubles du mouvement.

Zannaro [6] et Mutto [7] ont utilisé des instruments de pointe disponibles uniquement dans des laboratoires spécialisés, utilisant des caméras matricielles avec des capteurs qui capturent des informations de profondeur. De cette façon, les données de profondeur deviennent disponibles dans des scènes statiques ou dynamiques.

La détection de la fréquence cardiaque, la détection de l'équilibre d'un individu, l'identification des crises, l'analyse des troubles résultant de maladies neurodégénératives, entre autres, utilisent l'identification biométrique. Pour mesurer et enregistrer la position et l'orientation du corps humain en mouvement, une technologie appelée Motion Capture (MoCap) est utilisée. Elle a déjà été utilisée dans plusieurs applications [8]. Parmi les techniques utilisées, on peut citer l'analyse d'images obtenues avec des capteurs de mouvement tels que Kinect [4] [9].

De nouveaux appareils de mesures tels que Microsoft Azure Connecta®, Intel RealSense® et ASUS Xtion® peuvent prendre en charge une large gamme de systèmes d'exploitation et de langages de programmation, permettant une extraction plus détaillée des données pour une analyse et une interprétation plus faciles des ces données. Ces appareils sont connus sous le nom de caméras de profondeur 3D (RGBD).

Le framework MediaPipe répond aux défis des développeurs avec un framework peu coûteux et de bonne précision. Son intégration peut se faire par programmation dans plusieurs langages tels que Python, Java et C/C++. Il s'agit d'un cadre permettant de créer des pipelines pour effectuer des inférences sur des données arbitraires, notamment en permettant la perception avec des composants graphiques modulaires, l'inférence de modèle, des algorithmes de traitement multimédia et la transformation de données [9] [10]. L'identification biométrique à l'aide de la bibliothèque MediaPipe est considérée comme une tâche difficile. La vision par ordinateur est une solution haute-fidélité et son application pour détecter les mouvements de la main devrait être utilisée [11].

II. ÉTAT DE L'ART

Les technologies de détection d'images stéréo utilisent des capteurs avec des caméras pour calculer la profondeur et permettent ainsi à ces appareils de visualiser, comprendre, interagir et apprendre avec leur environnement de manière 3D. Construire une application pour percevoir l'environnement qui vous entoure est un défi. Plusieurs étapes doivent être franchies et le framework MediaPipe répond à ces défis. En 2019, Google a lancé un projet appelé MediaPipe. À partir de juin 2021, il a ouvertement fourni ce code, qui a attiré l'attention des développeurs d'appareils qui utilisent des caméras de profondeur dans leurs applications. MediaPipe utilise l'apprentissage automatique (Machine Learning ou ML) pour déduire des jalons dans les lectures de données. Chaque main détectée/suivie affiche les 21 points de référence et chaque point est composé des coordonnées x, y et z (Figure1). Les valeurs de x et y sont normalisées [0.0, 1.0] respectivement pour la largeur et la hauteur de l'image et z représente sa profondeur. Plus la distance z, est proche de la caméra, plus sa valeur est faible. Dans la figure 1, les points peuvent être observés à partir d'un seul cadre, facilitant l'analyse de grands blocs de données [11] [12].

Les capteurs de ce type sont présents dans les appareils mobiles et les progrès des technologies appliquées aux caméras permettent une augmentation de leur intégration dans les plates-formes portables, nous avons donc un grand potentiel à explorer [10][13].

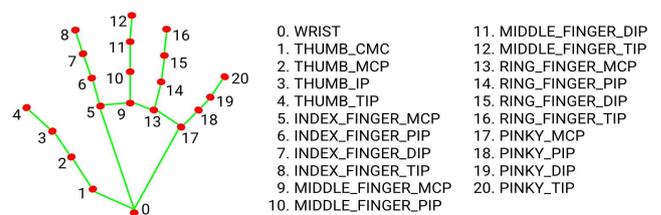


Fig 1 - Repères de la main [11]

a. Obtenir des waypoints avec Mediapipe

MediaPipe permet la création de pipelines avec une machine learning appliqué au multimodal (audio, vidéo) et dispose d'une vaste collection de modèles de détection et de suivi du corps humain, où les points sont normalisés en trois dimensions. Les développeurs de Google ont créé des modèles à l'aide de Tensorflow lite, facilement adaptables et ajustables via des graphiques [13] [14].

La figure 2 illustre une proposition d'architecture pour le pré-traitement des images. A première étape se situent les images reçues par la caméra. À l'étape suivante, l'identification de la main et la capture des données de positionnement sont effectuées, puis les données sont exportées vers un fichier .csv et sont disponibles pour analyse.

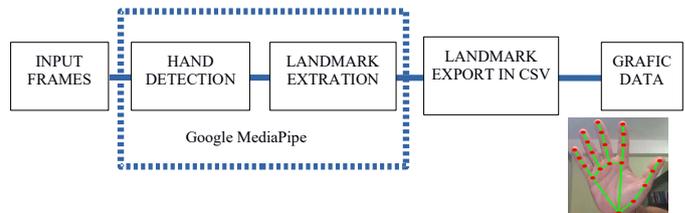


Fig. 2 – Proposition d'architecture pour le pré-traitement d'images

b. bradykinésie

Des études montrent la faisabilité d'évaluer objectivement la marche de patients atteints de maladies neurodégénératives dans des environnements contrôlés, à l'aide de Kinect et, avec la proposition de quantifier ces anomalies [15]. Dancra [16] a mené une étude pour classer les stades de la maladie de Parkinson à l'aide d'un capteur Kinect basé sur l'évaluation des troubles de la marche.

Ben [4] évoque l'échelle d'évaluation unifiée de la maladie de Parkinson (UPDRS), une échelle subjective réalisée et notée par des médecins. Dans son étude, l'outil proposé prend la position des échelles UPDRS utilisées aujourd'hui, qui sont des mesures subjectives. Compte tenu de l'importance que les maladies neuro-dégénératives ont pris dans la société aujourd'hui, cette méthode est très prometteuse pour la perception générale des conditions humaines. En outre, l'utilisation de capteurs de mouvement couplés à des applications avec de nouvelles techniques peuvent permettre de réaliser à faible coût, de manière efficace et précise, une étude d'aide au traitement des troubles résultant de maladies neuro-dégénératives.

L'analyse d'images a montré un grand potentiel dans le domaine médical, notamment dans le diagnostic de la maladie d'Alzheimer, de la maladie de Parkinson et de la sclérose en

plaques. L'application de ces méthodes peut encore améliorer la capacité à analyser des données d'images multimodales complexes et améliorer l'efficacité de ces diagnostics [17].

III. MATÉRIEL ET MÉTHODE

A. Matériel

Les données initiales ont été obtenues avec une caméra d'ordinateur portable RVB HD standard avec une résolution HD de 1280x720 à 30 ips. Deuxièmement, nous utilisons la caméra RealSense D455i et un capteur RVB et CMOS avec une résolution de 1280x720 à 90 ips.

À l'aide d'un programme développé en JavaScript, il a été possible de visualiser les données reçues par la caméra, comme le montre la figure 3. Lors de l'utilisation du programme, il faut d'abord choisir la caméra qui sera utilisée, puis déterminer le temps d'échantillonnage, qui peut être réalisé en 10, 20 ou 30 secondes. Bien entendu, il est toujours possible de déterminer le type de rendu visuel qui sera effectué.

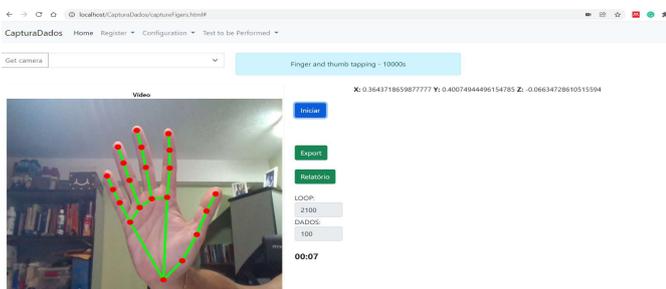


Fig 3 – Écran de capture de données

Dans l'image, nous avons les 21 points identifiés de la main. A la fin du temps de lecture, il est possible de générer un rapport ou d'effectuer une nouvelle lecture. Lorsqu'un nouveau rapport est généré, un graphique est présenté, regroupant tous les points lus. Seules les coordonnées x et y du détecteur sont prises en compte, et chaque entrée nulle d'image est vérifiée et rejetée lorsque la main n'est pas présente ou que l'image est floue. Ci-dessous, la figure 4 montre le graphique avec les 21 points de la main représentés. Lorsque le curseur est arrêté sur l'une des lignes, les valeurs x et y sont affichées, comme le montre la figure ci-dessous.

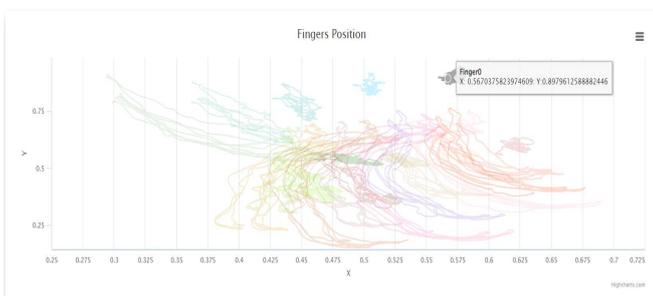


Figure. 4 - Graphique linéaire de mouvement en coordonnées x et y

A partir de cette étape du programme, il est possible de continuer le processus pour stocker plus de points comme

ceux déjà obtenus, ou de relancer le processus. Si les informations de lecture sont satisfaisantes, il est possible de générer une feuille de calcul .csv avec les données obtenues en appuyant sur le bouton d'exportation. Des informations sur la personne, telles que le nom, l'âge et le sexe, sont demandées. Ces données, ainsi que le code du type de lecture effectuée, doivent composer le nom du fichier. Exemple name_age_sex_codxx.csv

Avec ces données stockées, il est possible d'effectuer la recherche disponible dans le programme et de sélectionner l'individu et le test effectué.

La figure 5 montre cet écran dans lequel il est possible de sélectionner le graphique avec les 21 points à lire ou d'individualiser chacun et ses graphiques. Dans la figure 6, seul le point 0 sélectionné est affiché.

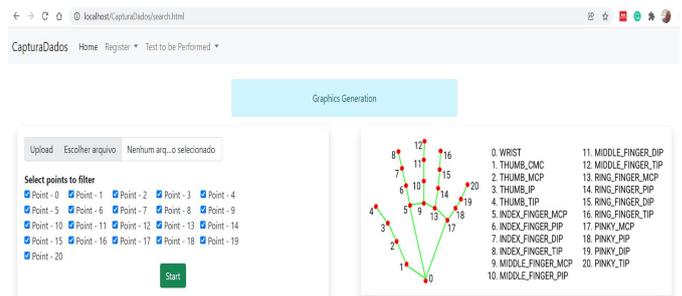


Fig 5 – Écran pour sélectionner le point à fichier

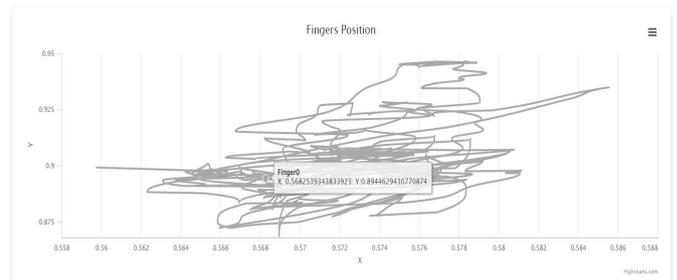


Fig 6 - Graphique du point 0

Le mouvement représenté sur le graphique de la figure 6 concerne le point 0 et sa variation est visualisée sur les axes x et y. Sur la figure 7, le même point 0 est représenté, mais cette fois par rapport à l'axe z. Dans ce graphique, la taille du cercle indique la position par rapport à la distance z. Cet axe représente la distance entre le point et la caméra.

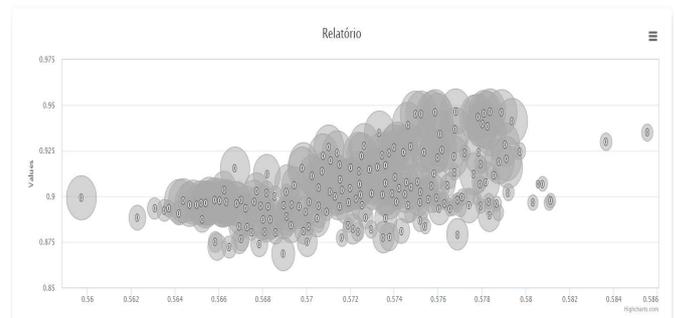


Fig 7 - Graphique du point 0 avec l'axe z

Dans l'analyse des données obtenues, la suggestion est de valider environ 95% des données dans la représentation du modèle souhaité, où les données initiales qui peuvent être corrompues ou invalides sont rejetées. Un calcul approximatif est effectué pour déterminer les variations de l'intervalle de temps sélectionné avec les valeurs obtenues. Dans l'intervalle de 10 secondes, une moyenne de 5670 mesures ont été effectuées, se référant aux 21 points.

En excluant les 210 premières mesures, nous avons environ 5460 mesures valides. Selon l'équation (1)

$$mv = md - 210 \quad (1)$$

où md sont les mesures prises et mv sont les mesures valides.

Ensuite, la moyenne des échantillons à la position 0 est déterminée, ce qui indique s'il y a eu un changement significatif dans le positionnement de la main. Dans l'exemple, cela représente 5460/21, ce qui donne 260 échantillons au point 0, et la moyenne est prise. En cas de changements importants, une nouvelle lecture est proposée ou, selon le spécialiste, ces données peuvent être conservées.

IV. Résultats

Selon les données obtenues, il a été possible de déterminer que la méthode aide à identifier la variation des points sur la main. Ces données peuvent provenir d'un seul point ou d'une comparaison de points et les valeurs obtenues entre eux peuvent être représentées graphiquement. Les points à analyser ou à comparer sont définis par le spécialiste qui aura la liberté de choix, car les valeurs nécessaires pour effectuer cette analyse ont déjà été obtenues et stockées.

V. Conclusion

Les données obtenues grâce à la caméra permettent d'interpréter le positionnement des doigts et de la main par rapport au référentiel de la caméra. Cette information peut permettre au spécialiste d'identifier plus facilement une augmentation ou une diminution du degré d'un trouble neurologique tel que la maladie d'Alzheimer.

De nombreuses autres applications peuvent être envisagées, comme dans le domaine de la kinésithérapie où ce système peut être utilisé, dans la récupération des mouvements des doigts en chirurgie correctrice, par exemple.

References

- [1] Zennaro, S., P. and Bernardi, A. and Ghidoni, S. and Menegatti, E., Performance evaluation of the 1st and 2nd generation Kinect for multimedia applications, IEEE, 2015
- [2] Mutto, C. and Zanuttigh, P. and Cortelazzo, G. M., Time of flight Cameras and Microsoft KinectTM, editora Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [3] Organização Pan-Americana de Saude - OPAS. OPAS Brasil, 2020 disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/9-12-2020-oms-revela-principais-causas-morte-e-incapacidade-em-todo-mundo-entre-2000-e> – Acesso em 20/01/2022
- [4] Dror, Ben, Eilon Yanai, Alex Frid, Nimrod Peleg, Nadav Goldenthal, Ilana Schlesinger, Hagit Hel-Or, Shmuel Raz, Automatic Assessment of Parkinson's Disease From Natural Hands Movements Using 3D Depth

- Sensor, Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEE (2014)
- [5] Hartson, R. and Pyla, P. S., The UX Book -- Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience, Editora Morgan Kaufmann, 2012.
- [6] Zennaro, S. and Munaro, M. and Milani, S. and Zanuttigh, P. and Bernardi, A. and Ghidoni, S. and Menegatti, E., Performance evaluation of the 1st and 2nd generation Kinect for multimedia applications, IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), pages 1-6, (2015)
- [7] Mutto, C. and Zanuttigh, P. and Cortelazzo, G. M., Time of flight Cameras and Microsoft KinectTM, The Universal Access Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg pages 17-47 (2013)
- [8] Regazzoni, G. de Vecchi, and C. Rizzi, RGB cams vs RGB-D sensors: Low cost motion capture technologies performances and limitations, Journal of Manufacturing Systems, vol. 33, no. 4, pp. 719-728, 2014. doi:10.1016/j.jmsy.2014.07.011.
- [9] Qiannan Li, Yafang Wang, Andrei Sharf, Ya Cao, Changue Tu, Baoquan Chen, Shengyuan Yu, Classification of gait anomalies from Kinect, IEEE. (2016)
- [10] Castro, M. C. L., J. P. A. Xavier, P. F. F. Rosa, and J. C. de Oliveira, "Interaction by Hand-Tracking in Virtual Reality" SBCOPENLIB Anais do simposio de realidade virtual e aumentada (SVR) Novembro 2020. DOI: https://doi.org/10.5753/svr_estendido.2020.12954.
- [11] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., Mcclanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C., Yong, M. G., Lee, J. Chang, W., Hua, W., Georg, M. and Grundmann, M., MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines, Google Research, arXiv:1906.08172v1, Jun 2019
- [12] MEDIAPIPE, soluções ML personalizadas e multiplataforma, recuperado 13 dezembro 2021, de <https://github.com/google/mediapipe>.
- [13] Bazarevsky, V. I. Grishchenko, K. Raveendran, T. Zhu, F. ZhangG, and M. Grundmann "Blaze Pose: On-device Real-time Body Pose tracking" arXiv:2006.10204v1 [cs.CV] 17 Jun 2020
- [14] Arpita H. and Akshit T. Real-Time Vernacular Sign Language Recognition using MediaPipe and Machine Learnig – International Journal of Research Publication and Review – Journal homepage : www.ijrpr.com ISSN 2582-7421 pg 9 – 17 may 2021
- [15] Das, P., Ahmed, T., and Ali, M. F. Static Hand Gesture Recognition for American Sign Language using Deep Convolutional Neural Network. In november 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP) 2020, June.(pp. 1762-1765). IEEE.
- [16] Farnood Gholami, Daria A. Trojan, J'ozsef K'ovecses, Wassim M. Haddad, *Fellow, IEEE*, and Behnood Gholami, A Microsoft Kinect-Based Point-of-Care Gait Assessment Framework for Multiple Sclerosis Patients, IEEE Journal of biomedical and Helath Informatics (2017).
- [17] Lacramioara Dranca, Lopez de Abetxuko Ruiz de Mendarozketa, Alfredo Goñi, Arantza Illarramendi, Irene Navalpotro Gomez, Manuel Delgado Alvarado and Maria Cruz Rodriguez-Oroz. In: BMC Bioinformatics (2018). DOI: s12859-018-2488-4.
- [18] Brito, E. N. D. B., Figueiredo, B. Q., Souto D. N., Nogueira J. F., Melo A. L. S. C., Silva, I. T., Oliveira, I. P. and Almeida M. G. Inteligencia Artificial no diagnostico de doenças Neurodegenerativas: Uma revisão sistematica de literatura. Research, Society and Development, V. 10 ISSN 2525-3409 – set. 2021

Système de mesure de l'angle sol - assise pour l'apprentissage du deux roues en fauteuil roulant manuel : Étude préliminaire

Antonio PINTI

Laboratoire LARSH DeVisu, Université Polytechnique
Hauts-de-France, Valenciennes, France.

antonio.pinti@uphf.fr

Atef BELGHOUL

Laboratoire LARSH DeVisu, Université Polytechnique
Hauts-de-France, Valenciennes, France.

Eric WATELAIN

Laboratoire IAPS, UR 201723207F, Université de
Toulon, France

Rawad EL HAGE

Department of Physical Education, Division of
Education, Faculty of Arts and Sciences, University of
Balamand, Kelhat El-Koura, Liban.

Résumé— Les utilisateurs de Fauteuils Roulants Manuel (FRM) peuvent rencontrer des obstacles environnementaux tels que des marches ou des trottoirs qui limitent leur déplacement. Afin de surmonter ces obstacles, des compétences motrices spécifiques doivent être acquises notamment de savoir-faire du deux roues. Il s'avère ainsi intéressant de mieux comprendre comment est acquis cette capacité d'équilibre sur 2 roues (2R). Pour répondre à cette problématique, nous avons développé un système de mesure angulaire positionné sous le siège d'un FRM. Celui-ci comprend un système complet permettant d'évaluer quantitativement la position d'équilibre pour les nouveaux utilisateurs de FRM. Un capteur optique connecté à un Raspberry Pi pour enregistrer l'angle entre l'assise et le sol, durant toute la phase d'apprentissage a été utilisé. Les données angulaires sont visualisées en différé afin d'observer la dynamique et le nombre de basculements réalisés. L'utilisation de notre système d'analyse de mouvement angulaire d'un FRM pour l'apprentissage de l'équilibre sur 2R montre ses avantages. Les résultats sont encourageants et montrent l'utilité de ce système afin d'analyser les basculements durant l'apprentissages de l'équilibre du 2R en FRM.

Mots Clés— Apprentissage moteur, fauteuil roulant manuel, deux roues, mesure angulaire, handicap, équilibre.

I. INTRODUCTION

Les personnes utilisant un fauteuil roulant font face à plusieurs difficultés. En effet, dans la vie active, le moindre obstacle peut se présenter comme une vraie difficulté qui empêche à ces personnes à mobilité réduite de se déplacer et de mener à bien les différentes tâches de leur quotidien. C'est notamment le cas pour ceux dont l'utilisation du fauteuil roulant est nécessaire pour bouger, se déplacer à la maison ou en ville. Ce matériel médical représente un élément essentiel dans la vie des personnes à mobilité réduite (PMR). Ils sont environ 380000 en France à utiliser ce matériel d'assistance. Il a été démontré qu'il existe une relation positive entre la participation sociale et les habiletés en fauteuil roulant manuel chez les PMR ayant une lésion de la moelle épinière [1]. L'apprentissage du deux roues en Fauteuil Roulant Manuel (FRM) reste parmi les difficultés majeures des usagers. D'après Kirby et al. (2006) [2], la position de deux roues (2R) se définit par une situation où il y a un soulèvement des 2 roues avant provoqué intentionnellement par le sujet, tandis que les 2 roues arrière restent continuellement en contact avec le sol. La maîtrise de ce mouvement est indispensable pour passer en toute sécurité les petits obstacles comme un trottoir ou des trous. Cette compétence diminue le risque de blessures liées aux obstacles ou à la descente de plans inclinés, et soulage les pressions qui peuvent agir sur le cou de l'utilisateur. De ce fait, sans l'acquisition

de cette habileté, leur possibilité de se déplacer en fauteuil roulant de façon autonome est encore limitée. Bonaparte et al. (2001) [3], a montré qu'il y a 3 étapes pour maintenir l'équilibre sur deux roues : - 1) décolllement des 2 roues avants, - 2) balancement, - 3) retour sur 4 roues. Durant cette période d'apprentissage, les sujets handicapés moteurs sont amenés à faire basculer le fauteuil vers l'arrière sans perte d'équilibre. Ceci justifie la nécessité de poursuivre des travaux de recherche sur l'angulation du fauteuil durant l'apprentissage pour mieux comprendre le fonctionnement de l'apprentissage expérimental de l'habileté motrice. Afin d'évaluer statistiquement les paramètres de l'angulation, il faudra utiliser un nouveau système de mesure angulaire sans contact développé sur Raspberry Pi 4 dans notre laboratoire [4]. Ces données permettront de comprendre les étapes d'apprentissage de l'initiation à la maîtrise du mouvement volontaire. La problématique abordée dans cette étude est de valider un nouveau système de mesure angulaire sans contact utilisant un capteur optique de télémétrie adaptable sur FRM. Dans le détail, notre travail de recherche a pour perspective d'utiliser cet angle pour l'apprentissage de cette habileté et d'en déduire le temps d'apprentissage.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'expérimentation nécessite un fauteuil roulant manuel pour réaliser l'apprentissage. Un ordinateur associé à une webcam professionnel permet de filmer le sujet au cours de l'apprentissage. Un logiciel d'analyse vidéo est utilisé à posteriori pour analyser l'apprentissage (Kinovea version 0.9.5). Un système de mesure angulaire sans contact sur Raspberry Pi 4, connecté à un capteur télémétrique, adaptable sur fauteuil roulant (Figure 1) enregistre la distance sol – siège en temps réel à une fréquence de 3 Hz. Cette fréquence d'échantillonnage est suffisante pour enregistrer un mouvement de basculement qui est relativement lent même en cas de déséquilibre. Un écran tactile du système Raspberry pi permet la mise en fonctionnement et la visualisation de l'état de fonctionnement du système et de l'angle mesuré. L'enregistrement des angles est réalisé en temps réel et stockés en mémoire. Le système développé permet

de récupérer les données enregistrées de façon intuitive sur une clef USB au format excel pour une analyse de l'apprentissage.



Figure 1 : Système de mesure angulaire

La figure 1 présente le système d'acquisition Raspberry pi connecté au capteur optique.



Figure 2 : Matériel de l'expérience

Sur la figure 2 est montré le fauteuil roulant manuel et la caméra d'enregistrement de la séance d'apprentissage.

Protocole :

L'expérience consiste à l'enregistrement de la distance sol siège durant une séance d'apprentissage sur un sujet sain. L'angle est calculé à partir de cette distance par rapport à la rotation du fauteuil roulant. Une séance d'apprentissage dure 30 minutes environ avec des périodes de 3 minutes d'apprentissage suivi de 30 secondes de repos. En effet, la fatigue vient rapidement et le repos entre les efforts permettent de récupérer de la force. L'objectif est que l'apprenant intègre corporellement l'angulation de l'équilibre de façon répétée. Il peut ainsi ressentir sa position d'équilibre en toute sécurité. Pour assurer la sécurité,

l'aidant est durant tout l'apprentissage à l'arrière du FRM. Il permet de garantir la sécurité du sujet en bloquant le fauteuil en cas de basculement (figure 2) à l'aide des poignées situées à l'arrière du FRM. Le système de mesure angulaire complet (écran, capteur, câbles, clé Usb) a été installé sur le fauteuil roulant et afin de mesurer l'angle du sol-assise. Le capteur de distance infrarouge est fixé sous le siège du fauteuil. À l'aide de l'écran LCD tactile placé derrière le dossier du fauteuil, il est possible d'interagir avec le système : démarrage/pause/arrêt des mesures, exporter des données vers clé USB.



Figure 3 : Position d'équilibre du sujet.

Sur la figure 3 est présentée la manoeuvre utilisée par l'aidant pour rechercher la position d'équilibre du sujet.

Analyse à l'aide du logiciel Kinovea

Kinovea a été utilisé pour récupérer toutes les sorties (images et vidéos) de la caméra [5]. La vidéo enregistrée est vérifiée pour observer les événements survenus durant l'apprentissage. Ce système n'est pas synchronisé au système d'acquisition Raspberry pi. Il permet à posteriori, l'analyse visuelle de la séquence et ainsi de mieux comprendre les événements qui peuvent se produire durant un enregistrement. Les figures 4 et 5 montrent deux exemples d'une démarche d'apprentissage du deux roues à l'aide de Kinovea. Pendant l'apprentissage,

les angles changent par rapport au mouvement. Les paramètres déterminés dans cette étude sont les variations d'angle par rapport au cycle d'apprentissage. Les données sont stockées selon le sujet et les nombres d'essais.



Figure 4 : video enregistrée sur Kinovea avec une barre d'analyse.



Figure 5 : Vue de l'écran Kinovea de la mise en position d'équilibre du FRM avec le sujet.

Le logiciel Kinovea permet d'extraire des angles associés au moment d'enregistrement. Il permet de rejouer les mouvements et il permet de visualiser le sujet au cours de toute la phase d'apprentissage. Ainsi, certains phénomènes non-visible sur une courbe pourraient être visualisés et interprétés afin d'enrichir l'analyse de cette période.

III. RÉSULTAT

La figure 6 montre les changements angulaires à partir de la position de référence repos (zéro) d'une séance d'apprentissage d'un participant de 31 mn et

52 sec. Ces mesures ont été réalisées avec le système d'acquisition angulaire et visualisées après l'enregistrement d'une séance complète d'apprentissage.

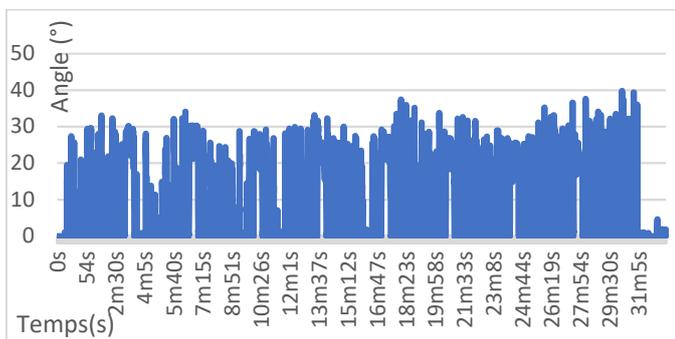


Figure 6 : Courbe de l'angle sol-assise d'une séance d'apprentissage

A partir de cette courbe, on remarque qu'au début de l'apprentissage, l'angle sol assise est de 0 degré jusqu'à la 15^{ème} seconde. Cela peut s'expliquer par le fait que le participant se positionne de façon optimale afin de démarrer les basculements. Après le système commence à afficher des données, dont l'angle varie entre 1 à 32 degrés les 3 premières minutes d'apprentissage. L'angle d'équilibre pour ce sujet est autour de 30 degrés. On peut remarquer, au cours de l'apprentissage que des améliorations peuvent être observées au cours d'une seule séance d'entraînement. Ce participant s'est montré très motivé durant toute la phase d'apprentissage. On observe des brèves périodes de pauses, mais le rythme ne se ralentit pas durant toute la séance.

Enfin, on peut remarquer aussi que le nombre de chute est inexistant (le moment où la participant tombe en arrière). On remarque également que le sujet ne prend pas de pause entre les pauses imposées toutes les 3 mn.

IV. CONCLUSION

Le système développé sur la base d'un raspberry pi connecté à un capteur de mesure optique permet de mesurer l'angle du sol-assise, en temps réel pendant l'apprentissage à une fréquence de 3 Hz. Les perspectives de cette étude seraient d'utiliser ce système pour calculer la durée et le nombre d'essais sur une population saine puis pathologique, afin de mesurer l'impact de plusieurs méthodes d'apprentissage sur le temps et les difficultés d'apprentissage du deux-roues.

REFERENCES

- [1] Kilkens OJE, Post MWM, Dallmeijer AJ, Van Asbeck FWA. (2005). Relationship between manual wheelchair skill performance and participation of persons with spinal cord injuries 1 year after discharge from inpatient rehabilitation. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 42(3): 65-73.
- [2] Kirby, R. L., Smith C., et al. (2006). "The manual wheelchair wheelie: a review of our current understanding of an important motor skill." *Disabil Rehabil Assist Technol* 1(1-2): 119-27.
- [3] Bonaparte, J. P., Kirby R. L., et al. (2001). "Proactive balance strategy while maintaining a stationary wheelie." *Arch Phys Med Rehabil* 82(4): 475-9.
- [4] Infrared Distance Measurement with the Raspberry Pi. [En ligne]. Disponible : <https://raspberrypi-tutorials.fr/mesure-de-la-distance-infrarouge-avec-raspberry-pi-sharp-gp2y0a02yk0f/>
- [5] <https://www.kinovea.org/features.html>

Index des auteurs

- Abreu Rosa de Sá Angela, 35, 40
Afonso Lamounier Júnior Edgard, 35, 40, 81
Ahanou Ikram, 67
Alves Marques Isabela, 35, 40, 81
Alves Pereira Adriano, 35, 40, 81
Andriamahery-Ranjalahy Ken, 155
- Balssa Floriane, 169
Baltenneck Nicolas, 24
Barbet Isabelle, 116
Barbot-Bouzit Caroline, 149
Bard Krupa Daphné, 135
Baumann Jean, 75
Bekaert Marie-Hélène, 75
Belghoul Atef, 180
Bergerault Foucauld, 67
Bobillier-Chaumon Marc-Eric, 116
Boisadan Andréa, 22
Bouillon Pierrette, 46
Bourhis Guy, 35, 40, 81
Bousefsaf Frédéric, 129
Buisine Stéphanie, 22
- Calla Soline, 140
Callupe Luna Jhedmar, 55
Cardoso Mendes Luanne, 35, 40, 81
Carlier Axel, 61
Celso Freire Junior José, 176
Chalvet Vincent, 55
Charvillat Vincent, 61
Cheramy Maxime, 67
Chottin Marion, 121
Cuarelli Gilberto, 176
Culpin Alexis, 161
- Dao Son Duy, 87
David Bastien, 46
de Aguiar Wagner, 176
- de Oliveira Andrade Adriano, 35, 40, 81
Debloos Justin, 149
Degallaix Thomas, 67
Desquins Théo, 129
Desvergnés Julien, 61
Djeldjli Djamaledine, 129
Djoussof Lilia, 87
Dupré Estelle, 161
- El Hage Rawad, 180
Elias Dante, 55
- Faupin Arnaud, 110
- Gay Simon, 87
Golliot Julie, 104, 135
Gorgol Alexandre, 67
Guerra Thierry-Marie, 29
- Henry Paul, 140
Hully Marie, 116
- Jost Céline, 149
Jouffrais Christophe, 61, 95
- Kokosy Anne-Marie, 67
- Le Pévédic Brigitte, 149
Lespinet-Najib Véronique, 169
Lázaro Martins Naves Eduardo, 35, 40, 81
- Maaoui Choubeila, 129
Macé Marc, 95
Maire David Luiz Luiza, 35, 40, 81
Marques Alves Camille, 35, 40, 81
Maury Laurent, 25, 104, 135
Mbakop Steeve, 67
Monacelli Eric, 55
Monteiro Oliveira Fábio Henrique, 35, 40, 81
Morère Yann, 35, 40, 81

Mutal Jonathan, [46](#)

Ngo Mai-Anh, [110](#)
Nguyen Anh-Tu, [29](#)

Oriola Bernard, [95](#)
Oukhrif Ali, [67](#)
Ouzar Yassine, [129](#)

Pino Pierre, [35](#), [40](#), [81](#)
Pinsault Nicolas, [140](#)
Pinti Antonio, [180](#)
Piquard-Kipffer Agnès, [149](#)
Pissaloux Edwige, [87](#)
Pradon Didier, [110](#)
Pruski Alain, [129](#)
Pudlo Philippe, [29](#)

Ramos Rosa Rodrigo, [35](#), [40](#), [81](#)
Retaux Xavier, [23](#)
Rodrigues Lima Kennedy, [35](#), [40](#)
Romeo Katerine, [87](#), [121](#)

Saey Phillipe, [67](#)
Sandoval Amélie, [116](#)
Sargsyan Elen, [95](#)
Serrano Marcos, [95](#)
Spechbach Herve, [46](#)
Srihi Hajer, [29](#)
Strasly Irene, [46](#)

Tagne Gilles, [67](#)
Taly Antoine, [161](#)
Tannus Julia, [81](#)
Thomann Guillaume, [140](#), [176](#)
Thompson Hannah, [121](#)
Tomaszewski Jean, [140](#)
Truillet Philippe, [155](#)
Truong Ngoc Tan, [87](#)

Uzan Gérard, [149](#), [161](#)

Vannobel Jean-Marc, [75](#)
Vieira Fraga Marcus, [35](#), [40](#), [81](#)
Vigié Opale, [110](#)
Vilain Bruno, [26](#)
Villi Hugo, [140](#)

Watelain Eric, [110](#), [180](#)

Crédits

Ces actes ont été produits à l'aide des logiciels libres suivants :

- L^AT_EX <http://latex-project.org/> pour la génération des actes ;
- Geany <http://www.geany.org/> et Perl <http://www.perl.org/> pour la programmation de l'automatisation de la génération du document L^AT_EX ;
- Blender <https://blender.org> et Inkscape <https://inkscape.org/fr/> pour la création des logos et de la page de garde.

Pour plus d'informations sur les logiciels libres :

- http://fr.wikipedia.org/wiki/Logiciel_libre
- <http://www.france.fsfeurope.org/index.fr.html>
- <http://www.cecill.info/>
- <http://www.aful.org/>
- <http://www.gnu.org/home.fr.html>

Maquette
Yann Morère
Logo/Couverture
Yann Morère

Imprimé à Lyon

Dépôt légal : juin 2022

ISBN 978-2-9571218-2-3



9 782957 121823

Handicap 2022
© IFRATH 2022