



HAL
open science

Projet A-PIED : Aider les PIETons à se Déplacer en milieu urbain, Rapport final de convention

Margarita Anastassova, Aurélie Dommès, Aline Chevalier

► To cite this version:

Margarita Anastassova, Aurélie Dommès, Aline Chevalier. Projet A-PIED : Aider les PIETons à se Déplacer en milieu urbain, Rapport final de convention. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2015, 94p. hal-01545707

HAL Id: hal-01545707

<https://hal.science/hal-01545707>

Submitted on 23 Jun 2017

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

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



Responsables des recherches :

Margarita Anastassova, CEA / LIST - LISA

Aurélie Dommès, IFSTTAR - LEPSIS

Aline Chevalier, Université Toulouse Jean Jaurès - CLLE / CNRS

Projet A-PIED : Aider les PIEtons à se Déplacer en milieu urbain

Rapport final de convention

PREDIT 4 – Qualité et sécurité des systèmes de transport
Appel à propositions « Continuité des chaînes de déplacements »
Convention de subvention n° 10-MT-PREDITG02-3-CVS-074
Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer
Direction de la Recherche et de l'Innovation

Novembre 2015



Auteurs contributeurs au rapport :

Farah Arab, Gwénaél Changeon, Fanny Le Morellec, Sabrina Panëels, Florent Souvestre, et Margarita Anastassova
CEA / LIST - LISA

Stéphanie Cœugnet, Thong Nguyen Dang, Fabrice Vienne, et Aurélie Dommes
IFSTTAR - LEPSIS

Aline Chevalier
Université Toulouse Le Mirail - CLLE / LTC

Les laboratoires de recherche impliqués :

Institut LIST – CEA Saclay Nano-INNOV
Bâtiment 861, Boîte postale 173, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
margarita.anastassova@cea.fr ; 01 69 08 02 20

IFSTTAR - LEPSIS
25 allée des Marronniers, 78000 Versailles, France
aurelie.dommes@ifsttar.fr ; 01 30 84 39 43

Université de Toulouse Jean Jaurès - CLLE / LTC
5 allée A. Machado, 31058 Toulouse Cedex, France
aline.chevalier@univ-tlse2.fr ; 05 61 50 35 31

Résumé

Parce qu'ils n'ont aucune protection, les piétons font partie des usagers de la route les plus vulnérables aux accidents mortels. Si les piétons sont des usagers vulnérables, les piétons âgés le sont doublement en raison des déclin perceptifs, cognitifs et physiques qui les rendent plus disposés à être impliqués dans un accident (par des temps réaction ralentis, des stratégies peut-être moins flexibles, ou encore des décisions parfois dangereuses). Les accidents leur sont également plus fatals, avec une probabilité d'en réchapper moindre. Ces accidents sont aussi liés à leur mode de déplacement préférentiel qui, avec l'âge, est le plus souvent à pied.

La promotion de la marche à pied dans nos villes, et à tous les âges de la vie, est aujourd'hui d'actualité pour répondre notamment aux enjeux soulevés par le changement climatique, la pollution, la mobilité d'une population vieillissante, et plus généralement la santé (ex. lutte contre l'obésité), la marche étant conçue comme une solution attrayante et complémentaire au déplacement motorisé. Toutefois, la sécurité des piétons en France est loin d'être totalement garantie. Par exemple en 2012, 489 personnes sont décédées dans un accident piéton, et la plupart étaient âgés de plus de 75 ans (ONISR, 2013).

L'amélioration de la sécurité des cheminements piétons peut s'envisager par des modifications d'infrastructure. Cependant, ces dernières restent très coûteuses et longues à mettre en place. Un moyen moins coûteux et plus rapide consisterait à fournir aux usagers piétons une aide technique efficace et adaptée. Dans ce contexte, le projet A-PIED a deux objectifs principaux : (i) analyser les besoins des piétons âgés pour des interfaces multisensorielles d'aide à la traversée de rue et à l'orientation en milieu urbain, ainsi que l'acceptabilité de ces interfaces ; (ii) tester une solution technologique innovante et originale, basée sur une interface vibrotactile portée sur le poignet, pour aider le piéton à émettre des décisions sécuritaires de traversée de rue et à mieux s'orienter en ville, notamment dans des zones d'échanges et d'interconnexion.

Le projet A-PIED ne vise pas au développement de cette technologie, qui est déjà disponible au CEA. L'idée est de l'adapter aux besoins du piéton dans le contexte de la traversée de rue et de la navigation en partant de l'hypothèse que les informations vibrotactiles pourraient avoir un apport en termes de réduction du temps de réaction, d'amélioration de la sécurité et de focalisation de l'attention sur des éléments décisifs pour la réalisation de la tâche principale de marche à pied. A notre connaissance, aucun dispositif ne répond aujourd'hui à ces enjeux. Ceci est l'originalité principale du projet A-PIED.

La première phase du projet a visé à recenser les habitudes d'utilisation des aides à l'orientation et à la navigation avec l'âge. Les résultats de plusieurs enquêtes (un workshop auprès de 7 personnes âgées et deux questionnaires en ligne auprès de 359 individus au total) révèlent que Internet, les GPS, les cartes et les plans, la signalétique et les repères, et enfin l'aide humaine sont les principales ressources externes utilisées par les individus pour s'orienter dans une ville. On note peu de variations avec l'âge, si ce n'est une légère tendance à moins y recourir, notamment pour ce qui concerne les aides à caractère technologique (ex. Internet et GPS). Ce résultat pourrait néanmoins provenir d'un effet de cohorte (les plus âgés d'aujourd'hui utilisent peu les technologies de l'information et de la communication, ce qui ne sera vraisemblablement plus le cas d'ici une vingtaine d'années).

Trois études ont ensuite été réalisées afin d'identifier le contenu et la forme des stimulations vibrotactiles à présenter aux futurs utilisateurs. Ces études menées lors de la première année du projet ont permis d'adapter un dispositif d'aide existant aux besoins des piétons âgés en particulier. Ce dispositif est un bracelet vibrotactile qui a été développé par le CEA/LIST dans le cadre d'autres projets sur la navigation piétonne. Ce bracelet permet de délivrer des messages à l'utilisateur sous la forme de motifs vibratoires indiquant par exemple, une alerte (ex. : vibration forte tout autour du poignet) ou une direction à prendre (ex. : message qui repose sur l'activation de vibreurs se situant à droite ou à gauche du poignet). Ces messages sont conçus en variant un certain nombre de paramètres physiques des vibrations (ex. : rythme, amplitude, durée, localisation, répétition).

La deuxième année du projet a consisté en une phase d'évaluation de l'efficacité, de l'utilisabilité et de l'acceptabilité du bracelet vibrotactile. Deux études ont été menées auprès de participants jeunes et plus âgés.

La première étude a testé le bracelet dans une tâche de traversée de rue sur simulateur. Un message vibrotactile était transmis au poignet du participant lorsque la situation était dangereuse et ne lui permettait pas de traverser en toute sécurité. Les résultats de cette étude menée auprès de 57 participants jeunes et plus âgés montrent un réel bénéfice du bracelet, en termes de sécurité des décisions de traversée de rue, avec une diminution de moitié du pourcentage de décisions dangereuses (décisions qui ont mené à une collision avec un véhicule à l'approche). Le bracelet a diminué le risque de collisions dans tous les groupes d'âge, mais avec un bénéfice qui semble plus fort chez les piétons les plus à risque, à savoir les femmes très âgées (> 70 ans). Si le bracelet réduit de moitié les décisions dangereuses, il ne les réduit totalement pas à zéro, car un message sur deux est en moyenne non perçu ou « défié » (i.e. non suivi), quel que soit l'âge des participants. Des études futures devront être menées afin de déterminer pourquoi et dans quelles conditions l'utilisateur émet un avis contraire au message vibrotactile (il ne perçoit pas ou défie la technologie ?). Finalement, les données subjectives recueillies auprès des participants montrent des avis globalement très positifs en termes de facilité et d'utilité perçues. Alors que l'intention comportementale est nulle chez les participants jeunes (0%), 40% des participants âgés et très âgés déclarent vouloir utiliser à l'avenir ce type de dispositif d'aide à la traversée de rue. A noter que les participants âgés et très âgés s'avouent par contre être anxieux envers les technologies.

Une dernière étude visait cette fois-ci à tester le bracelet dans une tâche de navigation piétonne sur simulateur, le bracelet guidant l'individu à s'orienter correctement dans une ville virtuelle (ex. le bracelet vibre à droite du poignet pour signifier au piéton de tourner à droite au prochain croisement). Les résultats de cette étude menée auprès de 58 piétons jeunes et âgés montrent un réel bénéfice du bracelet en termes d'orientations correctement prises (gauche/droite) dans des intersections simples (carrefours en T) et de temps de parcours plus courts avec le bracelet plutôt qu'avec une carte en version papier. Ces bénéfices s'observent chez tous les participants qui le portent, mais sont encore plus forts chez les participants les plus âgés (> 70 ans). En revanche, le bracelet ne se révèle pas efficace dans le cas des carrefours complexes (à plus de 5 alternatives de directions), les participants montrant des erreurs de direction importantes (confusions dans la direction à prendre une fois le rond-point engagé, ex. tourner à la troisième rue à droite). Globalement, les données comportementales montrent que si le bracelet réduit les difficultés de navigation, il ne les réduit pas à zéro, car quelques messages ont parfois été non / mal perçus ou défiés, même dans des intersections simples (5%), les chiffres étant plus importants dans le cas des intersections complexes (environ 20% des messages non/mal perçus ou défiés). Le bracelet s'avère en effet efficace lorsque le message vibrotactile est compris et non défié. Des études ultérieures devront approfondir ces constats pour mieux comprendre dans quelles conditions et pourquoi certains messages vibrotactiles sont non/mal perçus ou défiés. Finalement, les avis subjectifs recueillis auprès des participants directement montrent des opinions globalement très positives. En termes d'utilisabilité et d'utilité perçues, le bracelet d'aide à la navigation est jugé utile et facile à utiliser quel que soit l'âge des participants. Mais alors que les très âgés rapportent un peu plus d'anxiété envers les technologies que les âgés et les jeunes, tous ont déclaré éprouver du plaisir à utiliser le bracelet. Ils sont également plus nombreux (75%) à déclarer avoir l'intention d'utiliser à l'avenir ce genre de bracelet d'aide à la navigation piétonne.

L'ensemble des travaux menés dans le cadre du projet A-PIED témoignent de l'utilité de poursuivre les études relatives aux déplacements piétons et aux aides technologiques à la mobilité piétonne. Restent encore bien des travaux de recherche à mener et des initiatives gouvernementales et locales à insuffler pour promouvoir la marche à pied comme un moyen sûr de se déplacer en ville. Plusieurs conclusions et perspectives de recherche sont proposées à la fin de ce rapport.

Table des matières

1. Contexte de la recherche.....	7
2. Etat de la question	8
2.1 Accidentalité des piétons.....	8
2.2. Difficultés de traversée de rue avec l'avancée en âge.....	9
2.3. Difficultés de navigation et d'orientation avec l'avancée en âge	10
2.4. Difficultés en zones d'échanges.....	12
2.5. Voies d'amélioration existantes et limites.....	12
2.6. Dispositifs d'aide aux déplacements des piétons	13
2.7. Vers des modes d'interaction alternatifs : la voie de l'haptique.....	14
2.8. Les notions d'utilisabilité et d'acceptabilité pour évaluer des systèmes d'aides	14
3. Objectifs du projet A-PIED.....	16
4. Utilisation d'aides à la navigation et à l'orientation par les piétons âgés.....	19
4.1. Atelier de travail avec 7 personnes âgées.....	19
4.2. Questionnaires en ligne	21
4.2.1 Questionnaire 1 auprès de 239 personnes âgées.....	21
4.2.2 Questionnaire 2 auprès de 120 personnes jeunes et plus âgées	22
4.3. Conclusions des premières enquêtes	24
5. Etudes itératives pour la conception et l'évaluation des messages vibrotactiles	26
5.1. Etude 1 : co-conception des messages vibrotactiles avec les utilisateurs.....	27
5.1.1. Recueil des métaphores	27
5.1.2. Conception des messages vibrotactiles	30
5.2. Etude 2 : choix des paramètres finaux.....	32
5.2.1. Méthode.....	32
5.2.2. Résultats	35
5.2.3. Synthèse de l'étude 2 sur les paramètres des messages vibrotactiles.....	39
5.3. Etude 3 : Etude pilote de l'efficacité de l'aide vibrotactile dans une tâche de navigation sur simulateur	40
5.3.1. Méthode.....	40
5.3.2. Contraintes et difficultés techniques	46
5.3.3. Résultats de l'étude pilote	47
5.3.4. Conclusions principales de l'étude pilote.....	48
6. Etude 4 portant sur l'évaluation de l'efficacité du bracelet vibrotactile dans une tâche de traversée de rue sur simulateur	49
6.1. Population.....	49
6.2. Bracelet vibrotactile utilisé dans l'étude 4.....	49
6.3. Simulateur de traversée de rue et tâche proposée aux participants	49

6.4. Questionnaires et tests	51
6.5. Procédure expérimentale	52
6.6. Données recueillies et analyses statistiques opérées	52
6.7. Résultats	53
6.7.1. Données comportementales de traversée de rue : efficacité du bracelet	53
6.7.2. Données portant sur les caractéristiques des participants.....	58
6.7.3. Données comportementales de traversée de rue : réponses correctes au bracelet	59
6.7.4. Données subjectives : réponses au questionnaire du Technology Acceptance Model	60
6.8. Synthèse des résultats de l'étude 4.....	63
7. Etude 5 : évaluation de l'efficacité du bracelet vibrotactile dans une tâche de navigation piétonne sur simulateur	64
7.1. Population.....	64
7.2. Description du bracelet vibrotactile utilisé dans l'étude 5 et tâche d'apprentissage associée	64
7.3. Simulateur de navigation piétonne	65
7.4. Tâche de navigation piétonne.....	65
7.5. Questionnaires et tests	66
7.6. Procédure expérimentale	67
7.7. Données recueillies et analyses statistiques opérées	68
7.8. Résultats	69
7.8.1. Données comportementales de navigation : efficacité du bracelet.....	69
7.8.2. Evaluation subjective du bracelet avec le questionnaire du TAM	74
7.8.3. Sentiment d'immersion dans la ville virtuelle	76
7.9. Synthèse des résultats de l'étude 5.....	77
8. Discussion générale, conclusions et recommandations	78
8.1. Le recours aux aides à la navigation avec l'âge	78
8.2. La conception centrée usagers d'une aide à la mobilité piétonne sollicitant le sens haptique ...	80
8.3. L'évaluation de l'efficacité, l'utilisabilité et l'acceptabilité d'un bracelet vibrotactile pour aider le piéton à traverser la rue et à s'orienter à pied dans une ville.....	82
8.4. Interprétations générales des résultats et perspectives	83
9. Communications et publications issues du projet	88
10. Références bibliographiques	89

1. Contexte de la recherche

Dans un contexte d'urbanisation croissante, la mobilité des piétons âgés constitue un enjeu majeur auquel la société doit faire face pour garantir l'autonomie des personnes et préserver leur qualité de vie tout en assurant leur sécurité. Sans assistance, la perte de mobilité peut entraîner un isolement, de l'anxiété et de la dépression (Lezzoni et al., 2001). Ce constat est d'autant plus d'actualité pour les personnes âgées dont le nombre ne cesse de croître et dont les limitations fonctionnelles entravent les déplacements.

Les recherches présentées dans ce rapport s'inscrivent dans le cadre du projet A-PIED (Aider les PIétons à se Déplacer en milieu urbain). Elles sont nées des préoccupations des partenaires du projet (CEA LIST, IFSTTAR/LEPSIS, Université de Toulouse Jean Jaurès/Laboratoire CLLE-UMR 5263) concernant le nombre alarmant d'accidents mortels et de blessés graves impliquant des piétons âgés, notamment en zone urbaine.

La complexité de l'environnement urbain (ex. multitude de moyens de transport en commun, diversité des usagers, voies réservées aux tramways ou aux vélos) se traduit par des difficultés d'orientation et des besoins d'aide au déplacement, y compris d'aide technologique. Ces difficultés peuvent d'ailleurs concerner autant les piétons âgés que le reste des groupes d'âge composant la population française. Conscients des difficultés rencontrées par les piétons, les partenaires du projet constatent que les systèmes d'aide au déplacement existants utilisent principalement la voie auditive ou visuelle (ex. applications GPS sur téléphone portable). L'une des limites de ces aides est que les personnes focalisent leur attention sur celles-ci, au détriment de la circulation routière, pouvant ainsi, sous certaines conditions, entraîner des accidents. Pourtant, de récentes recherches témoignent du bénéfice apporté par l'utilisation du sens du toucher (voie haptique), les informations vibrotactiles étant plus vite et plus facilement intelligibles par les utilisateurs (Pielot et al., 2012).

L'objectif principal du projet A-PIED est non pas le développement d'une technologie qui est déjà disponible au CEA LIST, mais l'évaluation de l'efficacité de celle-ci pour aider les piétons jeunes et plus âgés à naviguer à pied dans une ville.

Il s'agit d'une interface vibrotactile portée sur le poignet, i.e. un bracelet composé de trois vibreurs (cf. Figure 1 ci-dessous), pour assister et guider les décisions du piéton lors de la traversée de rue et de l'orientation en milieu urbain.

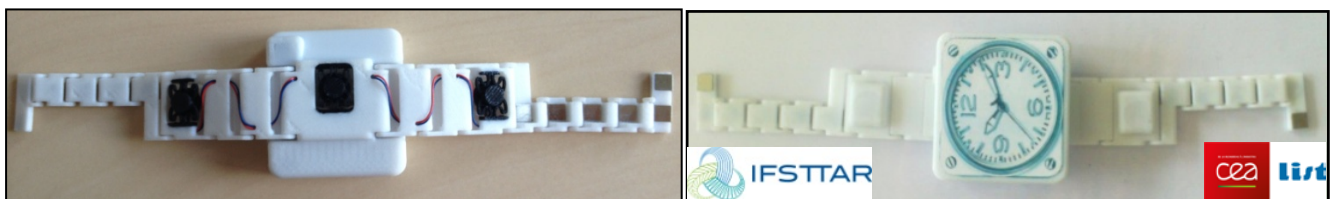


Figure 1. Bracelet à retours vibrotactiles développé et testé dans le cadre d'A-PIED

L'hypothèse sous-jacente est que d'utiliser la modalité haptique pour fournir des informations pourrait être utile en termes de réduction du temps de réaction et de focalisation de l'attention sur des éléments décisifs pour la réalisation des deux activités principales impliquées dans la marche pied, à savoir traverser la rue et trouver son chemin pour atteindre une destination. A notre connaissance, aucun dispositif ne répond aujourd'hui à ces enjeux, pourtant importants quand on estime que près d'un blessé sur cinq sur les routes en France est un piéton.

2. Etat de la question

2.1 Accidentalité des piétons

En 2012, 11 293 accidents corporels ont impliqué un piéton soit 18,6 % de l'ensemble des accidents. 489 piétons ont été tués soit 13,4 % de la mortalité routière (ONISR, 2013).

Les piétons sont une catégorie d'usagers qui, entre 2000 et 2010, a bénéficié d'une baisse d'un peu moins 40 % de sa mortalité. Mais cette baisse est moins forte que celle observée chez les conducteurs de voitures notamment. On observe même une hausse de la part des piétons tués dans les accidents. Cette hausse s'explique par le fait que cette catégorie est celle qui a le moins bénéficiée des effets de la politique de sécurité routière initiée en 2002 (réduction des vitesses et contrôles systématiques des véhicules). En effet, depuis 2000, la baisse des accidents corporels impliquant un piéton est de -35% et celle de la mortalité des piétons de -39%. Ces baisses sont bien moins élevées que celles de l'ensemble des accidents (-46 % de baisse pour l'ensemble des accidents corporels et -52% de baisse pour l'ensemble des décès, ONISR, 2012).

L'accidentalité piétonne est marquée par la surreprésentation des personnes âgées dans les statistiques d'accidents, et des tués particulièrement (cf. Tableau 1 ci-dessous).

	0-14	15-17	18-24	25-44	45-64	65-74	75 ans et +
Tués	36	8	31	54	102	57	201
%	7,4%	1,6%	6,3%	11,0%	20,9%	11,7%	41,1%
BH	895	212	351	590	863	495	805
%	21,3%	5,0%	8,3%	14,0%	20,5%	11,8%	19,1%

Tableau 1. Répartition des piétons tués et blessés hospitalisés par classe d'âge (ONISR, 2013)

La classe d'âge des personnes âgées de plus de 75 ans regroupait à elle seule en 2012 plus de 40% des piétons tués (soit 201 décès, 113 femmes et 88 hommes, voir Figure 2 ci-après). Ces statistiques alarmantes font des piétons âgés l'un des groupes d'usagers de la route les plus vulnérables aux accidents mortels. Pourtant, la marche à pied constitue le mode de déplacement le plus fréquemment utilisé par les personnes âgées (46%), après l'automobile (43%) et les transports en commun (8%) (CERTU, 2001).

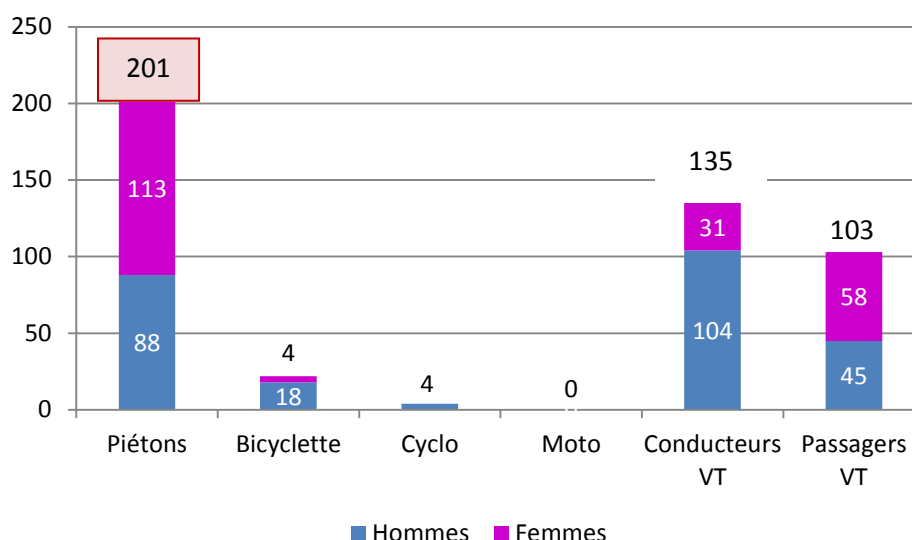


Figure 2. Personnes tuées de 75 ans et plus en 2012, selon le sexe et le mode de déplacement (ONISR, 2013)

2.2. Difficultés de traversée de rue avec l'avancée en âge

La traversée de rue est une des phases clé du déplacement à pied des piétons dans la ville, pouvant toutefois être une situation à risque en raison de la présence de véhicules circulant sur la chaussée et du risque de collisions en découlant.

Pour traverser la rue, le piéton est généralement face à deux solutions : (i) il utilise l'infrastructure, quand elle est adaptée, et traverse la rue sur un passage piéton signalisé (avec zébra et/ou présence de feux piéton/trafic) ; (ii) il traverse de lui-même, sans aide à la décision, parce que le passage piéton est trop loin ou absent de l'infrastructure dans laquelle il navigue. Lorsque le passage piéton n'est pas équipé de feux de signalisation ou que l'individu traverse en dehors d'un équipement dédié, il doit de lui-même décider du moment le plus opportun pour traverser. Il doit ainsi détecter le trafic, combiner des informations provenant parfois de plusieurs directions, déterminer si le temps restant avant que les véhicules à l'approche ne l'atteignent est assez long pour traverser, et enfin adapter son action à la perception continue du trafic à l'approche. La capacité indispensable à cette activité est donc de déterminer le temps disponible (qui est fonction du temps entre les véhicules à l'approche, lui-même fonction de leur distance/vitesse) et de le relier au temps nécessaire pour traverser (qui est fonction de facteurs environnementaux comme la largeur de la route, et de facteurs personnels comme la vitesse de marche ou la capacité d'accélération). Cette capacité à sélectionner un créneau de temps adapté pour traverser la rue a fait l'objet de nombreux travaux, autant dans le cadre d'observations en milieu naturel (Oxley et al., 1997), qu'en utilisant des vidéos de trafic réel (Holland & Hill, 2010) ou encore sur simulateur (Dommes et al., 2014).

La surreprésentation des personnes âgées dans les accidents piétons pose en fait question depuis plus d'une vingtaine d'années dans la littérature. Plusieurs travaux tendent à montrer des prises de décision mal adaptées à la situation de trafic et aux capacités réelles des piétons âgés. En effet, d'un point de vue perceptivo-cognitif, les déclinés associés au vieillissement normal concourent à des difficultés pour percevoir l'environnement routier, discriminer les informations pertinentes, et focaliser son attention à la perception du trafic approchant tout en

y adaptant sa vitesse de marche. Parallèlement à ces déclin cognitifs, les personnes âgées sont moins alertes, se déplacent plus lentement, et ont du mal à faire face et réagir rapidement à un évènement inattendu comme des véhicules qui approcheraient soudainement à vitesse élevée. Dans les situations où aucune aide ne leur est fournie (ex. absence de feu piéton) et où les piétons prennent donc seuls la décision de traverser la rue, plusieurs travaux montrent ainsi que les personnes âgées sélectionnent d'elles-mêmes des créneaux de temps trop courts compte-tenu de leur vitesse de marche ralentie.

Les travaux australiens (Oxley et al., 1997, 2005), anglais (Holland & Hill, 2010) ou français de l'IFSTTAR (Dommes et al., 2013, 2014 ; Lobjois & Cavallo, 2007, 2009) s'accordent à montrer un effet, plus ou moins marqué selon les études de l'avancée en âge sur les comportements de traversée de rue. On constate une prise de décision plus lente avec l'âge, les piétons âgés de plus de 75 ans prenant plus de temps que les piétons plus jeunes pour prendre la décision de traverser la rue. Il est également observé un ralentissement du temps d'initiation de la traversée avec l'âge (Oxley et al., 1997; Holland & Hill, 2010) : dans des voies à sens unique ou à double sens, les piétons jeunes initient leurs traversées lorsque le premier véhicule passe à leur hauteur, alors que les piétons âgés la débute presque une seconde après. Par ailleurs, les piétons âgés présentent un ralentissement de la vitesse de marche, des difficultés à percevoir la vitesse d'approche des véhicules et à coordonner les informations provenant de deux voies de circulation, et donc plus de décisions potentiellement dangereuses en raison de l'âge (Dommes et al., 2014). En principe, traverser est possible à chaque fois que le temps disponible est supérieur au temps nécessaire pour traverser, mais les piétons adoptent généralement une marge de sécurité supplémentaire (Lobjois & Cavallo, 2007, 2009 ; Oxley et al., 2005) pour gérer des évènements inattendus comme une chute (Harrell, 1991 ; Harruff et al., 1998). Cette marge de sécurité devrait d'ailleurs être d'autant plus grande que le piéton est âgé, du fait du ralentissement des temps de réaction et des capacités d'accélération du pas avec l'âge. Mais bien des travaux montrent que les piétons âgés n'adoptent pas toujours des marges de sécurité satisfaisantes pour garantir la sécurité de leurs décisions de traversée de rue (Oxley et al., 1997, 2005 ; Holland & Hill, 2010 ; Dommes et al., 2014 ; Lobjois & Cavallo, 2007, 2009). L'augmentation des traversées risquées avec l'âge est globalement interprétée par des facteurs intrinsèques aux piétons (Dommes & Cavallo, 2011 ; Dommes et al., 2013 ; Holland & Hill, 2010 ; Lobjois & Cavallo, 2007, 2009 ; Oxley et al., 1997, 2005). Le déclin des capacités visuelles (acuité), perceptives (champ visuel utile), cognitives (capacités attentionnelles) et motrices (vitesse de marche) serait en cause, plutôt que l'âge du piéton en tant que tel.

2.3. Difficultés de navigation et d'orientation avec l'avancée en âge

Deux autres dimensions indispensables à la sécurité des déplacements à pied sont les capacités de navigation et d'orientation. La navigation détermine, par anticipation, le chemin à emprunter pour se rendre au point d'arrivée et nécessite de prendre la décision de tourner à droite ou à gauche aux intersections en fonction de l'itinéraire choisi (Lifthous, Dufour & Desprès, 2013). L'orientation est la capacité à situer son corps par rapport à des points de référence dans un environnement spatial (Burles et al., 2014). Elle est soutenue par un grand nombre de processus cognitifs, tels que le traitement de l'information spatiale produite à partir des différentes modalités sensorielles (Berthoz & Viaud-Delmon, 1999) et maintenue dans les mémoires à court et à long termes (Corbetta, Kincade & Shulman, 2002). La navigation et l'orientation reposent sur un double système de représentations. Les représentations égocentrées concernent la navigation centrée sur soi, encodant l'information spatiale du point de vue de la personne qui se déplace et apportant des connaissances rigides sur le trajet. Elles

sont préférentiellement utilisées dans l'apprentissage de trajets fixes, résultant d'un apprentissage procédural. Les représentations allocentriques sont, quant à elles, basées sur des représentations mentales flexibles stockées en mémoire à long terme et se référant aux cartes cognitives. Elles englobent l'aménagement de l'espace d'un environnement d'un point de vue de la recherche de trajet et incluent les positions des repères mémorisés de manière relative à d'autres repères, ainsi que les distances et orientations estimées par l'individu. Ces représentations permettent de s'orienter en direction d'un but non localisé dans le champ visuel sur la base d'indices distants (et indépendants de la position de l'individu) reliés mentalement entre eux. Les personnes sachant bien s'orienter sont celles qui sont capables d'alterner entre les deux cadres de référence de manière optimale dans une situation donnée (Burlès et al., 2014).

De plus en plus de travaux utilisent les environnements simulés pour étudier la navigation. De fortes corrélations ont été observées entre les résultats obtenus en navigation dans le monde réel et ceux en réalité virtuelle, que ce soit avec de jeunes populations ou avec des populations plus âgées (Cushman et al., 2008 ; Kalova et al., 2005). En outre, Ruddle et al. (1997) ont constaté qu'en réalité virtuelle, les participants développent des cartes cognitives très similaires à celles qu'ils développent dans le monde réel.

Ces dernières années, nombre d'études se sont également focalisées sur les effets du vieillissement normal et pathologique sur les capacités de navigation et d'orientation. Avec le vieillissement normal, ces capacités se dégradent du fait de la détérioration structurale et fonctionnelle du cortex préfrontal (Raz et al., 2004) et des systèmes striato-frontal et striato-hippocampal (Moffat et al., 2007). Des travaux montrent ainsi que les personnes âgées présentent plus de difficultés à localiser leurs buts et à se souvenir du trajet comparativement à des adultes plus jeunes (Moffat et al., 2001). Ils marchent sur une plus grande distance pour localiser leur cible, mettent plus de temps pour réaliser la tâche et commettent plus d'erreurs de mémoire spatiale. En outre, les personnes âgées commettent plus d'erreurs de trajets lorsqu'elles doivent rejoindre leur point de départ et estimer de longues distances (Mahmood et al., 2009). En revanche, l'estimation de courtes distances et les capacités de rotation mentale semblent préservées. Mais, bien que les individus âgés se souviennent aussi bien des repères sur un trajet que les jeunes individus, ils présentent des difficultés à se rappeler correctement de leur ordre temporel et à identifier la direction associée à ces repères, reflétant des déficits de la mémoire associative (Head & Isom, 2010). Or, la connaissance des repères contribue à une navigation réussie. Un tel déficit serait à rapprocher de la création et/ou de l'utilisation défectueuse(s) de la carte cognitive de l'environnement et serait dû à la dégradation des fonctions exécutives et attentionnelles. La navigation allocentrique constituerait donc la difficulté de navigation la plus importante chez la personne âgée (Lifshous, Dufour & Desprès, 2013). Dans l'optique de remédier à ces difficultés, des chercheurs ont testé diverses aides à la navigation, comme l'utilisation de cartes pour se repérer dans l'espace. Sjölander et al. (2005) ont par exemple administré une tâche de navigation virtuelle à deux échantillons de participants (jeunes et âgés) auxquels ils ont fourni une vue aérienne de l'environnement dans lequel ils devaient se déplacer. Les auteurs ont constaté que les participants âgés ne bénéficiaient pas plus de l'aide apportée par la carte que les jeunes, mais qu'ils disaient se sentir plus en sécurité avec la carte. L'aspect émotionnel pourrait ainsi jouer un rôle indirect mais important dans la navigation (peur de se perdre, confusion, anxiété). Pour éviter les trajets et les environnements non familiers dans lesquels ils ont plus de risque de se sentir mal à l'aise et en difficulté, les personnes âgées développent en effet des stratégies d'évitement (Burns, 1999). Malheureusement, ces stratégies entraînent une diminution de leurs déplacements et plus largement, de leur autonomie.

Un récent projet « La marche à pied chez les seniors » (MAPISE¹), également financé par le PREDIT entre 2011 et 2014, montre que le sentiment de peur est en fait souvent rapporté par les personnes âgées lorsqu'elles se déplacent à pied (peur de chuter, peur d'être importuner ou bousculer, peur de manquer de temps pour traverser, peur de l'autre). D'ailleurs, ce sentiment de peur figure parmi les principaux facteurs de renoncement à la mobilité; corollaire certainement d'une plus grande vulnérabilité ressentie. Si avec l'avancée en âge la marche diminue en pratique et en vitesse, les difficultés perçues quant à elles augmentent, notamment pour traverser la rue, ainsi que la fréquence des chutes dans l'espace public et les accidents de la circulation. Les séniors interrogés dans MAPISE dénonçaient souvent le trafic automobile, les vitesses pratiquées et le manque de respect des conducteurs.

2.4. Difficultés en zones d'échanges

Un nombre croissant de publications traite des difficultés des personnes âgées lors de leurs déplacements piéton dans des zones d'échange et d'interconnexion (ex. : Gilhooly, 2002 ; Hovbrandt et al, 2007; Risser et al., 2010; Rosenkvist et al, 2009; Wretstrand et al, 2009). En général, les résultats suggèrent que les difficultés principales des piétons âgés concernent la multitude d'informations simultanées et variées à traiter rapidement (ex. : arrêts bus à rechercher lors de la traversée de rue), l'infrastructure inadaptée des zones d'échange (ex. : trottoirs surélevés), la qualité de l'offre du système de transport public (ex. : arrêts mal indiqués ou difficilement accessibles). Certains chercheurs avancent également l'idée que l'anxiété provoquée par la foule et la circulation est un facteur important de difficulté (Risser et al., 2010). Ces études, très intéressantes, sont cependant en nombre limité. De surcroît, la majorité des recherches réalisées jusqu'à présent est basée sur des méthodes indirectes (questionnaires et, plus rarement, entretiens). Cela résulte en des tendances globales et relativement peu de détails sur les choix individuels, ou sur les aspects importants de l'activité de déplacement dans des zones d'échange tels que la prise d'informations, la prise de décision en cours d'activité ou, plus généralement, la dynamique d'un déplacement dans ces zones. Les présents travaux proposés dans A-PIED seront une contribution dans cette direction.

2.5. Voies d'amélioration existantes et limites

Une voie d'amélioration de la sécurité consiste à adapter l'usager à l'infrastructure et à la tâche, par l'apprentissage ou le ré-apprentissage de comportements sécuritaires. Alors qu'ils représentent un véritable enjeu de sécurité routière, on retient de la littérature que, à notre connaissance, quasiment aucune recherche n'a abordé la question de l'entraînement des piétons âgés à la traversée de rue. Les études menées à l'IFSTTAR (Dommes et al., 2012 ; Dommes & Cavallo, 2012) et celle, récemment publiée, par Hunt, Harper & Lie (2011) sont les seuls travaux publiés sur cette question. En revanche, l'entraînement des piétons enfants (ex. Thomson et al., 2005), mais aussi des automobilistes âgés (ex. Roenker et al., 2003 ; Romoser & Fisher, 2009), font l'objet de nombreux travaux depuis plus d'une vingtaine d'années. Malgré des résultats encourageants, ces méthodes d'entraînement se sont confrontées à des limites. En effet, les participants âgés ont persisté à montrer des difficultés particulières à prendre en compte la vitesse des véhicules à l'approche dans leur prise de décision, et, d'autre part, à prendre en considération le trafic sur la voie éloignée. Ces difficultés étaient moindres, mais toujours présentes. Il a donc semblé difficile de modifier en profondeur la décision de traversée la rue des piétons âgés, qui, ancrée dans des habitudes

¹ Rapport disponible en ligne : <http://www.predit.prd.fr/predit4/publication/46391>

depuis bon nombre d'années, ne semblerait pouvoir être vraiment améliorée que par des voies indirectes et indépendantes de l'individu.

Au-delà de promouvoir la prudence auprès des usagers seniors par des interventions sur simulateur ou préventives (Dommes et al., 2012 ; Dommes & Cavallo, 2012), l'amélioration de leur sécurité pourrait surtout s'envisager par des modifications d'infrastructure (ex. préférer les sens uniques, offrir un ilot central en cas de double sens), de politique de réduction de la vitesse en ville (ex. contrôles radar et ralentisseurs), ou encore par le développement de systèmes d'assistance au conducteur pour détecter et éviter les piétons, ou encore d'aides techniques pour guider l'usager à pied à prendre les bonnes décisions lorsqu'il traverse la rue. L'amélioration de la sécurité des déplacements à pied pourrait ainsi être plus rapidement et facilement acquise par des solutions qui ne dépendent pas de l'individu, mais par une infrastructure des villes conçue pour ses usagers et des développements technologiques adaptés aux contraintes et capacités de l'être humain qui les utilise.

2.6. Dispositifs d'aide aux déplacements des piétons

Le développement des technologies appliquées au domaine du transport est susceptible d'apporter de nombreux bouleversements tant du point de vue de l'offre que de la demande. Alors que beaucoup de recherches et de développements se focalisent sur les conducteurs automobiles, l'enjeu des déplacements à pied reste à appréhender. L'offre est faible alors que la demande est croissante et que bien des piétons se déclarent anxieux lorsqu'ils se déplacent à pied dans une ville.

Si Google, Nokia, TomTom, Navigon, Wayfinder, etc. ont mis au point des solutions d'aide aux déplacements à pied, l'adaptation de ces systèmes aux besoins spécifiques des piétons est encore assez limitée, puisque la majorité des dispositifs sont conçus avec une logique « usage en véhicule » (Radoczky, 2007 ; Völkel, Kühn & Weber, 2008). Par exemple très souvent, les systèmes d'aide à la navigation piétonne proposent les itinéraires les plus courts possibles, alors que leurs utilisateurs peuvent avoir besoin d'explorer l'environnement dans lequel ils se déplacent (May *et al.*, 2003 ; Millonig & Schechtner, 2007 ; Schroder, Mackaness & Gittings, 2011). Aussi, ces dispositifs n'offrent pas une aide à la navigation basée sur des repères, même si ceux-ci sont très fréquemment utilisés par les piétons lors de leurs déplacements quotidiens (Ohm *et al.*, sous presse ; Tscheligi & Sefelin, 2006). Quant aux systèmes d'aide visant plus particulièrement les piétons âgés, il existe principalement des prototypes conçus pour faciliter les déplacements de personnes présentant des troubles de la mémoire et des difficultés à s'orienter dans l'espace. Un exemple dans cette direction est le dispositif AlzNav², combinant l'utilisation du GPS et un système d'appels simplifié afin d'aider les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer à s'orienter et à communiquer facilement avec des soignants et des proches. Un autre exemple de technologie similaire est NavMem Explorer (Poppinga, Heuten & Boll, 2014), qui repose, en plus, sur un guidage directionnel simplifié et l'utilisation de photos de repères, prises soit par l'utilisateur lui-même, soit par sa famille. Dans ces deux cas, il s'agit de systèmes proposant des retours utilisateurs purement visuels.

Nous pouvons également citer des interfaces basées sur des retours sonores. Ainsi, le TrekkerBreeze³ est un dispositif de navigation destiné à faciliter l'orientation et à fournir de la réassurance à des personnes en situation de handicap visuel, y compris des personnes âgées, notamment dans des environnements inconnus.

² <http://alznav.projects.fraunhofer.pt/>

³ <http://store.humanware.com/france/trekker-breeze-handheld-talking-gps.html>

Toutefois, ces dispositifs impliquent l'usage de la vision et de l'audition, i.e. de ressources attentionnelles qui ne sont donc plus engagées dans la tâche principale (i.e., marcher et percevoir l'environnement urbain) et peuvent ainsi être dangereux à utiliser, surtout chez les personnes âgées qui présentent avec l'âge plus de difficultés attentionnelles.

2.7. Vers des modes d'interaction alternatifs : la voie de l'haptique

Apporter une aide à la navigation piétonne utilisant une autre modalité sensorielle que la vision ou l'audition pourrait permettre aux piétons jeunes comme âgés de mieux se déplacer dans leur environnement et ainsi contribuer à assurer une plus grande sécurité. Une telle aide pourrait même constituer un objet de réassurance lors des déplacements.

L'efficacité des systèmes d'aide vibrotactile a été démontrée dans plusieurs publications, avec le développement de prototypes d'aide à la navigation se présentant comme des accessoires tactiles qui transmettent des messages vibrotactiles directionnels ou des alertes (ex. : Henze, Heuten, & Boll, 2006 ; O'Neill & Srikulwong, 2011 ; Szymczak *et al.*, 2012 ; pour une synthèse voir Panëels *et al.*, 2013). Ces informations vibrotactiles se révèlent souvent très efficaces en termes de réduction du temps de réaction, d'amélioration de la sécurité et de focalisation de l'attention sur des éléments importants pour la réalisation de la tâche principale d'orientation (Pielot *et al.*, 2012). Cependant, très peu de ces dispositifs ont été conçus et/ou évalués avec des personnes âgées. Or, les personnes âgées pourraient en bénéficier autant, voire plus, que les jeunes, mais des recherches restent à mener pour que ces systèmes n'altèrent pas pour autant leurs capacités attentionnelles réduites (Strayer & Drews, 2004). Le dispositif évalué dans le cadre du présent projet de recherche A-PIED pourrait être une base pour fournir des réponses à ces questions ouvertes.

2.8. Les notions d'utilisabilité et d'acceptabilité pour évaluer des systèmes d'aides

En ergonomie, trois dimensions sont importantes à considérer dans l'évaluation des technologies : l'utilité, l'utilisabilité et l'acceptabilité (Dillon & Morris, 1996). L'utilité d'un système renvoie à ses capacités techniques. Un système est utile s'il permet à ses utilisateurs d'atteindre le(s) but(s) pour lequel (ou lesquels) il a été réalisé. L'utilisabilité a donné lieu à plusieurs définitions dont les principales sont les suivantes :

- la capacité qu'a un système à être utilisé facilement et efficacement par des humains (Shackel, 1991);
- la qualité d'utilisation (Bevan, 1995);
- l'efficacité, l'efficience et la satisfaction avec lesquelles les utilisateurs peuvent atteindre des buts spécifiques dans un environnement particulier (ISO⁴ 9241-11:1998).

Cette dernière définition fournit des critères objectifs pour évaluer l'utilisabilité d'un système. Un système est utilisable lorsque l'utilisateur peut réaliser sa tâche et atteindre ses objectifs (efficacité), avec un minimum de ressources (efficience) et que le système est agréable à utiliser (satisfaction). Mesurer l'utilisabilité consiste donc à évaluer le respect de ces trois critères (performance, coût cognitif, satisfaction).

L'acceptabilité correspond à la valeur de la représentation mentale (attitudes, opinions, etc.) relative au système, de son utilité et de son utilisabilité (Tricot, 2007). La valeur de cette représentation impacterait la décision d'un individu d'utiliser ou non ce système.

⁴International Organization for Standardization.

L'acceptabilité est une dimension subjective (contrairement aux deux précédentes) qui fait référence aux jugements que l'on porte sur un système et aux intentions d'usage de celui-ci.

3. Objectifs du projet A-PIED

Dans ce contexte scientifique, technologique et sociétal, le projet A-PIED vise à répondre à deux objectifs principaux :

- (i) analyser les besoins des piétons âgés pour des interfaces multisensorielles d'aide à la traversée de rue et à l'orientation en milieu urbain, ainsi que l'acceptabilité de ces interfaces ;
- (ii) tester une solution technologique innovante et originale, basée sur une interface vibrotactile portée sur le poignet, pour aider le piéton à émettre des décisions sécurisées de traversée de rue et à mieux s'orienter en ville.

Au cours du projet, nous faisons appel à plusieurs méthodes de recueil de données (cf. Figure 3 ci-après), à savoir des entretiens, des questionnaires, des tests avec des futurs utilisateurs de l'aide vibrotactile en milieu naturel protégé, et des expérimentations sur simulateurs.

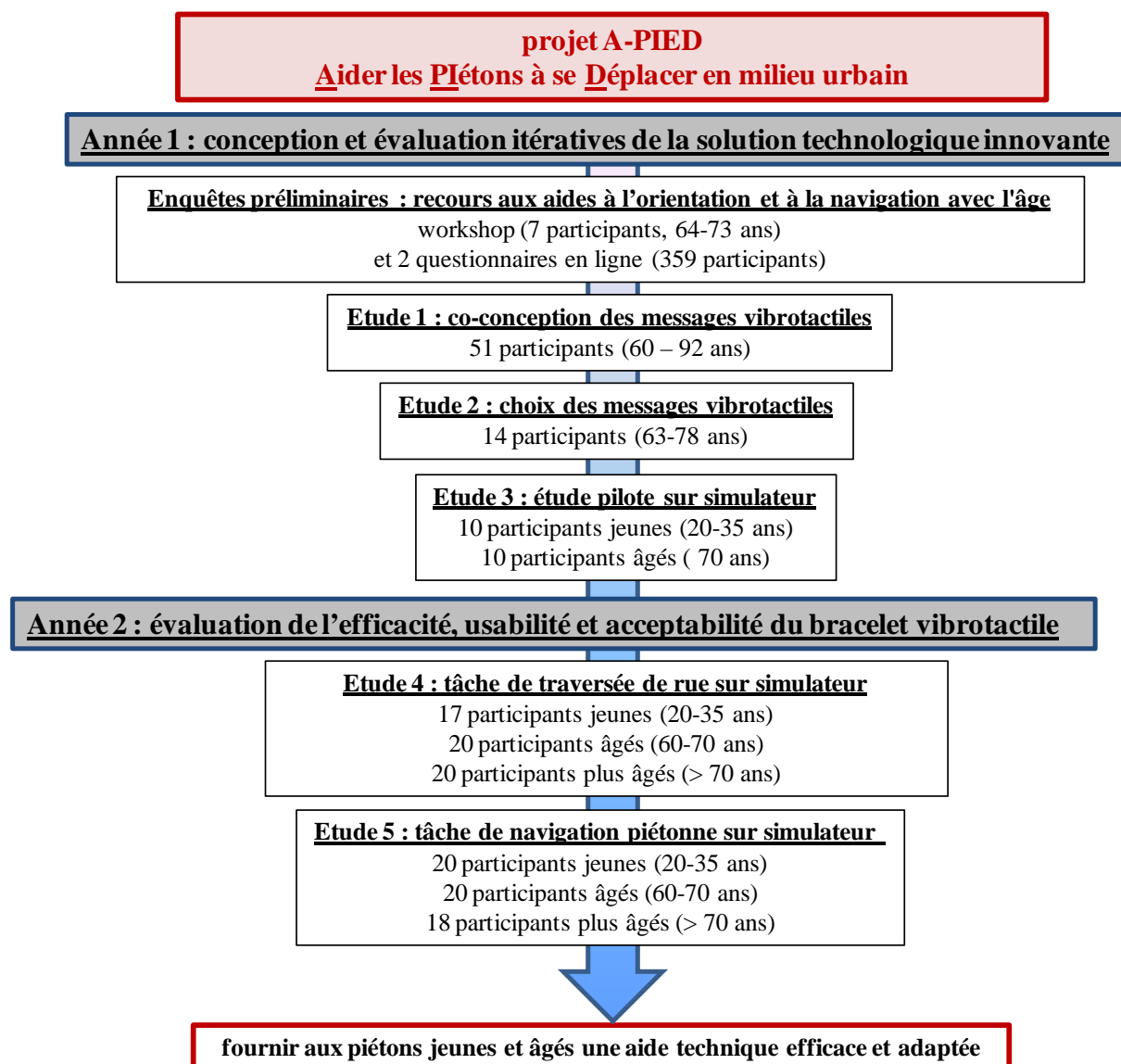


Figure 3. Programme et méthodologie de recherche du projet A-PIED

La première année du projet a consisté en une analyse de l'activité de déplacement des personnes âgées, complétée par une évaluation-reconception itérative d'une technologie vibrotactile existante.

Ces études ont été réalisées afin d'extrapoler des besoins des piétons âgés pour des interfaces multisensorielles d'aide à la traversée de rue et à l'orientation en milieu urbain, ainsi que de conclure sur l'acceptabilité de ces interfaces. Comme le montre le bref aperçu des technologies existantes (cf. section 2.6), les systèmes d'aide à la navigation piétonne, notamment ceux reposant sur une autre modalité que la vision, sont encore peu répandus et peu connus par leurs futurs utilisateurs, y compris par les personnes âgées. Cette caractéristique rend difficile l'expression, le recueil, l'analyse et la formalisation des besoins de ces mêmes utilisateurs. Il est rare, en effet, que des technologies peu connues par leurs futurs utilisateurs répondent à des besoins explicitement formulés, à des besoins « conscients » (Robertson, 2001). Dans la majorité des situations, il s'agit plutôt de réalisations techniques en recherche d'applications, qui répondent à des attentes « latentes » (Sperandio, 2001) ou créent directement des besoins. Dans ce cas, Robertson (op. cit.) parle de « besoins inimaginés » (« undreamed-of requirements ») et signale que les futurs utilisateurs ont des difficultés à les formuler. Comme le résume très bien Van Schaik (1999), il ne suffit pas de demander aux futurs utilisateurs d'une technologie innovante ce qu'ils veulent comme fonctions et cela pour plusieurs raisons. D'abord, les utilisateurs se concentrent davantage sur leurs tâches quotidiennes que sur la technologie à concevoir (Foster & Franz, 1999). Ensuite, étant donné qu'il s'agit de technologies de pointe, il n'est pas évident pour une personne d'exprimer des exigences envers un dispositif dont elle ignore les capacités techniques et les avantages en termes de fonctions (Leonard & Rayport, 1997). Enfin, les utilisateurs ne spécifient pas toujours les fonctionnalités du futur système dans une forme facilement utilisable par les concepteurs (Van Schaik, 1999). Le plus souvent, ils formulent, des problèmes et non pas des solutions technologiques (Bruseberg & McDonagh-Philip, 2001). C'est pourquoi, quand il s'agit de besoins hypothétiques ou latents vis-à-vis de technologies peu connues par leurs futurs utilisateurs et qui, de plus, vont forcément modifier l'activité qu'elles outilleront, « l'ergonomie ne peut donner que des réponses théoriques et empiriques issues d'analyses provenant de situations proches » (Brangier & Bastien, 2006). C'est ce que nous avons fait pendant la première année du projet A-PIED.

Une première phase d'analyse de l'activité a consisté à recenser l'utilisation d'aides à la navigation et à l'orientation par des personnes âgées lors de déplacements à pied ou en utilisant d'autres moyens de transports. Cette analyse a été faite à partir de données collectées grâce à un atelier de travail et deux questionnaires en ligne (voir section 4). Ce recueil de données a concerné au total 366 participants. Trois études ont ensuite été réalisées afin d'identifier le contenu et la forme des stimulations vibrotactiles à présenter aux futurs utilisateurs (voir section 5). La première étude portait sur la conception des messages vibrotactiles que diffuserait le bracelet et qui soient pertinents pour le contexte de marche à pied dans une ville. Dans un premier temps, 51 participants âgés (60 – 92 ans) étaient ainsi invités à éliciter des métaphores correspondant aux messages (directionnels et informationnels). Puis ils devaient concevoir eux-mêmes les stimulations vibrotactiles correspondant à ces métaphores. La deuxième étude a réuni 14 participants âgés (63-78 ans) afin d'identifier les stimulations les mieux perçues et reconnues en contexte écologique parmi les propositions les plus fréquentes issues de la première étude. Enfin, la troisième étude de la première année du projet a consisté en une phase pilote des expérimentations de la deuxième année, c'est-à-dire des études qui visaient à évaluer l'efficacité du dispositif vibrotactile pour aider le piéton à mieux s'orienter à pied dans une ville. L'objectif était ici de vérifier la compréhension des messages dans une tâche de navigation sur simulateur, et ainsi de préparer les études principales réalisées au cours de la deuxième année du projet (voir section 6).

Les études menées lors de la première année du projet ont permis d'adapter un dispositif d'aide existant aux besoins des piétons âgés en mobilité. Ce dispositif est un bracelet vibrotactile qui a été développé par le CEA/LIST dans le cadre d'autres projets sur la navigation piétonne (FP7 HAPTIMAP, ANR Projet TICTACT, AAL ENTRANCE). Ce bracelet permet de délivrer des messages à l'utilisateur sous la forme de motifs vibratoires indiquant par exemple, une alerte (ex. : vibration forte tout autour du poignet), une direction ou un point d'intérêt (ex. : message qui repose sur l'activation de vibreurs se situant à droite ou à gauche du poignet). Ces messages sont conçus en variant un certain nombre de paramètres physiques des vibrations (ex. : rythme, amplitude, durée, localisation, répétition). La Figure 4 ci-dessous illustre l'évolution du bracelet au cours des études de l'Année 1. Cette évolution concerne principalement les matériaux et les types d'attaches du bracelet. Ainsi, pour la version 1 nous avons utilisé une attache commerciale standard dont la rigidité limitait l'adhérence des actionneurs à la peau et affectait la perception des messages. Pour la version 2, nous avons noté une non-adaptabilité aux divers tours de poignet des utilisateurs. La version 3 du bracelet a été jugée plus confortable grâce à l'utilisation d'une attache velcro flexible, assurant une meilleure adhérence des actionneurs et pouvant s'adapter à des tours de poignet différents.

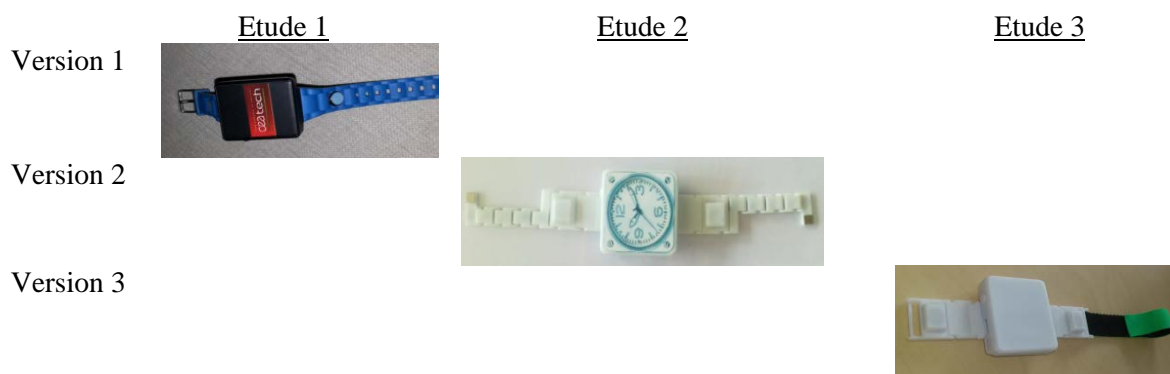


Figure 4. Evolution du bracelet vibrotactile au cours du projet

La deuxième année du projet a consisté en une phase d'évaluation de l'efficacité, de l'utilisabilité et de l'acceptabilité du bracelet vibrotactile. Deux études ont été menées auprès de participants jeunes et plus âgés. La première (voir section 7) visait à tester le bracelet dans une tâche de traversée de rue, le bracelet guidant le piéton à émettre des choix sécurisés de traversées de rue. La dernière étude (voir section 8) visait à tester le bracelet dans une tâche de navigation piétonne, le bracelet guidant l'individu à s'orienter correctement dans une ville.

4. Utilisation d'aides à la navigation et à l'orientation par les piétons âgés

A notre connaissance, il existe très peu de données empiriques dans la littérature sur l'utilisation d'aides à la navigation et à l'orientation par des piétons âgés. Une explication possible de ce manque de retours utilisateurs est l'offre technologique limitée, répondant aux besoins spécifiques de ces utilisateurs.

Les résultats des rares études existantes montrent que les aides technologiques peuvent faciliter l'orientation des personnes âgées, notamment si les aides reposent sur l'utilisation extensive de repères de l'environnement (Goodman et al., 2004 ; Popinga, Heuten & Boll, 2014 ; Veldkamp et al., 2008).

La première étape du projet A-PIED a consisté en une analyse de l'activité de déplacement et d'utilisation d'aides à l'orientation et à la navigation par des personnes âgées. Ces données ont été recueillies dans le cadre d'un atelier de travail et par deux questionnaires en ligne (cf. figure 5 ci-dessous).

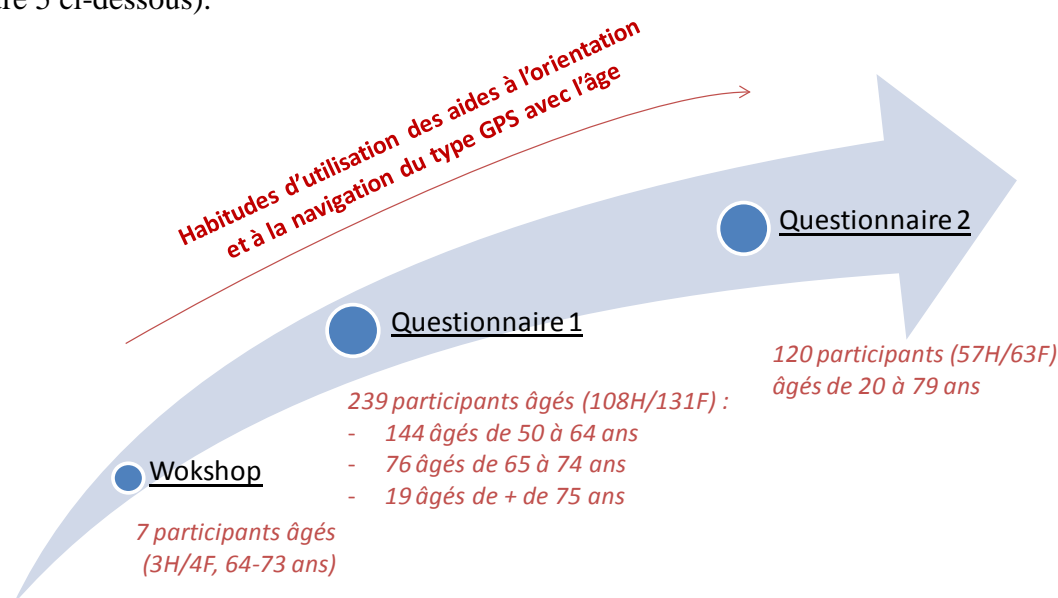


Figure 5. Etudes préliminaires sur les habitudes d'utilisation des aides à l'orientation et à la navigation avec l'âge

4.1. Atelier de travail avec 7 personnes âgées

Nous avons initié l'analyse de l'activité de déplacement des personnes âgées par un atelier de travail, de nature très exploratoire. Cet atelier, d'une durée de 1h45, comportait deux exercices. Le premier exercice consistait, pour chaque personne, à définir quelles sont les aides à l'orientation et à la navigation qu'elle utilise pour se déplacer, ainsi que des facteurs qui peuvent constituer des obstacles à leur utilisation. Le deuxième exercice, par groupe de 2 ou 3, portait sur la description de l'itinéraire du domicile jusqu'au lieu de l'atelier de travail, réalisé, dans ce cas concret, en voiture, avec ou sans aides au déplacement. La personne, qui décrivait le trajet, devait fournir les informations qui lui paraissaient nécessaires pour permettre à son binôme (ou à ses 2 collègues) de pouvoir réaliser cet itinéraire avec cette description. Ensuite, les rôles étaient inversés. Les déplacements en voiture ont été abordés car les participants à l'atelier relataient peu d'expériences d'utilisation d'aides technologiques lors de leurs déplacements à pied.

Le groupe de participants à cette étude était constitué de 7 personnes (3 hommes / 4 femmes), âgés de 64 à 73 ans. La moyenne d'âge des hommes interrogés était de 66 ans et pour les femmes de 69 ans. Les participants étaient tous volontaires.

Une analyse de contenu a été réalisée sur les données de l'atelier, retranscrites intégralement. Aussi, des analyses statistiques ont été réalisées à partir des données obtenues de l'analyse de contenu.

Les résultats des deux exercices confondus montrent que les principales aides pour se déplacer en extérieur (tous modes de déplacement confondus) utilisées par ce groupe de personnes âgées sont les repères de l'environnement et la signalisation (cf. Figure 6). Ainsi, un participant de 64 ans explique que les repères facilitent l'identification des lieux où il y a des actions à réaliser (ex. : « tourner à droite »). Il dit : « *Au collège, c'est facile, le point de repère, hein ? Parce que là, on voit. Il y a la cour, euh... Y a les bâtiments, on... On ne peut pas le rater, hein ?* ».

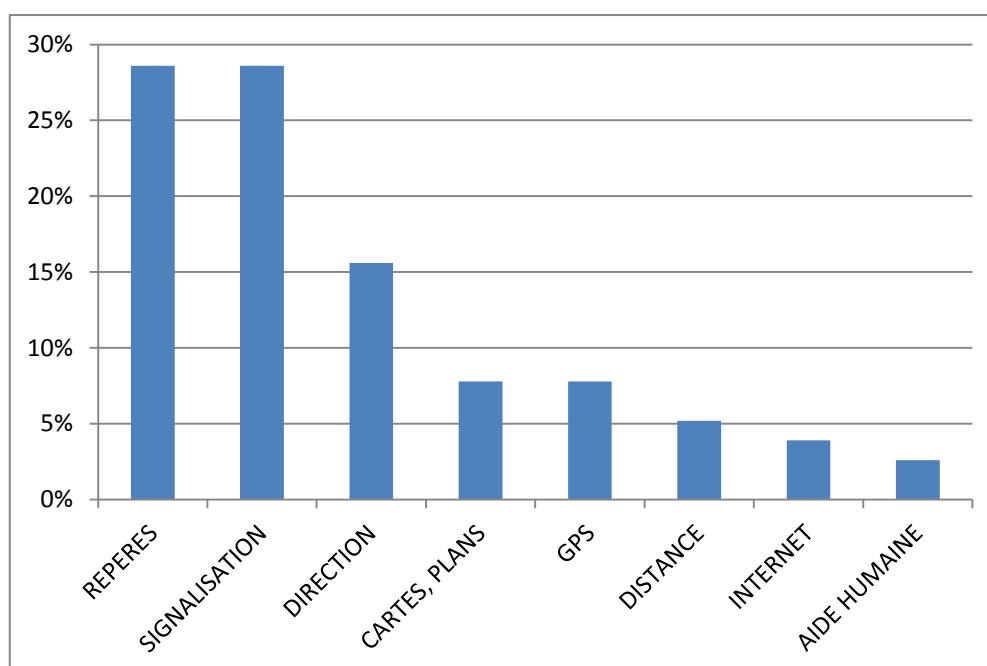


Figure 6. Aides utilisées par les personnes âgées participant à l'atelier de travail

Les cartes, les plans et les GPS viennent en renfort des repères et de la signalisation. Généralement, le déplacement est planifié à l'aide de cartes. Ensuite, en mobilité, la signalétique et le GPS viennent compléter l'information obtenue lors de la préparation du trajet. Cette organisation de l'activité est très clairement décrite dans le discours de 5 des 7 participants à l'atelier.

En ce qui concerne les difficultés des déplacements, les participants à l'atelier évoquent les difficultés telles que le flux de véhicules ou de personnes, qui peut masquer des repères ou de la signalétique (« *Ben, je... Ça doit être difficile, parce qu'où est placée l'entrée du parking ? De la rue, on la voit pas, vu qu'en plus, il y a le camion qui vient en face et qui masque, euh...* »), la confiance limitée en certains dispositifs technologiques (« *Heu... A partir de là, bon, euh... je n'ai pas de difficulté pour me diriger, vu que j'ai mon GPS à côté de moi en général, c'est-à-dire ma femme...* »), l'utilisabilité de l'information (« *Les panneaux de signalisation, il faut reconnaître que, maintenant, il y en a de plus en plus, et qui sont affichés vraiment les uns sous les autres...* »).

Cette première étude nous a permis d’appréhender, d’une manière très exploratoire, l’activité réelle de déplacement des participants à l’atelier. Nous avons constaté que les aides technologiques n’ont pas été fréquemment évoquées par les personnes âgées du groupe. Cependant, nous n’avons pas relevé de résistance particulière à ce type d’aides, même si des limites de confiance en la technologie ont été évoquées. Les résultats issus de cet atelier de travail, idiosyncratiques par définition, ont été approfondis par des réponses d’individus plus nombreux à deux questionnaires en ligne (section suivante 4.2).

4.2. Questionnaires en ligne

4.2.1 Questionnaire 1 auprès de 239 personnes âgées

Le premier questionnaire en ligne avait pour objectif d’offrir une vue plus large sur l’utilisation d’aides à l’orientation et à la navigation par les personnes âgées lors de déplacements à pied, à vélo, en voiture ou en transports publics. Le questionnaire comportait des questions sur les déplacements quotidiens des personnes (fréquences, motif, moyen de transport utilisé), les aides utilisées (tous modes de transport confondus) et les difficultés rencontrées.

Deux-cent trente-neuf participants ont répondu à ce questionnaire, dont 144 personnes âgées entre 50 et 64 ans, 76 personnes âgées entre 65 et 74 ans, et 19 personnes âgées de 75 ans et plus. La répartition hommes – femmes est respectivement de 108 hommes vs. 131 femmes.

Nous ne présentons ici que les principaux résultats du questionnaire, relatifs à l’utilisation d’aides à l’orientation et à la navigation par les personnes âgées (tous modes de déplacement confondus). Ceux-ci peuvent être résumés de la manière suivante : avec l’avancée en âge, et jusqu’à 75 ans, les individus utilisent de plus en plus d’aides à l’orientation et à la navigation pour se déplacer (cf. Tableau 2 ci-dessous). Cependant, au-delà de 75 ans, les individus semblent avoir recours moins souvent à ce type d’aides pour se déplacer. Notons, néanmoins, que le groupe des personnes de plus de 75 ans n’est composé que de 19 individus.

Age	Oui	Non
50-64 ans	87	57
N=144	60%	40%
65-74 ans	54	22
N=76	71%	29%
75 ans et +	9	10
N=19	47%	53%

Tableau 2. Utilisation d’aides à l’orientation et à la navigation (par tranche d’âge)

Parmi les aides utilisées (cf. Tableau 3 ci-dessous), les personnes âgées entre 50 et 64 ans déclarent utiliser majoritairement Internet (dans 70% des cas) et les GPS (dans 67% des cas). Les personnes âgées entre 65 et 74 ans utilisent également Internet (dans 80% des cas), les plans (dans 65% des cas), suivi de près par les GPS (59%) et les cartes (54%). Enfin, les personnes âgées de plus de 75 ans déclarent avoir autant recours à Internet qu’aux GPS (dans 78% des cas) et en second lieu les plans (dans 67% des cas).

Age	Plan	Carte	Livre	GPS	Téléphone	Tablette	Internet	Personne	Informations
50-64 ans N=87	32 37%	38 44%	9 10%	58 67%	11 13%	3 3%	61 70%	18 21%	19 22%
65-74 ans N=54	35 65%	29 54%	8 15%	32 59%	9 17%	2 4%	43 80%	9 17%	11 20%
75 ans et + N=9	6 67%	3 33%	3 33%	7 78%	2 22%	0 0%	7 78%	0 0%	1 11%

Tableau 3. Type d'aides à l'orientation et à la navigation utilisées avec l'avancée en âge : distribution (effectifs et pourcentages)

Ces résultats montrent une utilisation massive d'aides technologiques (GPS, Internet) pour préparer ou réaliser des déplacements quotidiens, et ceci indépendamment de la tranche d'âge. En termes de besoins et d'acceptabilité, on pourrait ainsi conclure que, dans l'échantillon analysé, nous ne notons pas de résistance à la technologie. Au contraire, les fonctionnalités des aides technologiques existantes semblent appréciées par les participants de l'étude.

4.2.2 Questionnaire 2 auprès de 120 personnes jeunes et plus âgées

L'objectif du deuxième questionnaire était d'approfondir les résultats obtenus lors de l'enquête précédente. 120 participants ont répondu au questionnaire. Le Tableau 4 ci-dessous résume la répartition par tranche d'âge et par sexe des participants à l'étude.

	20-29	30-49	50-59	60-69	70-79	Total
<u>Nombre de répondants</u>	31 (26%)	19 (16%)	11(9%)	33 (27%)	26 (22%)	120 (100%)
Femme	18 (15%)	14 (12%)	6 (5%)	12 (10%)	13 (11%)	63 (52%)
Homme	13 (11%)	5 (4%)	5 (4%)	21 (17%)	13 (11%)	57 (48%)

Tableau 4. Répondants au questionnaire 2

Les résultats montrent que le type d'aide à l'orientation et à la navigation utilisée varie en fonction du mode de transport emprunté (cf. Figure 7 ci-dessous).

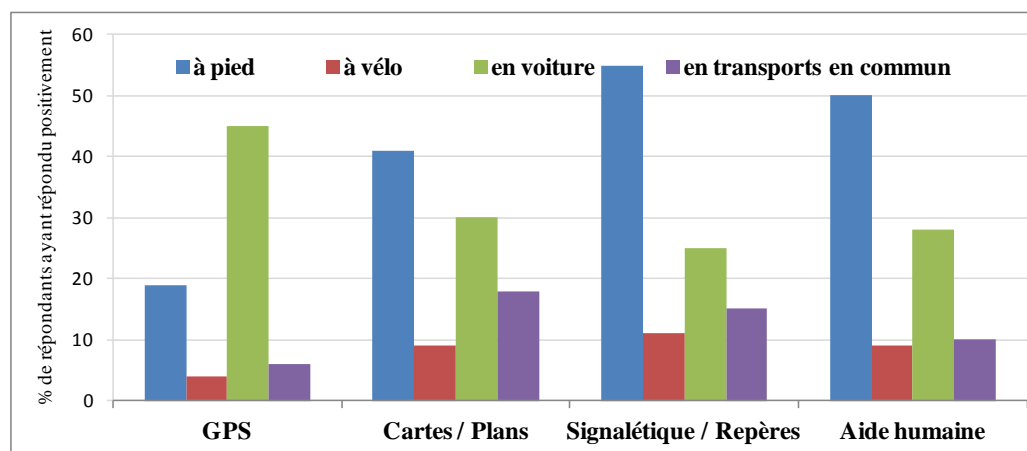


Figure 7. Type d'aide à l'orientation et à la navigation utilisée (en fonction du mode de déplacement)

Il n'est pas surprenant de voir apparaître le GPS comme étant l'aide principalement utilisée pour les déplacements en voiture. Cet usage est d'autant plus important que les voitures neuves sont presque toutes équipées de GPS intégrés. De fait, les personnes l'utilisent parfois sans vraiment le vouloir ou sans forcément en avoir besoin. Cet usage peut donc être influencé par la présence du dispositif sur le marché.

Le GPS est utilisé lors des déplacements à pied par presque 20% des répondants. En revanche, il est très peu utilisé en transports en commun et à vélo, ce qui paraît logique considérant les exigences des tâches relatives à l'utilisation de ces moyens transports (ex. ; déplacements en zones avec une couverture GPS limitée pour les transports en commun et nécessité d'avoir les deux mains libres pour rouler à vélo en toute sécurité).

En ce qui concerne les cartes et les plans, ils semblent plus souvent être utilisés lors des déplacements à pied. Les cartes et les plans sont des ressources que les personnes peuvent prendre avec eux et mettre dans leur poche, ce qui facilite leur recours à pied. Dans des proportions plus faibles, les cartes et les plans sont aussi utilisés lors des déplacements à vélo. Les cartes et les plans ne sont pas forcément bien adaptés pour les déplacements à vélo parce qu'ils nécessitent de s'arrêter, de sortir la carte, de la déplier etc. Autrement dit, ils font perdre du temps et interrompent la dynamique du déplacement.

La signalétique et les repères sont majoritairement utilisés lors des déplacements à pied.

Enfin, lorsque les individus ont recours à une aide humaine, ils le font principalement à pied et en voiture. A vélo et en transports en commun, l'aide humaine est peu sollicitée.

Les aides utilisées pour s'orienter et naviguer diffèrent aussi selon les objectifs des sous-tâches qui composent l'activité de déplacement (i.e. trouver son chemin, obtenir des informations en temps réel, se rassurer, changer d'itinéraire ou avoir une vue d'ensemble de son itinéraire). Chaque aide a des caractéristiques qui la rendent adaptée à des besoins ou des attentes différentes.

Pour le GPS, par exemple, la fonction principale que lui attribuent les utilisateurs est d'aider à trouver son chemin (83% ont répondu « plutôt oui »), et la seconde fonction est de bénéficier d'une vue d'ensemble de l'itinéraire (71% ont répondu « plutôt oui »). La fonction suivante attribuée au GPS est l'aide au changement de trajet (66% ont répondu « plutôt oui »), puis d'obtenir des informations en temps réel (59% ont répondu « plutôt oui »), et enfin pour 45% des répondants être rassurés.

Les cartes et les plans servent principalement à repérer son chemin (90%), à changer de trajet (81%) et à disposer d'une vue d'ensemble de son itinéraire (80%). Ils peuvent aussi servir à rassurer pour 47% des répondants.

La signalétique et les repères permettent surtout de trouver son chemin (94%) et de rassurer l'usager (56%).

Pour les aides humaines, elles fournissent en premier lieu des informations pour trouver son chemin (83%). Elles contribuent grandement à rassurer (51%), et à aider au changement d'itinéraire (47%).

L'analyse des réponses au questionnaire montre enfin que l'utilisation de ces aides varie en fonction de l'âge des répondants. Par exemple, le tableau 5 ci-dessous montre les répartitions de l'usage du GPS sur une échelle allant de 1 à 6, avec les réponses « plutôt non » pour les valeurs allant de 1 à 3, et les réponses « plutôt oui » pour des valeurs de l'échelle allant de 4 à 6. Il semble que le recours au GPS pour se déplacer (tous modes de déplacement confondus) soit plus important chez les personnes les plus jeunes, âgées entre 20 et 49 ans.

Utilisation du GPS	Plutôt non	Plutôt oui
20-29 ans (N=31)	23%	77%
30-49 ans (N=18)	23%	78%
50-59 ans (N=11)	54%	45%
60-69 ans (N=33)	45%	54%
70-79 ans (N=26)	42%	57%

Tableau 5. Utilisation du GPS en fonction de l'âge : distribution en pourcentages

4.3. Conclusions des premières enquêtes

Ces premières études nous ont permis d'appréhender l'utilisation d'aides à l'orientation et à la navigation par les personnes âgées. On retient que les aides les plus utilisées (**tous modes de déplacement confondus**) sont Internet, les GPS, les cartes et les plans, la signalétique et les repères, et enfin l'aide humaine. Il est à noter qu'une aide est rarement employée seule. Il s'agit souvent d'une combinaison de ressources qui est mise en jeu dans l'activité de navigation et d'orientation, à savoir des ressources internes à l'individu comme ses compétences physiques (ex. vitesse de marche) et cognitives (habilités spatiales à se repérer dans l'espace, à mémoriser les informations, etc.) et des ressources externes à l'individu comme celles de l'environnement (signalétique et repères) ou qu'il choisit de transporter avec lui (ex. cartes, GPS).

Par ailleurs, les résultats de ces études montrent qu'il y a globalement peu de différences dans l'usage réel d'aides à l'orientation et à la navigation en fonction de l'âge de l'utilisateur, **tous modes de déplacement confondus**. On note toutefois une légère tendance à moins utiliser des aides technologiques avec l'âge (Internet pour le questionnaire 1 et GPS pour le questionnaire 2). Cette tendance pourrait être expliquée par plusieurs phénomènes qui se cumulent. Le premier est lié aux déplacements et à leur fréquence à un âge avancé. Souvent, les personnes les plus âgées limitent leurs déplacements aux environnements familiers, i.e. ceux qui ne nécessitent pas d'aides particulières telles que des cartes ou des GPS. Un deuxième phénomène explicatif concerne l'utilisation réduite de technologies à un âge très avancé. Pour ce qui concerne par exemple le faible usage du GPS après 50 ans (questionnaire 2), il est difficile de conclure que c'est l'âge en tant que tel qui influe. L'effet de cohorte semble être une explication plus plausible. Cependant, d'ici 10 ou 20 ans, quasiment toutes les personnes âgées seront utilisatrices des technologies de l'information et de la communication, puisque celles présentement âgées d'environ 50 ans les utilisent déjà. Un troisième facteur explicatif tient à l'utilisabilité et l'utilité perçue des aides technologiques à la navigation, et par là même à l'acceptabilité de ces technologies par les personnes âgées. Si les GPS pour voitures sont connus du grand public, ils ne sont pas pour autant faciles à utiliser par les plus âgés. L'utilité perçue en est alors d'autant plus faible. Quant aux aides technologiques à la mobilité piétonne en ville, elles sont méconnues par la plupart des personnes âgées. Peu sont

disponibles sur le marché, hormis les applications développées sur les smartphones que les plus âgés n'utilisent pas.

A cause de cette relative méconnaissance des aides à la navigation piétonne par les personnes âgées, nous avons décidé de continuer les études par des expérimentations avec des prototypes existants pouvant aider les personnes âgées à comprendre les fonctionnalités mis en avant par les concepteurs de la technologie innovante. Le prototype utilisé était un bracelet vibrotactile développé par le CEA LIST. Trois versions de ce bracelet ont été testées pendant les études. Ces expérimentations sont décrites dans le chapitre qui suit.

5. Etudes itératives pour la conception et l'évaluation des messages vibrotactiles

Ce chapitre fait état de trois études itératives visant à améliorer et évaluer un bracelet vibrotactile pour aider le piéton à mieux naviguer à pied dans une ville inconnue. Ces trois études ont été menées durant la première année du projet, à la suite du travail d'enquête précédemment exposé. L'étude 1 (section 5.1) repose sur la co-conception des messages vibrotactiles avec des personnes âgées directement (i.e. travail sur l'élaboration des messages). L'étude 2 (section 5.2) permet de faire un choix entre les deux conceptions de messages les plus fréquentes à l'issue de l'étude 1 (i.e. deux types de combinaison de paramètres physiques pour représenter des messages ayant le même sens). Enfin, l'étude 3 (section 5.3) présente une étude pilote des expérimentations principales menées sur simulateurs dans l'Année 2 du projet.

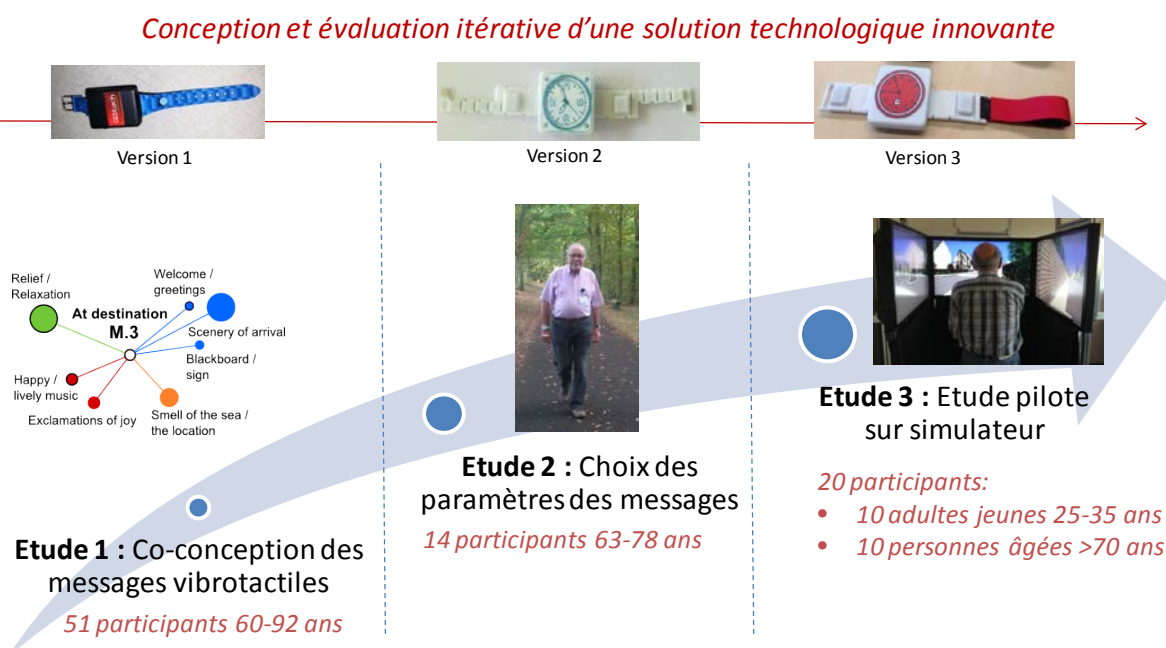


Figure 8. Conception et évaluation itératives d'une aide technique aux déplacements des piétons âgés

L'acceptabilité et l'utilisabilité du bracelet ont été évaluées dans chacune des études préliminaires afin de prendre en compte les avis subjectifs des participants et proposer des modifications adaptées du dispositif en question.

5.1. Etude 1 : co-conception des messages vibrotactiles avec les utilisateurs

Cette première étude se base sur une approche participative de co-conception de messages vibrotactiles avec leurs futurs utilisateurs. Cette co-conception utilise des métaphores quotidiennes associées au sens des messages vibrotactiles afin de renforcer le lien entre le message et la stimulation vibrotactile associée. Ainsi, l'objectif est de concevoir des messages expressifs et intuitifs qui peuvent, par conséquent, être facilement appris, mémorisés et acceptés par les personnes âgées.

Cette approche comprend deux étapes principales :

- le recueil des métaphores pour chaque message au cours d'entretiens en face-à-face (cf. section 5.1.1.)
- le choix des paramètres vibratoires pour chaque message et la conception des motifs, sur la base des métaphores recueillies. Ces motifs sont conçus par les utilisateurs directement avec l'aide de l'expérimentateur pour traduire au mieux leurs idées. Ils sont ensuite analysés et affinés pour constituer un corpus final de conceptions pour chaque message (cf. section 5.1.2.)

5.1.1. Recueil des métaphores

Dans une première phase, nous avons défini 7 messages à proposer aux participants, en plus des directions (gauche, droite, devant, demi-tour) pour un contexte de navigation piétonne, couvrant un ensemble potentiellement exhaustif de messages. Ces messages incluent :

- M.1 : Rassurer l'utilisateur qu'il est toujours sur le bon chemin
- M.2 : Alerter d'un problème
- M.3 : Alerter de l'arrivée à destination
- M.4 : Informer d'un point d'intérêt culturel ou de loisirs ou défini par l'utilisateur
- M.5 : Informer de la présence d'amis ou proches à proximité
- M.6 : Informer de la présence d'offres promotionnelles à proximité
- M.7 : Alerter que le bracelet vibrotactile est bien connecté et fonctionne

Le but était de collecter des métaphores ou analogies correspondant à ces messages.

Au total, 26 participants (7 hommes et 19 femmes) ont été recrutés pour cette phase, principalement par le biais de clubs seniors à Paris et dans l'Essonne. L'âge moyen de ces participants était de 73 ans (60-92 ans). Ils avaient un profil varié bien que majoritairement retraités (24 retraités versus 2 actifs). Les participants étaient représentatifs d'un large éventail de professions (ex. : employés de banque, gardien de cimetière ou encore directeur d'une agence de publicité). Concernant l'usage de téléphones mobiles, seuls 6 participants possédaient un téléphone intelligent. Dix-sept avaient un téléphone mobile "standard" permettant à leurs familles de les joindre ou utilisables en cas d'urgence. Trois participants ne possédaient pas de téléphone mobile. Onze des 26 participants avaient déjà utilisé le mode « vibration » de leurs téléphones mobiles pour des motifs de discrétion. Enfin, seuls 7 participants avaient déjà utilisé un dispositif technologique d'aide à la navigation.

Trois guides d'entretien ont été utilisés tour à tour pour recueillir des métaphores avec des consignes plus ou moins détaillées et abstraites. En effet, avec les premiers guides, les réponses obtenues étaient trop spécifiques, trop abstraites ou trop personnelles (ex. sur la Figure 9 ci-dessous, pour le guide 2, et pour M.5 le nom d'une personne proche fourni était « ma femme »). Nous avons ainsi découvert que les concepts abstraits (i.e. fournir des

métaphores génériques mais malgré tout concrètes) étaient difficiles à saisir pour les participants, et que la tâche devait être rendue aussi explicite et facile que possible tout en évitant les biais en fournissant trop d'informations. Il a donc fallu adapter les guides afin d'obtenir des réponses adéquates. En résumé, nous avons testé le premier guide d'entretien avec 6 participants (2 hommes / 4 femmes, 61 – 82ans, âge moyen 72 ans) où l'exemple d'un contexte a induit des réponses trop spécifiques, puis le deuxième guide d'entretien avec 5 autres participants (3 hommes / 2 femmes, 60 – 84ans, âge moyen 72 ans) où cette fois l'absence de contexte a induit des réponses trop abstraites et personnelles et, enfin, le dernier guide d'entretien avec 15 participants demandant explicitement pour chaque modalité et chaque message les analogies (2 hommes / 13 femmes, 63 – 92ans, âge moyen 74 ans).

Au total 139 métaphores différentes ont été recueillies, principalement issue du 3^{ème} guide. La Figure 9 ci-après représente les réponses communes à au moins 3 personnes (même mot ou même idée), ainsi que la proportion de réponses pour chaque message et pour chaque modalité sensorielle par la taille des cercles.

Nous avons utilisé une analyse de similarité ad-hoc, qui nous a permis de combiner les métaphores en fonction de la similarité de leur signification. Les résultats intègrent les données de tous les groupes, c'est-à-dire de l'ensemble des participants quelle que soit la version de la grille d'entretien utilisée. Dans l'ensemble, les métaphores auditives et visuelles sont les modalités dominantes, comme nous l'anticipions, puisque ce sont les modalités les plus couramment sollicitées dans la vie courante. Hormis pour M6 (Promotions, voir la Figure 9), tous les messages peuvent être reliés à des métaphores vibrotactiles, ce qui signifie que ces messages peuvent être associés à des sensations tactiles ou corporelles. Excepté pour les modalités gustative et olfactive, le reste des métaphores pourrait être utilisé dans n'importe quelle application utilisant ces messages. Par exemple, pour M5 (amis / proches à proximité), la présence d'amis (comme dans l'application Swarm de Foursquare) pourrait être indiquée 1) visuellement par des sourires ; 2) de façon auditive avec des chansons joyeuses et 3) tactilement avec un motif imitant la sensation de joie (cf. Figure 9). Pour M2 (problème), un problème pourrait être indiqué par un grand bruit, une sensation de blocage, une odeur de brûlé ou de gaz ou un signe de danger (cf. Figure 9). Le recueil des métaphores pour chaque modalité assure une conception cohérente des alertes pour un message donné dans une ou un ensemble d'applications et permet de fournir des modalités alternatives dans le cadre d'une « Conception pour Tous » ("Design for All").

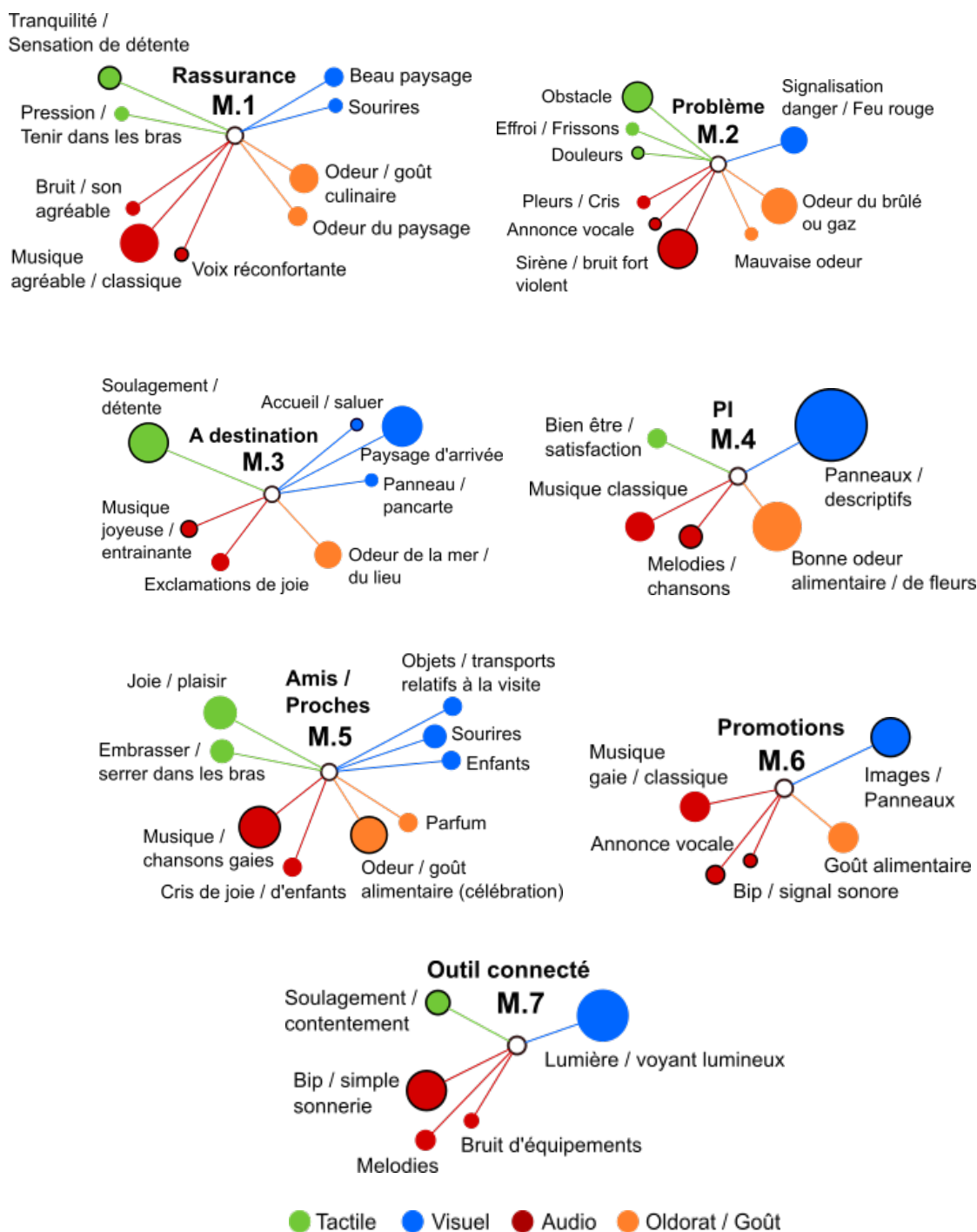


Figure 9. Résumé des métaphores données par au moins 3 participants.

Les cercles représentent proportionnellement le nombre de participants pour cette métaphore. Un cercle avec un contour noir indique les réponses des autres groupes (guide 1 et 2) qui ont également été incluses. Les cercles de couleur verte représentent les métaphores tactiles, ceux de couleur bleue les métaphores visuelles, les cercles rouges les métaphores auditives, et les cercles oranges les métaphores olfactives et gustatives.

5.1.2. Conception des messages vibrotactiles

Cette deuxième phase de l'étude avait pour but de concevoir les stimulations vibrotactiles pour chacun des 7 messages présentés dans la section précédente ainsi que les messages directionnels. Elle s'est appuyée sur les métaphores collectées lors de la première phase, à l'exception des métaphores gustatives et olfactives car celles-ci se transfèrent difficilement au domaine vibrotactile. L'approche participative a placé le participant au centre de cette conception puisque celui-ci devait choisir dans un premier temps la métaphore la plus représentative pour lui pour un message puis « programmer » la sensation vibrotactile correspondant à cette métaphore avec l'aide de l'expérimentateur en faisant varier les paramètres vibratoires.

Un échantillon de 25 personnes âgées retraitées (16 hommes et 9 femmes) a participé à cette phase, l'âge moyen étant de 72 ans (64-87 ans). Ils ont été recrutés principalement à travers l'ARCEA (l'Association des Retraités du CEA).

Au vu des commentaires des participants, nous avons restreint l'analyse des messages aux messages suivants : « droite », « gauche », « demi-tour », « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination ». Il s'est avéré, en effet, que le message « devant » n'était pas considéré comme nécessaire et rajoutait au contraire un message supplémentaire à mémoriser, puisque l'absence d'information de direction signifierait que, par défaut, il faut continuer tout droit. Les participants ont émis les mêmes réserves concernant le message « assurance » : l'absence d'alerte signifierait par défaut qu'ils ont emprunté le bon itinéraire alors qu'une erreur de parcours serait indiquée par un demi-tour ou de nouvelles directions si le système de navigation prend en charge un recalcul du parcours comme les GPS existants. Le message optionnel indiquant des promotions a été évalué comme peu utile par les participants de cette étude, voire assimilé à du spam équivalent au télémarketing. Enfin, le message « outil connecté » a été considéré comme redondant avec le voyant LED du bracelet et le bip d'allumage. Le message « amis à proximité » a également suscité peu d'intérêt. Ces divers retours des participants ont mis en valeur l'inquiétude à l'égard de la mémorisation des stimulations vibrotactiles. En effet, les participants étaient soucieux de diminuer au mieux les informations à mémoriser en se limitant aux informations nécessaires et en éliminant les informations redondantes telles que « devant », « assurance » et « outil connecté » ou non intéressantes telles que « promotions », et dans une moindre mesure « amis à proximité ».

Pour les messages restants, i.e. « droite », « gauche », « demi-tour », « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination », les paramètres utilisés par les participants pour programmer ces messages vibratoires ont été analysés. Nous avons ainsi analysé pour chaque message le rythme, l'amplitude, la durée, les répétitions et la localisation des vibrations de l'ensemble des stimulations vibratoires conçues par les participants. Cette analyse avait pour but de faire ressortir les paramètres dominants les plus communément utilisés pour chaque message. Par exemple, dans le cas de « problème », le paramètre dominant était en général la forte amplitude associée à l'utilisation de l'ensemble des vibreurs pour renforcer la forte intensité ressentie, avec des différences concernant la durée et les répétitions des vibrations.

Au final, pour chaque message, deux types de conceptions différentes se démarquaient avec une proportion à peu près égale de participants à les avoir choisies. Pour chacune de ces conceptions, les paramètres d'amplitude, de durée et de répétitions ont été analysés afin de concevoir le message le plus représentatif correspondant au choix des participants. Ils ont ensuite été divisés en deux ensembles, nommés Type 1 et Type 2, selon les règles suivantes pour assurer une meilleure discrimination (cf. Figure 10 ci-dessous pour leur description):

- au sein d'un ensemble, gauche et droite devraient avoir la même conception symétrique ;
- la conception des directions devrait être aussi distincte que possible des messages d'information (par exemple, si les directions sont répétées, les messages d'information devraient de préférence ne pas être répétés, ou du moins pas le même nombre de fois) ;
- et enfin, des rythmes similaires pour deux messages différents devraient être évités (par exemple, Arrivée de Type 1 et Demi-tour de Type 2).

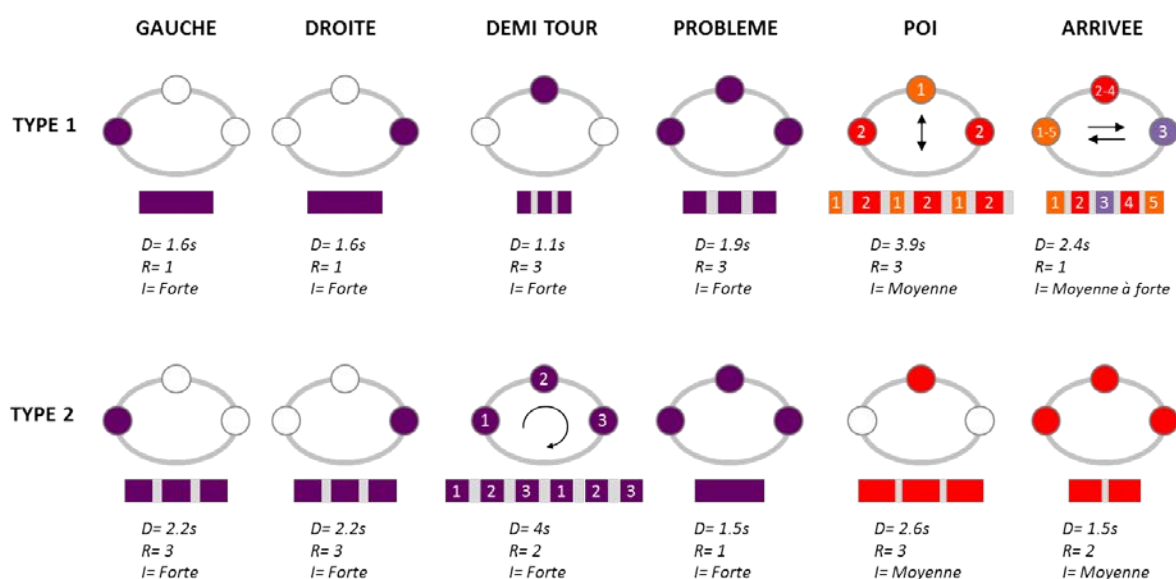


Figure10. Description des messages vibrotactiles et leur paramètres.

« D » signifie la Durée totale de la stimulation, « R » le nombre de Répétitions du motif, et « I » l'Intensité globale. L'intensité variable sous 5 niveaux est représentée par les couleurs : violet foncé et clair pour forte, et rouge/orange pour moyenne. La barre se situant sous le dessin du bracelet indique la séquence des vibrations avec les pauses en gris.

5.2. Etude 2 : choix des paramètres finaux

L'objectif de cette étude était d'évaluer la compréhension et la reconnaissance des messages vibrotactiles (Type 1 et 2) conçus au cours de la phase de conception participative initiale et ainsi de trouver le jeu final optimal pour la suite des expérimentations. Par conséquent, nous avons comparé la reconnaissance des deux ensembles de messages au cours d'une tâche de navigation piétonne à l'extérieur. En effet, la navigation en extérieur présente des défis particuliers tels que les changements dans les conditions météorologiques et routières, des bruits, etc. Tous ces facteurs peuvent avoir un impact direct sur la reconnaissance des messages vibrotactiles, d'où l'importance de les évaluer en contexte écologique. Un objectif secondaire était d'évaluer l'acceptabilité de l'aide à la navigation vibrotactile.



Figure 11. Photographie d'un participant prise au cours de la tâche de navigation en milieu naturel protégé (homme âgé de 78 ans)

5.2.1. Méthode

Quatorze participants (7H / 7F), âgés de 63 à 78 ans (moyenne = 72, SD = 4.33), ont pris part à l'étude. Ils ont été recrutés dans des associations de personnes âgées.

L'étude comprenait une rencontre d'une durée d'environ 2 heures avec chaque participant autour du site du CEA Nano-Innov à Gif-sur-Yvette. Chaque participant commençait par une phase de familiarisation, puis effectuait une tâche de navigation. Il répondait également à un questionnaire afin, notamment, d'évaluer l'utilisabilité du dispositif vibrotactile. Ce procédé était répété pour chacun des deux ensembles de messages.

- Phase de familiarisation

La phase de familiarisation a eu lieu dans une position assise statique (par exemple, sur un banc à l'extérieur). Chaque message était d'abord joué une première fois avec une description de sa signification et de ses paramètres pour aider l'utilisateur à localiser les actionneurs impliqués dans la stimulation. Ensuite, le message était répété trois fois afin d'aider le participant à le mémoriser. Ce processus était répété pour chacun des six messages. Les participants pouvaient demander une répétition supplémentaire si jugée nécessaire.

- Tâches de navigation

Au cours de la tâche de navigation, chaque participant a réalisé deux parcours extérieurs différents (cf. Figure 12 ci-après), pendant environ 20 minutes en fonction de leur vitesse de marche et des pauses. Les participants portaient le bracelet vibrotactile autour de leur poignet droit. Un ensemble de messages vibrotactiles était présenté au cours de l'un des deux itinéraires. L'ordre de présentation des deux ensembles de messages a été contrebalancé entre les participants, i.e. la moitié des participants a réalisé l'itinéraire 1 avec les messages de Type 1, tandis que l'autre moitié le réalisait avec les messages de Type 2, et inversement pour l'itinéraire 2. Pour chaque itinéraire, tous les messages ont été présentés 5 fois. Les participants recevaient le message et devaient ensuite verbaliser le message qu'ils avaient reconnu, et qui était immédiatement enregistré par l'expérimentateur à travers une application graphique Python. Afin d'assurer une validité écologique relative de l'étude, les messages étaient associés autant que possible à une information réelle valide dans l'environnement. De toute évidence, les directions étaient associées à l'itinéraire choisi, alors que les points d'intérêt correspondaient à différents points de repère (par exemple, des bâtiments), de même pour les problèmes liés à des dangers potentiels (par exemple les ravins).

- Questionnaire

Un questionnaire a été administré après la tâche de navigation. Il était composé de 31 questions basées sur une échelle de Likert à 6 points afin d'éviter des réponses neutres. Le questionnaire abordait la démographie des participants et leur difficultés de navigation et d'orientation ; leurs besoins et leurs attentes en ce qui concerne les aides à la navigation vibrotactiles ; leur appréciation subjective des messages et du dispositif vibrotactile présenté dans cette étude.

Itinéraire 1 - Aller



Itinéraire 2 - Retour



Figure 12. Itinéraires utilisés dans l'étude 2
 (Types de messages réitérés chacun 5 fois: droite (D), gauche (G), demi-tour (1/2 T),
 point d'intérêt (POI), problème (▲) et arrivée à destination (A))

5.2.2. Résultats

Pendant l'étude, des résultats à la fois quantitatifs et qualitatifs ont été recueillis. Ces résultats sont présentés ci-dessous et organisés en trois paragraphes : le premier présente les résultats quantitatifs sur les taux de reconnaissance, et les deux derniers décrivent les résultats qualitatifs sur la conception des messages vibrotactiles.

Comme la plupart des données n'a pas réussi à satisfaire le critère de la normalité, des comparaisons intra-groupe ont été effectuées en utilisant le test de Wilcoxon. Les réponses aux échelles de Likert ont été traitées comme des données ordinales au moyen de statistiques non paramétriques (Jamieson, 2004). Pour les données de fréquence (par exemple, le type de conception préféré), le test du chi carré a été utilisé pour tester l'hypothèse de l'indépendance entre les évaluations des participants. Les pourcentages de réponses ont été privilégiés lorsqu'ils étaient plus informatifs ou quand une approche catégorique se concentrait préférentiellement sur certaines réponses (par exemple, " souvent " et " très souvent " contrastaient avec les autres réponses).

Reconnaissance des messages

Les résultats montrent des taux de reconnaissance significativement plus élevés (> 88%, voir Figure 13) aux messages simples du type « droite » et « gauche », pour les deux ensembles de messages (Type 1 et Type 2), que pour les autres messages plus complexes « demi-tour », « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination ». Seule la comparaison entre le message simple « gauche » et le message complexe « demi-tour » de Type 2 est non significative ($T = 4,00$; $Z = 0,94$; ns). Bien que « droite » et « gauche » génèrent le même taux de reconnaissance pour la conception de Type 2, les taux diffèrent significativement pour le Type 1 ($T = 0,00$; $Z = 2,02$; $p < 0,05$) : étonnamment, le message « gauche » de Type 1 n'a pas été aussi bien reconnu que le message « droite » de Type 1 ($T = 0,00$; $Z = 2,02$; $p < 0,05$). En effet, les participants se sont plaint que l'actionneur gauche n'était pas ressenti aussi fortement que le droit pour une même intensité. Comme cela n'a pas été constaté par tous les participants, il pourrait y avoir différentes explications possibles. Cela pourrait être dû à des différences anatomiques sur le poignet avec la proéminence de l'os ulna sur le côté droit. Ce résultat pourrait également être causé par une dispersion de la fabrication industrielle entre les actionneurs, affectant ainsi l'intensité de la vibration. Cela pourrait aussi être dû à une adhérence inégale des actionneurs sur la peau. Ce phénomène semble par contre moins prononcé pour le Type 2, en raison des répétitions qui pourraient avoir augmenté le potentiel de perception des vibrations.

Les résultats montrent également un taux de reconnaissance du message « demi-tour » significativement meilleur pour le Type 2 (92,1%) que pour le Type 1 (39,7%, $T = 0,00$; $Z = 3,06$; $p < 0,01$). Précisons que ce message de Type 2 a été élaboré sur la base d'une métaphore imitant le mouvement d'un retournement, alors que le message « demi-tour » de Type 1 n'a pas été conçu de cette façon, mais plutôt par simple opposition aux messages de « gauche » et « droite » avec une propriété d'alerte. Ce résultat suggère un impact positif d'une conception basée sur des métaphores pour aider à la compréhension et la reconnaissance des informations vibrotactiles. Un autre message bien reconnu a été le message « problème » (71,4% pour le Type 2 et 64,3% pour le Type 1; $T = 16,05$; $Z = 0,21$; ns) constitué d'un long signal continu. Les métaphores impliquées ici sont fondées sur des alarmes, avec deux conceptions possibles, continue ou répétée.

Les deux autres messages « point d'intérêt » et « arrivée à destination » ont été mal reconnus et souvent confondus l'un avec l'autre, ou avec d'autres messages qui constituent des sous-ensembles possibles de ces messages. Une interprétation possible de ces résultats relativement faibles pourrait être que ces messages sont trop abstraits (i.e. pas de métaphore intuitivement associée) et nécessitent un apprentissage plus long pour les mémoriser. Ces résultats pourraient aussi être dus à un temps d'apprentissage trop court pour un grand nombre de messages - les participants ont appris 12 messages au total. Une autre explication pourrait être tout simplement que le temps d'apprentissage des messages plus complexes était trop court pour permettre aux participants de mémoriser tous les messages. La priorité a été donnée à ce que les participants ont considéré comme étant les messages les plus importants, i.e., les directions et les problèmes. Ceci est également confirmé par les observations faites par l'expérimentateur et les retours qualitatifs détaillés dans les paragraphes suivants.

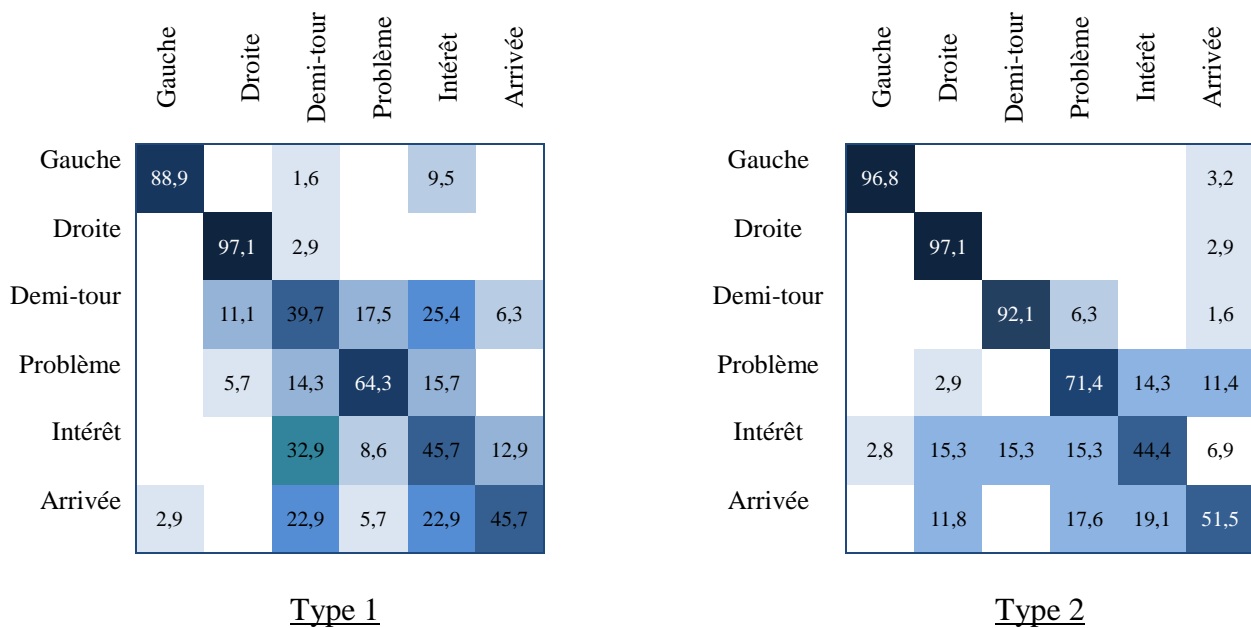


Figure 13. Taux moyens de reconnaissance des messages (en %) pour les deux ensembles de messages vibrotactiles et matrices de confusion.

Les diagonales indiquent les taux de reconnaissance corrects des messages alors que les autres données de chaque ligne indiquent le taux de confusion du message avec d'autres messages. Par exemple, « gauche » de Type 1 a été reconnu correctement à 88.9% ; les autres fois, il a été confondu avec « demi-tour » (1.6%) et « point d'intérêt » (9.5%).

Préférence des messages

A la fin de l'étude, les participants ont été interrogés sur leur préférence pour chaque message entre les Types 1 et 2. En ce qui concerne les messages directionnels « droite » et « gauche », les résultats ne montrent pas de différence majeure dans les préférences, bien que le Type 1 ait un léger avantage par rapport au Type 2 (cf. Figure 14 ci-après, $\chi^2(1, 14) = 0,54$, ns). Pour ce qui concerne les autres messages, les préférences diffèrent significativement entre les Types 1 et 2 de conception. La figure 14 montre que le second ensemble de messages vibrotactiles (Type 2) est majoritairement préféré par les participants, les différences étant significatives pour toutes les comparaisons Type 1 et Type 2 pour les 4 messages complexes ($\chi^2(4, 14) = 24,38$; $p < 0,001$ pour les comparaisons globales entre le Type 1 et le Type 2, $\chi^2(1, 14) = 28,00$, $p < 0,001$ pour « demi-tour », et $\chi^2(1, 14) = 20,57$, $p < 0,001$ pour « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination »). Il est à noter que tous les participants (100%) préféraient le message « demi-tour » qui était basé sur l'analogie naturelle de se retourner (Type 2: des vibrations dans le sens horaire) plutôt que la conception reposant sur une simple opposition avec les directions (Type 1). Les participants l'ont jugé plus « intuitif ».

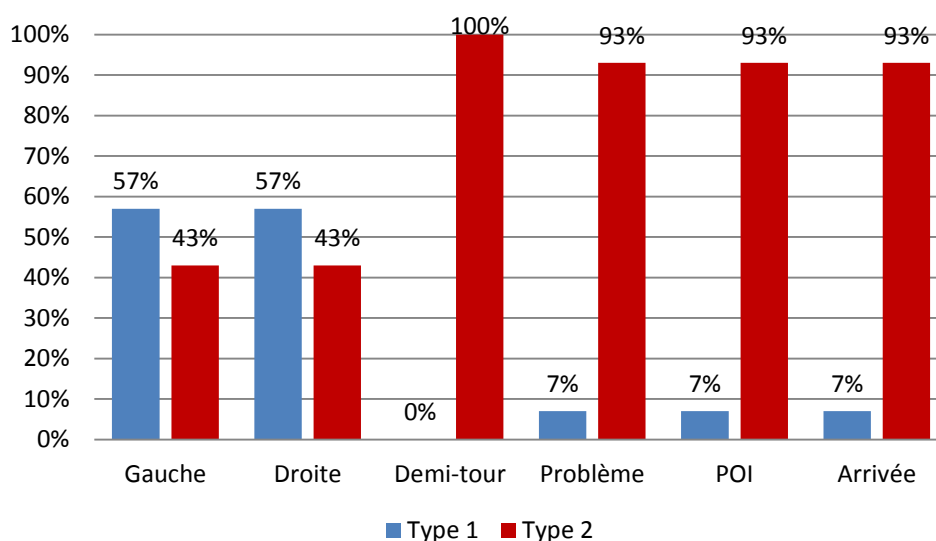


Figure 14. Préférence déclarée (%) pour chacun des messages vibrotactiles en fonction du Type 1 et 2 de conception

Pour les messages simples directionnels « droite » et « gauche », plus de la moitié des participants ont estimé qu'il n'était pas nécessaire de répéter, dans un message donné, les vibrations ($\chi^2(4, 14) = 22,54$, $p < 0,001$ pour des comparaisons globales entre les 6 valeurs de l'échelle de Likert; et $\chi^2(1, 14) = 14,28$, $p < 0,001$ entre les réponses "1", "2", "3" qui signifient "pas de répétition" et "4", "5", "6" réponses qui signifient « répétition »). Les participants ont estimé qu'une telle répétition exigerait plus de ressources cognitives pour traiter et mémoriser l'information haptique. Ils avaient également peur des confusions possibles avec les messages plus abstraits et complexes (i.e., les messages d'information). Les participants préféreraient avoir l'option de répétition « à la demande », lorsque jugé nécessaire.

Pour ce qui concerne les messages plus abstraits et complexes « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination », près de la moitié des participants a déclaré que les changements dans le nombre de vibrations et les répétitions internes pourraient causer des difficultés de mémorisation et de la confusion entre les messages abstraits. Contrairement à nos attentes, la répétition n'a pas été perçue comme une aide à la reconnaissance; celle-ci rend les messages « plus complexe ». En outre, 78% des participants ont estimé que les répétitions seraient principalement utiles dans une situation d'urgence pour souligner l'imminence d'un événement ou pour souligner un problème.

Questions générales sur l'acceptabilité

Les autres questions du questionnaire portaient sur l'acceptabilité générale de l'aide vibrotactile. Tout d'abord, concernant l'apprentissage et la reconnaissance des messages et la question de savoir si chacun des messages était mentalement exigeant, les commentaires des participants ont montré que les messages de Type 1 et de Type 2 n'étaient pas significativement différents concernant l'apprentissage ($\chi^2(20, 14) = 29,70$, ns). En revanche, ils l'étaient pour la reconnaissance ($\chi^2(12, 14) = 29,16$, $p < 0,01$) avec une légère préférence pour le Type 2. Cependant, concernant la facilité d'apprentissage et de reconnaissance, il y avait une différence significative pour l'apprentissage entre le Type 1 et le Type 2 ($\chi^2(16, 14) = 25,00$, $p < 0,05$), mais pas pour la reconnaissance ($\chi^2(12, 14) = 15,84$, ns), avec le Type 2 conduisant à une plus grande facilité d'apprentissage. Néanmoins, les données ont montré qu'il s'agissait d'une tâche plutôt facile et acceptable. Les difficultés qu'ont rencontrées les participants provenaient principalement des messages plus complexes (i.e., « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination »).

Lorsqu'interrogés sur leur satisfaction générale, seulement 14% des participants n'étaient pas satisfaits du Type 1 et aucun participant n'était insatisfait de la conception de Type 2. Le degré de satisfaction ne différait pas significativement entre les deux types conception ($\chi^2(12, 14) = 15,84$, ns). Toutes les données indiquaient que les participants étaient globalement satisfaits, en particulier par la conception de Type 2. Quelques améliorations étaient toutefois suggérées pour recombinaison des deux ensembles de messages selon les résultats de préférence du paragraphe précédent.

Quant à l'irritation causée par les vibrations, tous les participants hormis un, ont déclaré ne pas avoir ressenti de sensation irritante. Par contre 14% des participants ont déclaré ne pas avoir apprécié la sensation causée par les vibrations. Fait intéressant, 57% des participants ont trouvé utile de porter une telle aide à la navigation. Ils l'ont trouvé particulièrement utile pour indiquer les directions et les problèmes. En ce qui concerne les améliorations potentielles, les suggestions ont principalement abordé les fonctionnalités manquantes telles que la possibilité d'avoir un bouton de volume (pour des fins de discrétion ainsi que de perception, 71% des participants), un bouton « répéter le message » (tous les participants) et un message d'arrêt (93% des participants). Les autres améliorations concernent l'esthétique (la taille du bracelet, une apparence plus semblable à une vraie montre) avec 21% des participants, ainsi que les améliorations de la conception des messages d'information plus complexes.

Dans l'ensemble, les participants ont bien réagi au fait de porter le bracelet vibrotactile et à ses sensations, et ne sont donc pas mécontents d'obtenir des informations tactilement. Au contraire, ils étaient satisfaits et l'ont jugé utile et sécurisant. Leurs retours ont souligné

l'importance de concevoir des messages simples avec leur inquiétude concernant les problèmes d'inattention et de mémorisation, et un dispositif fonctionnel mais esthétique.

De par leur affiliation au CEA, les personnes âgées recrutées étaient probablement plus ouvertes à la technologie qu'un échantillon de personnes âgées avec une expérience professionnelle différente. Cependant, le bracelet vise les personnes âgées de demain qui auront fait ample usage de dispositifs innovants dans leur vie personnelle et professionnelle et qui seront ainsi moins réfractaires aux nouvelles technologies que les âgés d'aujourd'hui. Dans ce sens, recruter des personnes âgées déjà ouvertes aux nouvelles technologies dresse un portrait plus proche des utilisateurs ciblés par le bracelet.

5.2.3. Synthèse de l'étude 2 sur les paramètres des messages vibrotactiles

Cette étude a été menée pour évaluer la reconnaissance et la compréhension de messages vibrotactiles informatifs lors d'une tâche de navigation dans des conditions naturelles en milieu protégé (i.e., absence de trafic) auprès d'adultes âgés. Six messages (« droite », « gauche », « demi-tour », « problème », « point d'intérêt » et « arrivée à destination ») ont été évalués avec deux ensembles différents de conception afin d'identifier les meilleures combinaisons des paramètres pour atteindre un jeu final de messages intuitifs et pertinents pour les personnes âgées. Les différentes conclusions concernant l'utilisation d'une conception basée métaphore ou de répétitions internes dans un message ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte les besoins spécifiques de cette population ciblée, pour qui, par exemple, l'accent devrait être accordé à la simplicité et aux messages considérés comme cruciaux pour la tâche. Ces messages incluent les directions « droite » et « gauche », le message « demi-tour » et le message « problème ». Nous avons donc sélectionné ces messages pour la suite des études menées sur simulateur, avec « droite » et « gauche » de Type 1 et « demi-tour » / « arrivée » de Type 2 pour la tâche de navigation, ainsi que « problème » de Type 2 pour la tâche de traversée de rue. Le message « arrivée à destination », bien que considéré comme moins important par les personnes âgées sur l'hypothèse que la destination est reconnaissable, a été conservé pour la tâche de navigation car celle-ci impliquait un itinéraire vers une destination inconnue, avec la nécessité d'indiquer l'arrivée et donc la fin de la tâche.

5.3. Etude 3 : Etude pilote de l'efficacité de l'aide vibrotactile dans une tâche de navigation sur simulateur

L'objectif de cette étude pilote était de préparer la tâche de navigation de l'étude principale qui a été menée en 2015 au cours de la deuxième année du projet :

- en guidant le choix du dispositif de navigation en environnement virtuel qui sera utilisé (boutons de direction ou manche de direction ?),
- en testant le couplage technique du simulateur piéton avec le bracelet à retours vibrotactiles,
- en obtenant des indicateurs comportementaux à prendre en compte dans la tâche tant du point de vue de la technique que des consignes à donner et ce, afin d'adapter au mieux la tâche,
- en testant la distance d'envoi du message avant le changement de direction (5 ou 10 mètres),
- en poursuivant les tests d'acceptabilité et d'utilisabilité suite à l'utilisation du bracelet dans un environnement virtuel plus ou moins complexe.

5.3.1. Méthode

Vingt personnes ont pris part à l'étude. Deux groupes étaient formés : 10 personnes âgées de 70 ans ou plus et 10 adultes jeunes âgés de 20 à 35 ans.

Les critères d'inclusion spécifiques aux personnes âgées étaient les suivants :

- être âgé de 70 ans ou plus
- vivre à domicile et être autonome
- avoir un périmètre de marche déclaré supérieur à une demi-heure sans canne ou béquille

Les personnes âgées ont été recrutées à Versailles et les alentours par l'IFSTTAR (5 personnes) et le CEA-LIST (5 personnes). Les adultes jeunes ont été recrutés au sein du CEA-LIST (5 personnes) et de l'IFSTTAR-Satory (5 personnes). Pour les remercier du temps accordé à notre étude, des petits cadeaux étaient donnés aux 20 participants (matériel informatique).

L'étude comprenait une rencontre d'une durée de 2 heures environ avec chaque participant sur le site de l'IFSTTAR à Versailles Satory. Au début de chaque rencontre, l'expérimentateur expliquait le déroulement de l'étude. S'il acceptait de participer à l'étude, le participant signait alors le formulaire de consentement libre et éclairé.

Au cours de la séance, des pauses régulières étaient prévues, et le participant pouvait également en demander autant qu'il le souhaitait.

- Tâches de navigation

L'étude comprenait un test de marche, plusieurs essais de navigation sur le simulateur de l'IFSTTAR et quatre questionnaires sous la forme d'entretiens. Chaque participant commençait par réaliser dans un premier temps une tâche de marche simple hors simulateur pour mesurer précisément sa vitesse de marche sur 10 mètres, en m/s, et calibrer ensuite le dispositif de navigation piétonne sur simulateur.

Chaque participant réalisait ainsi 5 allers/retours à vitesse dite « normale » sur une distance de 10 mètres délimitée par des marquages au sol. Chaque marche était initiée 2 mètres avant chaque marquage afin d'atteindre une vitesse normale au marquage. On expliquait au participant qu'il devait marcher à allure habituelle, sans courir. Avant chaque aller/retour, il marquait une pause avant d'initier la marche suivante.

Puis le participant réalisait deux séries d'essais de navigation en zone urbaine, la première, sans bracelet (phase 1) pour évaluer deux dispositifs de navigation différents (des boutons de direction versus un manche de direction), et la seconde avec le bracelet, pour évaluer son utilisabilité et son acceptabilité.

Les tâches de navigation piétonne comprenaient au total 4 itinéraires :

- Un itinéraire dit "« libre », car aucune action n'était programmée sur simulateur. Le participant ne portait pas de bracelet, mais un itinéraire lui était dicté oralement par l'expérimentateur. Cet itinéraire était utilisé dans la phase 1 de l'expérimentation, dont l'objectif était d'évaluer les difficultés d'usage du dispositif de navigation seulement, en comparant deux modes d'interaction (boutons de direction versus manche de direction)

- Un itinéraire simple de familiarisation à la tâche de navigation avec bracelet vibrotactile. Il comprenait 2 messages pour tourner à gauche ; 2 messages pour tourner à droite ; 1 message faire demi-tour ; 1 message « arrivée à destination ».

- 2 itinéraires expérimentaux : L'itinéraire 1 allait d'un point A à un point B (A=>B) et comprenait 4 messages pour tourner à gauche ; 4 messages pour tourner à droite ; 1 message « arrivée à destination ». L'itinéraire2 allait du point B au point A (B=>A) et poursuit donc le même itinéraire que l'itinéraire 1 mais en sens inversé. Les deux itinéraires expérimentaux étaient répétés une fois chacun mais variaient, d'un essai à l'autre, selon la distance au point d'intérêt à laquelle se déclenchait le message vibrotactile au poignet : 5 mètres versus 10 mètres

Durant les tâches de navigation, les participants étaient invités à verbaliser leurs actions ainsi que les difficultés qu'ils rencontraient. Ces verbalisations étaient soigneusement notées.

Phase 1 : Evaluer deux modes d'interaction différents sur le simulateur de navigation piétonne (boutons de direction vs manche de direction)

Chaque participant commençait dans un premier temps par se familiariser avec l'un des dispositifs de navigation (boutons de direction versus manche de direction, durée : 1 à 2 minutes au moins, ordre contrebalancé). Il réalisait ensuite une tâche de navigation dans l'environnement simulé avec chaque dispositif (durée : 5 minutes environ). L'itinéraire était dicté oralement par l'expérimentateur. Une fois la tâche réalisée, et les deux dispositifs testés, le participant évaluait les dispositifs utilisés en même temps (en mode comparatif), via un questionnaire composé de 6 questions (cf. questionnaire 1).

Deux itinéraires étaient prévus (cf. Figure 15 ci-après), et leur attribution à chaque dispositif était contrebalancée entre les participants (la moitié des participants parcourrait l'itinéraire 1 avec les boutons de direction, et l'autre moitié avec le manche de direction, idem pour l'itinéraire 2).

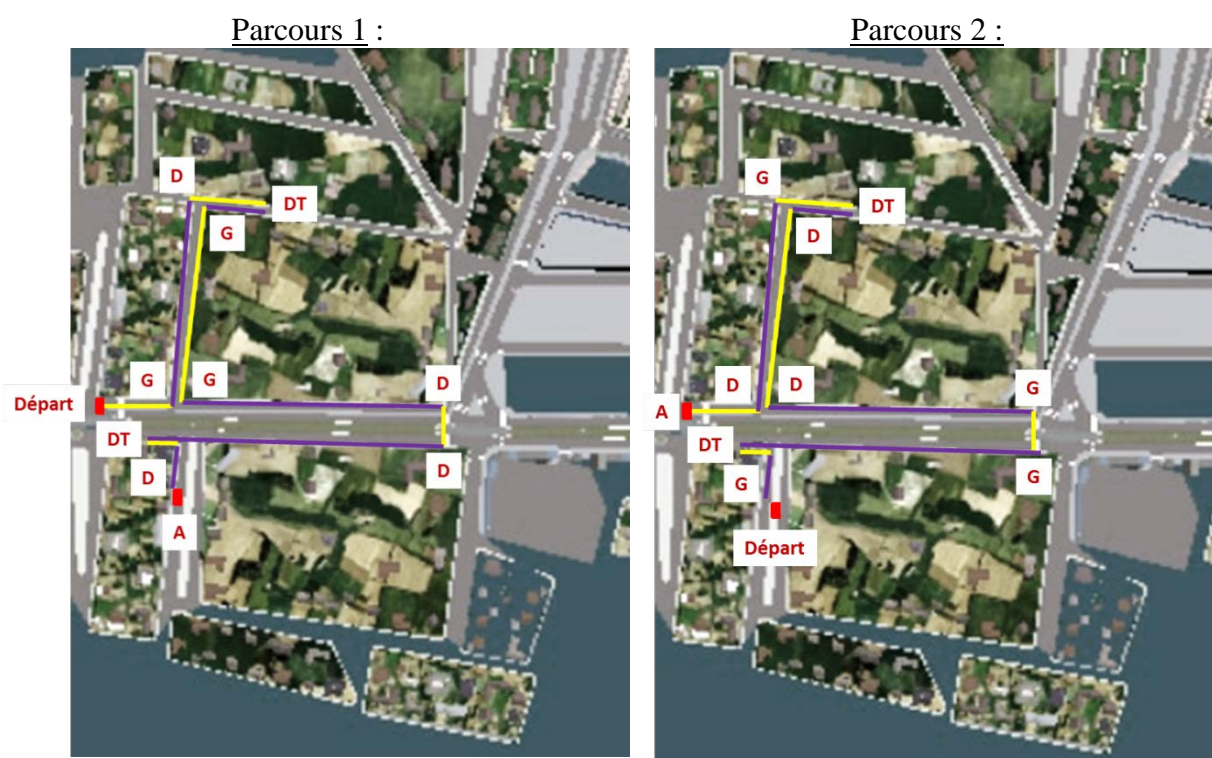


Figure 15. Parcours de navigation utilisés dans la phase 1 de l'étude pilote

Phase 2 : Evaluer l'utilisabilité et l'acceptabilité du bracelet vibrotactile sur simulateur de navigation piétonne, et tester le facteur distance des messages délivrés au point d'intérêt

A l'issue de la première phase, chaque participant choisissait un mode d'interaction avec le simulateur de navigation (boutons de direction ou manche de direction) pour toute la durée de la phase 2.

Dans la phase 2 de l'expérimentation, chaque participant commençait par se confronter aux messages vibrotactiles, par une phase de familiarisation hors simulateur, juste le bracelet au poignet. L'expérimentateur déclenchait chaque message à l'aide d'une application dédiée et fournissait des explications sur la conception du message et sa signification pour aider à son apprentissage. Chaque message était joué au total 5 fois dans un même ordre. Un mini-test de reconnaissance était mené à la fin afin de valider l'apprentissage avec une occurrence aléatoire de chaque message. Ainsi, l'expérimentateur donnait d'abord le titre du message (ex. tourner à droite), puis jouait le message une première fois. Il expliquait ensuite la conception du message (ex. le vibreur situé à droite vibre de façon continue pendant environ 1 seconde) et jouait à nouveau le message. Il était joué une dernière fois pour mémorisation et sans explications avant de passer au message suivant. Une fois tous les messages expliqués, chaque message était joué à nouveau une fois, les uns à la suite des autres pour renforcer l'apprentissage en comparaison. Le mini-test de reconnaissance était alors administré et les résultats à ce test étaient donnés à la fin. Pour finir, les messages étaient chacun rejoués une fois afin que participant puisse apprendre de ses erreurs.

Une fois les messages vibrotactiles appris et reconnus, le participant réalisait une première tâche de navigation, i.e. un itinéraire court, pour se familiariser avec les messages vibrotactiles dans le contexte d'une tâche de navigation (durée : 5 minutes). Le participant réalisait ensuite quatre essais de navigation qui étaient contrebalancés d'un participant à un autre. La procédure incluait donc les phases suivantes :

- familiarisation aux messages vibrotactiles hors simulateur (commandes à l'aide d'une application dédiée)
- familiarisation avec le bracelet sur simulateur de navigation piétonne (envoi du message 8 mètres avant le changement de direction)
- Essai 1 = itinéraire 1 avec envoi des messages vibrotactiles 5 mètres avant changement de direction
- Essai 2 = itinéraire 2 avec envoi des messages vibrotactiles 10 mètres avant changement de direction
- Essai 3 = itinéraire 1 : avec envoi des messages vibrotactiles 10 mètres avant changement de direction
- Essai 4 = itinéraire 2 : avec envoi des messages vibrotactiles 5 mètres avant changement de direction



Figure 16. Itinéraire utilisé dans la phase 2 de l'étude pilote⁵

Plusieurs données étaient recueillies lors de la tâche de navigation pour évaluer la performance globale par itinéraire : 1) le temps de parcours, 2) la vitesse de parcours, 3) la distance parcourue, les erreurs (détournement de trajectoire par rapport au GPS), 4) la liste des messages envoyés (même après erreurs), 5) le nombre d'actions réalisées pour naviguer (nombre de fois que chaque touche était actionnée pour réaliser un déplacement de A vers B, ou nombre de mouvements du manche de direction), 6) la trajectoire empruntée, ou le « re-jeu » du parcours (pour comparer un parcours théorique avec le parcours réalisé par le participant ainsi que les parcours entre participants sur un plan 2D).

⁵ L'itinéraire 2 est le chemin retour de l'itinéraire 1.

- Questionnaires

Les participants devaient répondre aux questions à partir d'une échelle de Likert en 6 points afin d'éviter les avis neutres.

Questionnaire sur le dispositif de navigation (Questionnaire 1, durée : 5 minutes). Un premier questionnaire a été réalisé afin d'évaluer le dispositif expérimental en comparant deux modes d'interaction (boutons de direction versus manche de direction). Ce questionnaire comportait 7 questions qui étaient posées à chaque participant après la tâche de navigation avec les deux dispositifs d'interaction.

Questionnaire sur la compréhension/reconnaissance des messages (Questionnaire 2, durée : 5 minutes). Un deuxième questionnaire (6 questions) a été réalisé afin d'évaluer la compréhension et la reconnaissance des messages fournis par le dispositif d'assistance vibrotactile. Les questions portaient sur l'utilité du bracelet, les difficultés liées à l'apprentissage et la reconnaissance des messages vibrotactiles ainsi que la gêne éventuellement occasionnée par les messages vibrotactiles autour du poignet et le port du bracelet. Ce questionnaire était présenté après les tâches de navigation.

Questionnaire sur les besoins/attentes des participants (Questionnaire 3, durée : 15 minutes). Un troisième questionnaire (7 questions) a été réalisé afin de recueillir des informations sur les attentes des participants concernant le bracelet à retours vibrotactiles autour du poignet. Ce questionnaire était présenté à chaque participant à la fin de l'expérimentation. Il permettait d'investiguer les besoins des personnes pour l'amélioration de la conception des messages vibrotactiles. Les questions portaient sur l'utilité et le sens des messages.

Questionnaire sur la situation des participants (Questionnaire 4, durée : 5 minutes). Ce questionnaire (16 questions) était destiné à recueillir des informations concernant le profil des participants, telles que l'âge, l'état de santé général, le niveau d'études, la catégorie socioprofessionnelle, le tour de poignet, les difficultés liées à l'orientation, les habitudes de déplacements (piétons et conduite) et l'historique des accidents/chutes.

- Description du simulateur de navigation piétonne de l'IFSTTAR

Le simulateur de navigation piétonne de l'IFSTTAR (Figure 17 ci-dessous) permet aux participants de naviguer dans une ville via une interface de commande du type boutons de direction ou manche de direction. Il est composé de 3 écrans de PC (LCD, 47 pouces) pour la visualisation des scènes routières. Les données visuelles 3D représentaient un environnement urbain sans trafic routier.



**Figure 17. Simulateur de navigation piétonne de l'IFSTTAR
(LEPSIS, Versailles Satory)**

5.3.2. Contraintes et difficultés techniques

Au cours de la première année du projet, le LEPSIS (IFSTTAR) a réalisé :

- l'intégration du bracelet vibrotactile dans les logiciels de simulation afin de pouvoir contrôler son fonctionnement.
- deux versions d'un module GPS, le premier avec comme objectif le chemin le plus court et un deuxième avec l'obligation de passer par des positions prédéfinies. Toute erreur de navigation est automatiquement détectée et identifiée. Un message indiquant la nouvelle direction est alors envoyé au bracelet et de façon répétitive si besoin, dans le cas où elle ne serait pas suivie.
- un module d'enregistrement des données spécifiques à l'évaluation de ce dispositif (trajectoire, time stamp des messages avec son identification, ...).
- un paramétrage et interfaçage de deux types de dispositifs de navigation : boutons de direction et manche de direction.
- la création d'une base3D spécifique pour les besoins de cette étude pilote comprenant deux zones : urbaine et résidentielle. Elle a de plus des zones de transit multimodales : une ligne de tram, plusieurs arrêts de bus et de métro.
- un logiciel permettant la visualisation en 2D (vue aérienne) de la trajectoire suivie par chaque participant ainsi que la représentation schématique des emplacements sur la carte des moments où le participant a reçu les messages émis par son bracelet.
- l'intégration des matériels (différents bracelets, l'adaptateur USB Bluetooth, etc.) et de tous les développements de logiciel et graphiques mentionnés ci-dessus dans le simulateur de LEPSIS à Versailles-Satory pour une version fonctionnelle du simulateur pour l'étude pilote.

Au-delà de l'aspect purement technique, il a été nécessaire d'anticiper au mieux le comportement des participants afin que chaque situation soit gérée par le système. Ceci a ainsi nécessité de nombreux tests du dispositif et plusieurs procédures d'ajustement et de résolution de problèmes.

5.3.3. Résultats de l'étude pilote

Voici les tendances générales observées au cours de cette étude pilote :

Evaluation des dispositifs de navigation – Sur l'échantillon de participants ayant répondu à l'étude pilote, 90% des participants âgés de 25 à 35 ans préfèrent le manche de direction pour naviguer dans l'environnement virtuel qu'ils qualifient de plus ergonomique et réagissant bien aux commandes, même s'ils préféreraient qu'il permette une meilleure fluidité de mouvements. Les boutons de direction sont quant à eux évalués plus négativement par les participants jeunes qui estiment qu'ils sont beaucoup moins ergonomiques et offrent selon eux moins de possibilités de mouvements. Les participants de plus de 70 ans sont en revanche 75 % à préférer utiliser les boutons de direction qu'ils estiment plus faciles à utiliser et à manipuler même si, chez certains, la coordination des doigts reste complexe.

Apprentissage des messages vibrotactiles– Seul un participant âgé a commis une erreur dans la tâche de reconnaissance des messages hors simulateur. Les participants, qu'ils soient jeunes ou âgés, rapportent ne pas devoir faire d'efforts et reconnaître facilement les messages.

Reconnaissance et utilisation des messages vibrotactiles au cours de la tâche de navigation– Durant la phase de familiarisation et les essais, très peu d'erreurs de reconnaissance des messages et donc d'itinéraires ont été observées. Les erreurs qui ont été commises résultent principalement d'un oubli du message entre le moment où il est émis et le moment où l'action doit être réalisée et d'une erreur de reconnaissance entre le message « arrivée » et le message « droite » (4 fois, des personnes qui arrivaient à destination ont confondu le message « arrivée » avec le message « droite », et ont donc tourné à droite après le point d'arrivée ; à noter que le message « droite », quant à lui, n'a jamais été confondu avec le message « arrivée »).

Comportements de navigation – Deux comportements distincts ont été observés chez les participants. Ceux qui ne respectent pas les trottoirs et les passages piétons dans l'environnement virtuel ne présentent aucune difficulté quant à la reconnaissance de la rue à emprunter suite à l'envoi d'un message indiquant un changement de direction (fonctionnement spatial « global »). A l'inverse, certains participants respectent les trottoirs et cherchent à toujours traverser sur un passage piéton. Ainsi, il a été observé qu'après avoir reçu un message indiquant un changement de direction, ces participants cherchaient un passage pour traverser soit en poursuivant tout droit leur chemin soit en revenant en arrière. Ce comportement entraînait alors deux difficultés : soit 1/ comme prévu par le système, le participant ne suivant pas l'indication du bracelet, il recevait un message « demi-tour » et ne comprenait plus, de ce fait, où il devait aller, soit 2/ une fois qu'il avait traversé où il le souhaitait, il ne se souvenait plus de la direction à prendre (fonctionnement spatial « pas-à-pas »).

Distance d'envoi des messages – Les participants ne semblent pas avoir été influencés par la distance d'envoi du message (5 mètres ou 10 mètres avant l'intersection). Ils rapportent toutefois avoir eu l'impression que les messages n'étaient pas toujours envoyés au même moment mais cette impression semble surtout lié au contexte environnemental (carrefour simple ou complexe ; voie étroite ou large ; environnement visuellement chargé ou simple).

Facteurs d'exclusion- deux participants âgés ont présenté des signes de cinétose (i.e., situation de discordance entre la perception visuelle et le système vestibulaire entraînant un étourdissement, de la fatigue et des nausées). L'étude a donc été immédiatement interrompue pour ces deux personnes. Après avoir investigué les raisons de ce trouble, il semble que ces

personnes souffraient toutes les deux de désordres de l'oreille interne entraînant fréquemment des vertiges.

Limites observées– Si les messages sont globalement bien compris par les participants, ces derniers rapportent majoritairement reconnaître les messages du fait de la vibration ET du son associé à celle-ci. Effectivement, le contact des actionneurs avec le plastique du bracelet produit un son qui diffère d'un message à l'autre (lien possible également avec le poignet où l'os est plus saillant à l'extrémité gauche qu'à l'extrémité droite. Néanmoins, il est à rappeler que cette étude se déroulait dans un environnement urbain totalement silencieux, sans trafic).

5.3.4. Conclusions principales de l'étude pilote

S'agissant de la préférence du dispositif à utiliser durant la tâche de navigation (manche ou boutons de direction), il a été décidé de conserver le manche de direction pour l'étude principale de l'Année 2. Il ne faisait pas l'unanimité chez tous les participants de l'étude pilote, mais il s'agissait du dispositif qui était le plus facilement utilisable conjointement avec le bracelet (en portant le bracelet, l'appui sur les boutons de direction était gêné et les participants rapportaient une sensation de coupure au poignet. Une marque de frottement sur la peau du poignet était d'ailleurs souvent visible surtout, chez les personnes âgées pour qui la peau est fine et plus sensible). Pour répondre aux commentaires des participants de l'étude pilote, des améliorations ont par contre été apportées au manche de direction pour, notamment, en fluidifier le mouvement.

Pour l'étude principale, et suite à cette étude pilote, le son associé à la vibration sera masqué par un fond sonore de circulation routière. Des véhicules circuleront dans les expérimentations principales de l'Année 2, conditions plus proches des conditions réelles d'utilisation du bracelet en milieu urbain.

L'apprentissage et l'adaptation rapides qu'ont montré les participants de cette étude pilote au bracelet est encourageante pour le déroulement des études principales qui, pour rappel, comporteront à la fois une tâche de navigation piétonne en milieu urbain sur simulateur, et une tâche de traversée de rue sur simulateur également. Cette dernière tâche de traversée de rue sur simulateur n'a pas fait l'objet d'une étude pilote car l'IFSTTAR disposait déjà d'une expertise forte quant à la mise en œuvre technique et aux choix méthodologiques à définir sur ce type de tâche, contrairement à la tâche de navigation piétonne sur simulateur, grande nouveauté pour l'équipe simulateurs de l'IFSTTAR.

6. Etude 4 portant sur l'évaluation de l'efficacité du bracelet vibrotactile dans une tâche de traversée de rue sur simulateur

6.1. Population

Un échantillon de 57 personnes a participé à l'étude 4, dont :

- 17 adultes d'âge moyen, entre 20 et 35 ans (M=27.41, SD=6.10 ; 7 femmes, 10 hommes)
- et 40 personnes âgées réparties en deux groupes :
 - 20 personnes âgées entre 60 et 70 ans (M=66.45, SD=2.28 ; 11 femmes, 9 hommes)
 - 20 personnes plus âgées⁶, au-delà de 70 ans et jusque 80 ans (M=74.55, SD=2.80 ; 11 femmes, 9 hommes).

Les personnes âgées ont été recrutées dans les environs de l'IFSTTAR à Versailles, Vélizy et Paris, dans des clubs ou associations seniors. Les participants âgés étaient tous autonomes et indépendants, vivent à leur domicile et se déplacent quotidiennement sans canne ni béquille. Le port d'un stimulateur cardiaque, d'une pompe ou d'un appareil électronique implanté était un motif d'exclusion. Les participants jeunes ont été recrutés dans les universités environnantes ou par annonces diffusées dans des réseaux d'informations (ex. RISC). Pour les rembourser des frais générés par le déplacement pour se rendre dans les locaux de l'IFSTTAR à Versailles Satory, chaque participant a reçu une indemnisation de 30 euros. Au début de chaque rencontre, l'expérimentateur expliquait le déroulement de l'étude. Si le participant acceptait de participer à l'étude, il signait alors le formulaire de consentement libre et éclairé.

6.2. Bracelet vibrotactile utilisé dans l'étude 4

Le bracelet vibrotactile utilisé dans l'étude 4 (cf. Figure 18 ci-dessous) est composé de trois actionneurs indépendants autour du poignet. Les messages vibrotactiles (non douloureux⁷) délivrés à l'utilisateur se présentent comme des séquences de vibrations variant en intensité et rythme. Pour la tâche de traversée de rue, le message envoyé par le bracelet est une alerte correspondant à une vibration à forte intensité sur l'ensemble des actionneurs, i.e. tout autour du poignet. Ce message correspond au message vibrotactile « problème » résultant de l'étude de choix des messages.

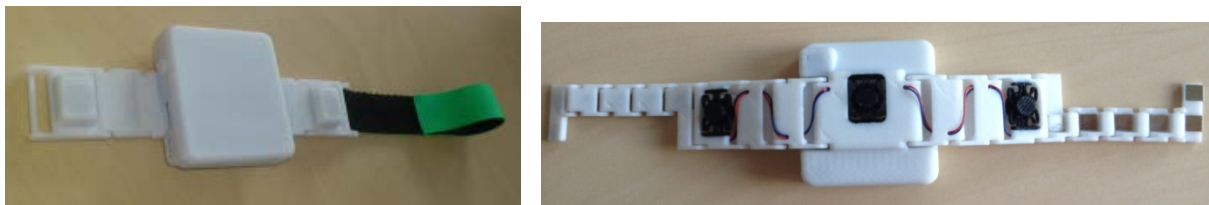


Figure 18. Bracelet vibrotactile testé dans le projet A-PIED

6.3. Simulateur de traversée de rue et tâche proposée aux participants

Le dispositif de simulation pour la traversée de rue est un outil de réalité virtuelle qui

⁶ La limite de 70 ans correspond à l'âge médian de l'échantillon de plus de 60 ans.

⁷ La composition des messages et leur sensibilité ont été testées préalablement par le CEA-LIST chez des participants jeunes et âgés dont les caractéristiques étaient identiques à la population recrutée pour cette étude.

permet la visualisation de trafic dans les deux directions et le déplacement du piéton sur une distance de plus de 7 mètres en traversant deux voies de circulation (cf. Figure 19 ci-après). La position du piéton au sein du dispositif est enregistrée online, *via* le système de capture des mouvements Vicon®. Ce système permet l'interactivité du simulateur, à savoir l'asservissement de la scène visuelle aux positions du piéton qui se modifient tout au long de sa traversée.



Figure 19. Simulateur immersif et interactif de traversée de rue de l’Ifsttar, à Versailles-Satory.

Chaque participant réalisait individuellement une tâche de traversée de rue sur le simulateur. Chaque personne répondait, au total, à 104 essais de traversée de rue répartis en deux séries de 52 essais : (i) la première série avec le bracelet vibrotactile (2 blocs de 26 essais entrecoupés d’une pause) et (ii) la deuxième série de 52 sans le bracelet (2 blocs de 26 essais entrecoupés d’une pause). Ces deux séries d’essais étaient contrebalancées pour limiter les effets d’apprentissage. Le participant était placé dans la configuration d’un piéton attendant au bord de la rue à double sens de circulation, où des véhicules approchent dans les deux sens de circulation et à des vitesses de 40 ou 60 km/h.

Les fenêtres temporelles disponibles pour la traversée étaient manipulées en fonction de la vitesse de marche du participant préalablement mesurée, afin de proposer des situations de difficulté variable mais adaptées à chacun. Chaque participant disposait en effet d’opportunités similaires pour traverser la rue : environ 50% des essais proposés étaient sécurisés, c’est-à-dire que le temps disponible pour traverser était supérieur au temps nécessaire à chaque participant pour traverser. L’autre moitié des essais proposait des situations dangereuses où le temps disponible pour traverser la rue était inférieur au temps nécessaire pour franchir une ou plusieurs voies de circulation où approchaient des véhicules.

Pour adapter les essais de traversée de rue à chaque individu, une tâche de marche simple dans le simulateur était effectivement proposée au tout début de l’étude. L’objectif était de mesurer précisément la vitesse de déplacement de chaque individu sur 5.7 mètres (cette distance correspond à la largeur de la chaussée à traverser). Cette mesure de vitesse moyenne de marche était nécessaire pour calibrer ensuite le simulateur aux capacités réelles de chaque individu. Chaque participant réalisait ainsi 6 allers/retours à une vitesse dite « soutenue » correspondant au mieux à une vitesse de traversée de rue hors passage piéton dans la réalité. Chaque marche était débutée 2 mètres avant et arrêtée 2 mètres après le marquage au sol afin d’éliminer des calculs de vitesse les premiers et derniers pas qui sont toujours plus lents. Avant chaque aller/retour, il marquait une pause avant d’initier la marche suivante.

Pour chaque essai proposé ensuite dans le simulateur de traversée de rue, le participant devait décider s'il pouvait ou non traverser la rue de façon continue et sans courir. Il traversait réellement s'il pensait en avoir le temps et il restait sur le trottoir et attendait le prochain essai s'il pensait ne pas en avoir le temps.

Au cours des essais avec le bracelet d'aide à la traversée de rue, un message vibrotactile était transmis au participant lorsque la situation était dangereuse et ne lui permettait pas de traverser en toute sécurité (il n'avait pas le temps de franchir une ou les deux voies de circulation).

Une phase de familiarisation au simulateur et à la tâche de traversée de rue était d'abord proposée au participant, jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise et comprenne totalement la tâche. La durée totale de la tâche de traversée de rue sur simulateur (familiarisation et essais expérimentaux) était au maximum de 2h30. Au cours de cette session, des pauses régulières étaient prévues et le participant pouvait également en demander autant qu'il le souhaitait.

6.4. Questionnaires et tests

Questionnaire d'informations générales - Ce questionnaire était destiné à recueillir des informations concernant le profil des participants, telles que l'âge, le niveau d'études, la catégorie socioprofessionnelle, leurs difficultés perçues à s'orienter, leur autonomie dans les déplacements, les habitudes de déplacements (piéton et conduite) et l'historique des accidents/chutes.

Mini Mental State Examination - Le MMSE mesure le statut cognitif global et représente un bon indicateur des déficits liés à un vieillissement pathologique (Folstein et al., 1975). Ce test consiste en une série de 30 items répartis en six catégories: i) évaluation des capacités d'orientation spatiale et temporelle, ii) évaluation des capacités d'apprentissage et transcription d'informations, iii) évaluation des capacités attentionnelles et de calcul, iv) évaluation des capacités mnésiques, v) évaluation des capacités langagières et vi) évaluation des praxies constructives (réalisation d'une séquence ordonnée de gestes pour une action précise). Un score total inférieur à 26/30 indique la présence d'un déficit cognitif lié à un vieillissement pathologique. Tous les participants de l'étude ont obtenu un score supérieur à ce seuil.

Questionnaire d'évaluation subjective du bracelet - Ce questionnaire est basé sur le modèle *Technology Acceptance Model 3* (TAM, Venkatech & Bala, 2008). Il vise à recueillir l'avis de chaque participant envers l'efficacité du bracelet, son efficacité, sa satisfaction et son intérêt perçu. Ces notions permettent d'obtenir des données fines de l'acceptabilité et l'utilisabilité du bracelet. Ce questionnaire validé est composé de 54 affirmations regroupées en 16 catégories. A chaque affirmation le participant doit répondre sur une échelle allant de 1 étant « Pas du tout d'accord » à 7 « Tout à fait d'accord ». Pour notre étude, nous avons adapté ce questionnaire à l'utilisation et au fonctionnement du bracelet. Certaines catégories ont été supprimées car elles ne correspondaient pas à une utilisation en situation expérimentale. Nous avons donc gardé 12 catégories sur les 16 soit 40 affirmations.

6.5. Procédure expérimentale

Chaque participant était accueilli par l'expérimentateur qui lui présentait les objectifs de l'étude et les conditions de sa participation. Il complétait ensuite le formulaire de consentement libre et éclairé. Cette session se poursuivait par le remplissage du questionnaire d'informations générales, puis la mesure de la vitesse de marche. Ensuite, la moitié des participants commençait par réaliser la tâche de traversée de rue avec bracelet et l'autre moitié des participants d'abord sans bracelet. Les participants passaient ensuite le MMSE puis réalisaient la deuxième partie de traversée de rue selon l'autre condition (avec ou sans bracelet). A la fin, les participants répondaient à des questions sur leur sentiment d'immersion dans le simulateur et au questionnaire issu du TAM.

6.6. Données recueillies et analyses statistiques opérées

Le simulateur nous permet de recueillir les données comportementales suivantes :

- le *pourcentage de collisions virtuelles* : le piéton a décidé de traverser et s'est trouvé être sur la trajectoire de la voiture au moment où elle passait à sa hauteur,
- *l'adéquation de la décision avec le message délivré par le bracelet* : le participant a traversé lorsque le bracelet lui indiquait qu'il pouvait le faire ou non.
- les données de type *utilisabilité et acceptabilité* ont été codées de 1 à 7.

Les données comportementales de traversée de rue ont été étudiées par des analyses de variances univariées (ANOVA) sur la mesure du pourcentage de collisions via des comparaisons entre les groupes de participants en fonction de l'âge (jeunes ; jeunes-âgés et âgés-âgés), de leur sexe et de la situation de passation (avec ou sans bracelet vibrotactile). La statistique de l'ETA-carré partiel (η^2) a été utilisée comme indice de l'importance de la taille des effets. Les tests de post hoc ont été réalisés à l'aide du test HSD de Tukey qui permet de comparer chaque groupe ou condition à chaque groupe ou condition *a posteriori*. Pour tester les hypothèses *a priori*, des études de contrastes planifiés ont été réalisées.

Les données issues du TAM ont été codées numériquement et ont été traitées comme des données ordinales par le biais de statistiques non paramétriques (Jamieson, 2004). Les comparaisons des groupes ont été réalisées en utilisant le test de Kruskal-Wallis (effet du groupe d'âge) avec les scores moyens fournis sous forme de données descriptives. Cependant, les pourcentages de réponses ont été privilégiés quand ils se sont révélés plus informatifs. Pour ces données de fréquence, le test du chi-carré a été utilisé pour tester l'hypothèse de l'indépendance entre deux échantillons de répondants.

Pour l'ensemble des analyses, le niveau de significativité a été fixé à 0,05.

6.7. Résultats

6.7.1. Données comportementales de traversée de rue : efficacité du bracelet

Effet principal de la condition (bracelet versus sans bracelet)

L'analyse met en évidence un effet significatif de la condition avec ou sans bracelet sur le pourcentage moyen de collisions ($F(1,51)= 7.02$; $p<.02$; $\eta^2=.12$; cf. Figure 20). Le pourcentage de collisions lors de la traversée de rue est réduit chez tous les participants lorsqu'ils utilisent le bracelet.

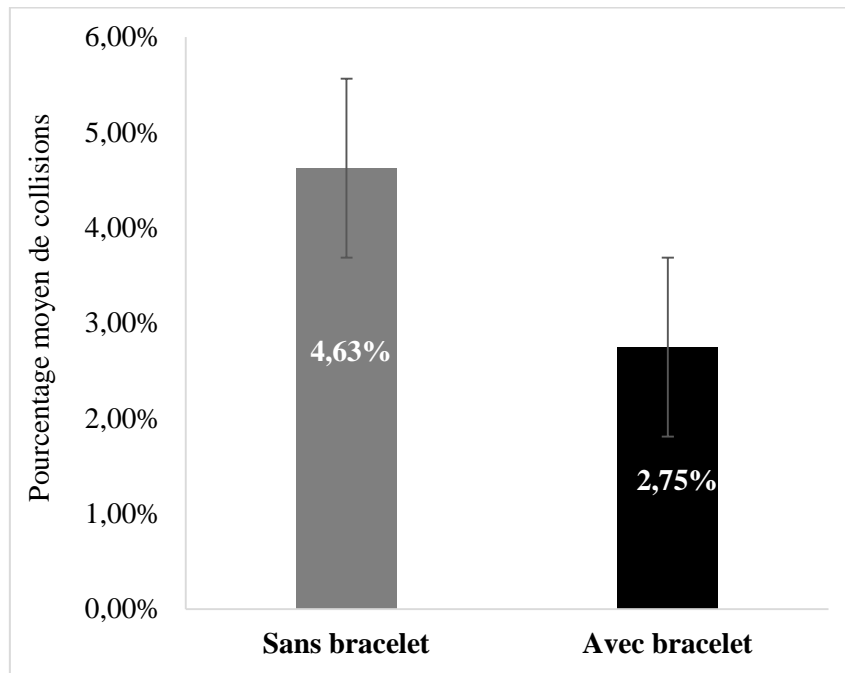


Figure 20. Pourcentage moyen de collisions en fonction de la condition expérimentale : avec ou sans bracelet à retours vibrotactiles

Effet principal de l'âge

L'analyse met en évidence des différences significatives entre les groupes d'âge quant aux pourcentages moyens de collisions ($F(2,51)=7.21$; $p<.01$; $\eta^2= .22$; cf. Figure 21). Tel que retrouvé classiquement dans la littérature, le pourcentage de décisions de traversée de rue menant à une collision augmente avec l'âge. Les participants très âgés ont significativement plus de collisions que les âgés (test HSD de Tukey, $p<.05^{**}$) et que les jeunes (test HSD de Tukey, $p<.05^*$).

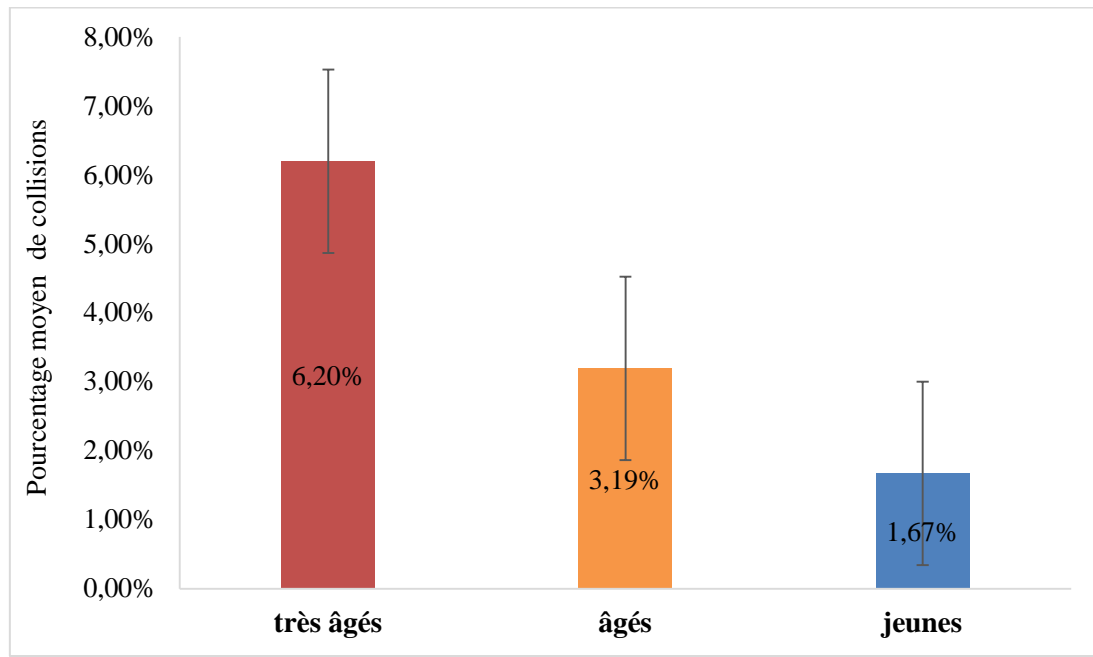


Figure 21. Pourcentage moyen de collisions en fonction du groupe d'âge.

Effet principal du sexe

L'analyse des données met en évidence un effet significatif du sexe des participants sur le pourcentage moyen de collisions ($F(1,51)= 5.21$; $p<.03$, $\eta^2=.09$; cf. Figure 22) ; les femmes ($M=5.01\%$) ont plus de collisions que les hommes ($M=2.53\%$).

Effets d'interaction

Les analyses statistiques montrent une interaction significative entre le sexe et le groupe d'âge des participants ($F(2,51)= 3.41$; $p<.05$; $\eta^2=.12$; cf. Figure 22). Les analyses de post-hoc (test HSD de Tukey) montrent que les femmes très âgées se différencient significativement des autres groupes de participants en étant celles qui ont significativement le plus de collisions. Les autres comparaisons n'ont révélé aucune différence significative.

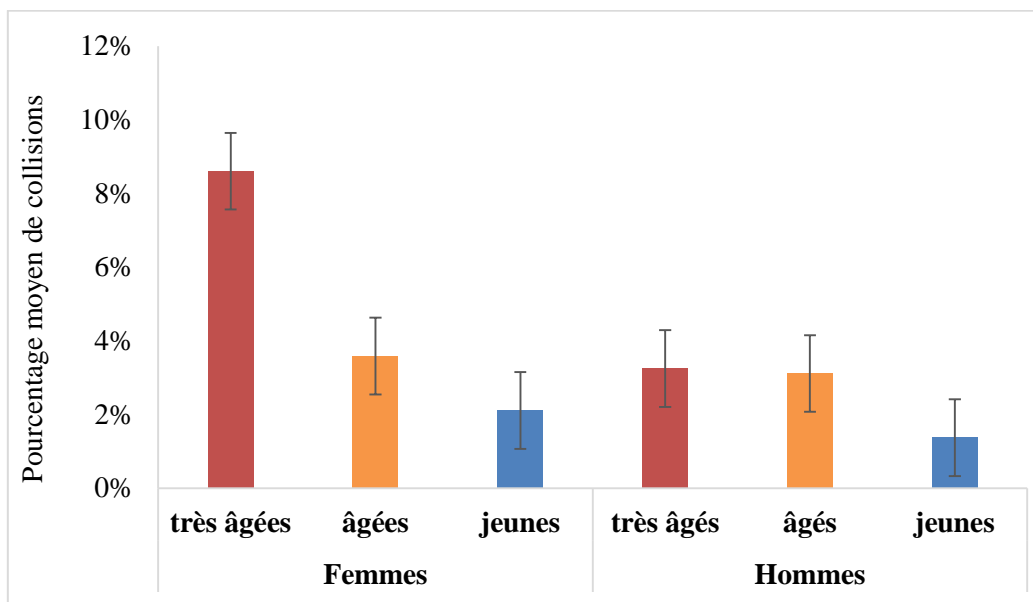


Figure 22. Pourcentage de collisions en fonction du genre et du groupe d'âge d'appartenance des participants

En revanche, l'analyse des données n'a pas mis en évidence d'interaction significative entre la condition de passation (avec ou sans bracelet) et le groupe d'âge ($F=0.21$; ns ; cf. Figure 23). En d'autres termes, le bracelet diminue le risque de collisions et cela, quel que soit le groupe d'âge des participants..

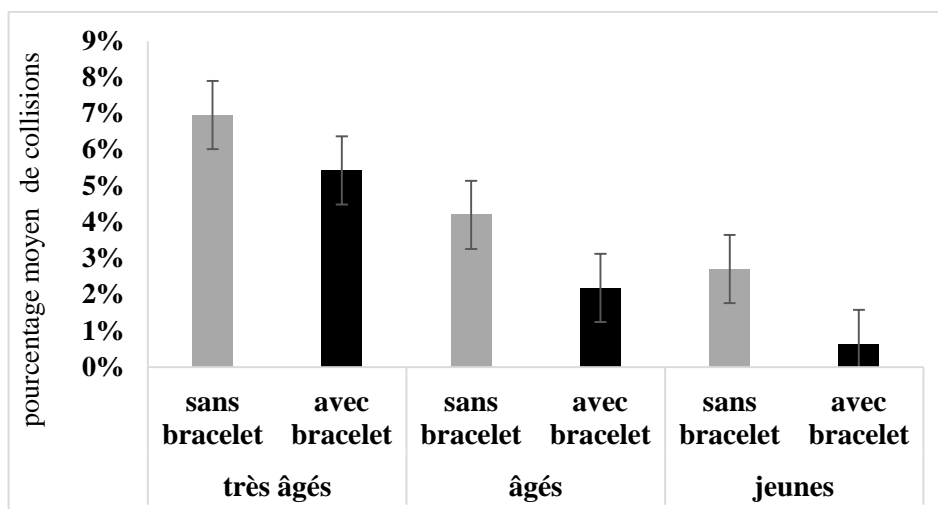


Figure 23. Pourcentage moyen de collisions en fonction du groupe d'âge et de la condition de passation (avec ou sans bracelet)

L'interaction entre la condition et le sexe des participants s'est révélée significative ($F(1, 51)=5.06$; $p<.03$; $\eta^2=.09$; Figure 24). Les femmes ont plus de collisions sans bracelet qu'avec bracelet (test HSD de Tukey, $p<.01$). Sans bracelet, elles en ont également plus de collisions que les hommes sans bracelet (test HSD de Tukey, $p<.02$) ou que les hommes avec bracelet (test HSD de Tukey, $p<.01$).

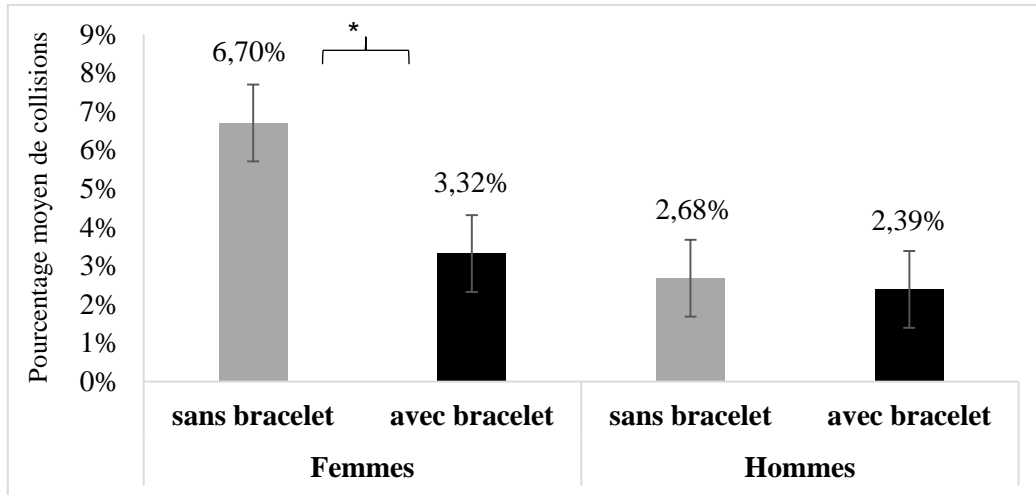


Figure 24. Pourcentage moyen de collisions en fonction du sexe des participants et de la condition de passation : avec ou sans bracelet

Sur la base de la littérature, nous avons émis l'hypothèse que les femmes les plus âgées, du fait de leur plus grand risque de collisions, bénéficieraient encore plus de l'utilisation du bracelet dans la réduction du risque. Bien que l'interaction entre la condition, le groupe d'âge et le sexe ne soit pas significative ($F(2, 51)=0.98$, ns), l'étude du contraste planifié *a priori* permettant de comparer le pourcentage de collisions chez les femmes très âgées avec et sans bracelet a montré que cette différence était effectivement significative ($F(1,51)=50.98$; $p<.001$; cf Figure 25).

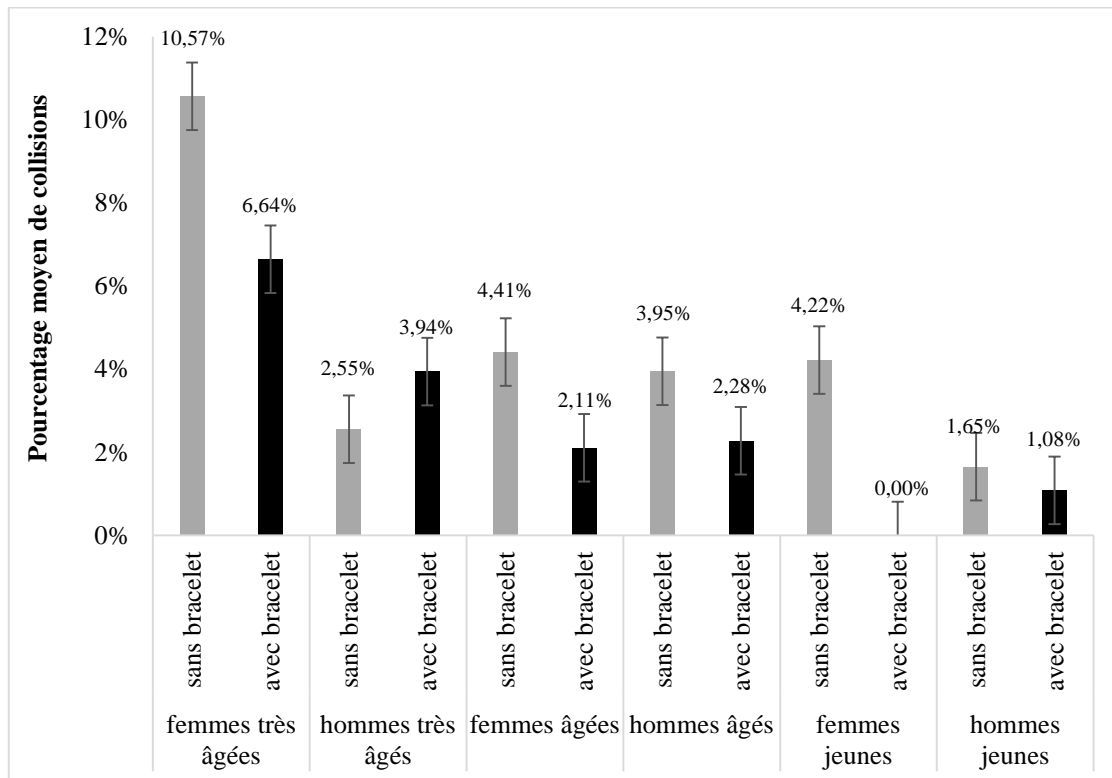


Figure 25. Pourcentage moyen de collisions en fonction du groupe d'âge, du genre des participants et de la condition de passation : avec ou sans bracelet

6.7.2 Données portant sur les caractéristiques des participants

Les données de mobilité des participants permettent d'expliquer au moins en partie le fait que les femmes aient plus de collisions lors de la traversée de rue, comme suggéré également par la littérature. Par exemple, quelques études ont montré qu'avec l'âge, les femmes sont plus nombreuses à cesser de conduire (Hakamies-Blomqvist & Wahlström, 1998 ; Marottoli et al., 2000) et donc, elles utilisent plus la marche comme moyen de déplacement que les hommes, les rendant plus vulnérables (pour une revue voir, Holland & Hill, 2007, Davey, 2007). Nos données vont dans ce sens également. Les femmes très âgées sont moins nombreuses à conduire encore ($\chi^2(1, N=37)=7.01$; $p<.01$; Figure 26)

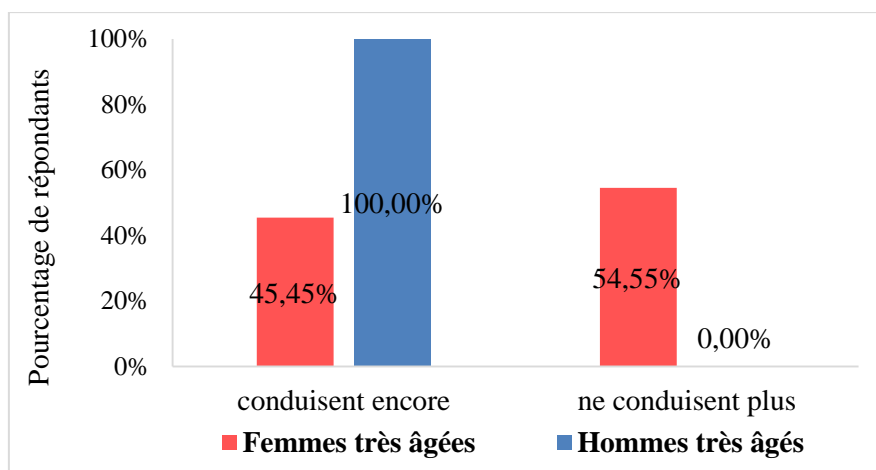


Figure 26. Répartition en pourcentage des participants femmes et hommes âgés qui conduisent encore.

En outre, les participants ne conduisant pas tendent à avoir plus de collisions que les participants qui conduisent ($F(1,51)=3.81$; $p=.06$; Figure 27)⁸.

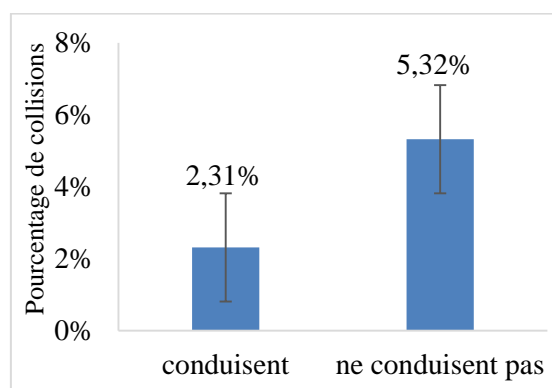


Figure 27. Pourcentage moyen de collisions selon que les participants conduisent ou non.

⁸ L'analyse de l'interaction habitudes de conduite*âge*genre sur le pourcentage de collisions n'a pas pu être réalisée du fait de cases vides (pas d'hommes très âgés ne conduisant pas et pas de jeunes femmes ne conduisant pas).

6.7.3. Données comportementales de traversée de rue : réponses correctes au bracelet

Le pourcentage d'essais de traversée de rue où le participant a correctement répondu au bracelet a été calculé de la manière suivante : une réponse correcte est affectée à la décision si le participant a effectivement traversé lorsque le bracelet ne vibrait pas, et si le participant n'a pas traversé alors que le bracelet vibrait. Cette mesure témoigne de la bonne perception du message vibrotactile. Il peut également témoigner de la confiance du participant envers le bracelet. En effet, une réponse incorrecte (ex. le participant traverse alors que le bracelet l'avertit d'un danger) peut suggérer une mise au défi de ses conseils et/ou un manque de confiance envers la technologie. Mais une réponse incorrecte peut aussi témoigner de la non perception du message vibrotactile (ex. le participant traverse alors que le bracelet vibre car il ne perçoit pas le message vibrotactile). Par contre, un score de 100% révèle que le participant a correctement perçu tous les messages vibrotactiles, et a délégué sa prise de décision au bracelet dans 100 % des essais, il a totalement suivi et eu confiance en l'aide délivrée par les messages vibrotactiles.

Les résultats indiquent un taux de réponses correctes au bracelet à hauteur de seulement 52% en moyenne, pour l'ensemble des participants. Les analyses mettent à jour un effet du groupe d'âge ($F(2,51)=3.70$; $p<.05$; $\eta^2=0.09$; cf. Figure 28 ci-dessous) : les participants les plus âgés répondent un peu moins correctement au bracelet que les deux autres groupes d'âges.

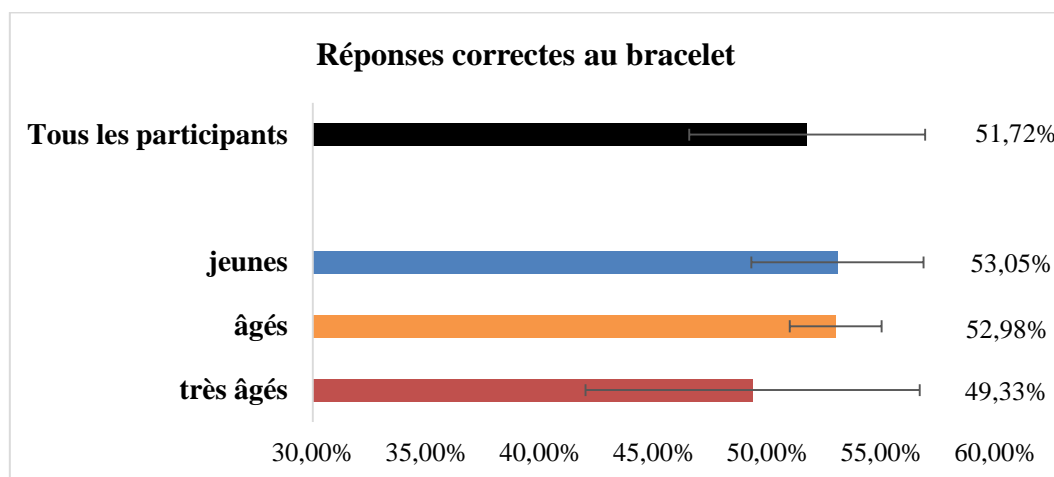


Figure 28. Pourcentage de réponses correctes au bracelet chez tous les participants et en fonction du groupe d'âge

6.7.4. Données subjectives : réponses au questionnaire du Technology Acceptance Model⁹

Anxiété face aux nouvelles technologies

L'analyse statistique met en évidence un effet significatif global de l'âge sur les réponses concernant l'anxiété des participants face à l'utilisation de nouvelles technologies ($H(2, N=57) = 6.42$; $p < .05$; cf. Figure 29 ci-dessous). Les comparaisons deux à deux révèlent une différence significative sur la modalité « pas d'anxiété » entre les participants jeunes et très âgés ($\chi^2(1, N=37) = 4.22$; $p < .05$). Les plus âgés sont ainsi bien plus anxieux que les participants jeunes envers les nouvelles technologies.

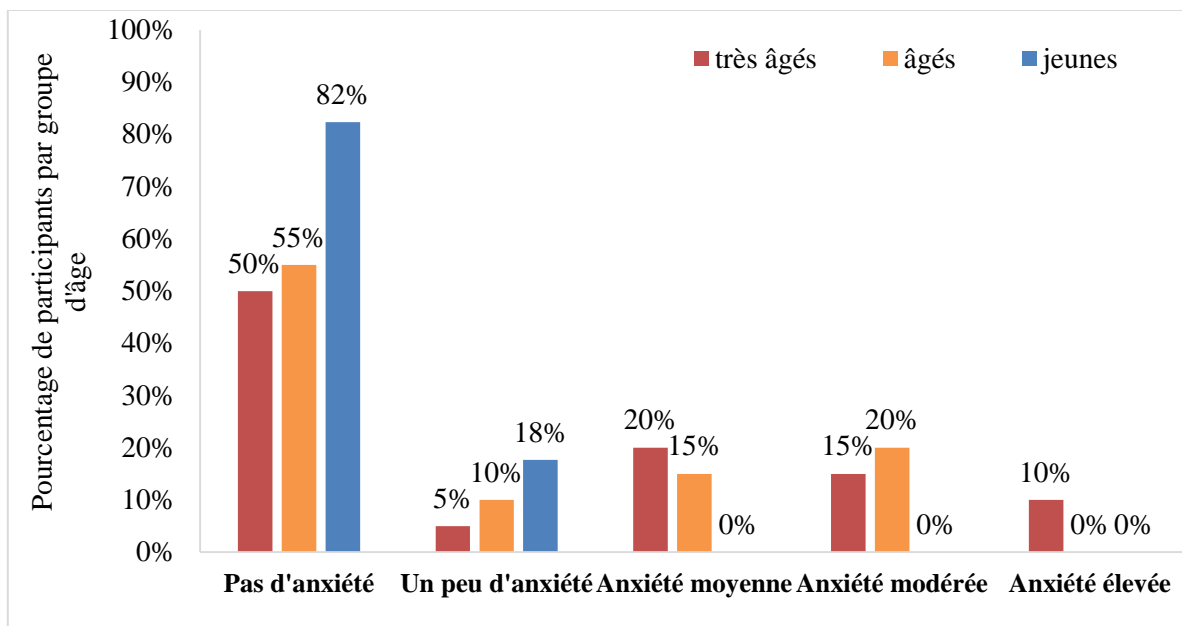


Figure 29. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur l'anxiété face aux nouvelles technologies.

⁹ NB : ne sont données ci-après que les différences significatives. Pour des raisons pratiques, les données du TAM ont été regroupées en 3 modalités (évaluations négatives : scores 1, 2, 3 / pas d'opinion : score 4 / évaluations positives : scores 5, 6, 7). Seule l'anxiété a été traitée en 5 modalités car cette variabilité nécessitait une réelle gradation des valeurs.

Utilité perçue « je trouve le bracelet utile lorsque je traverse la rue »

Concernant la question portant sur l'évaluation de l'utilité du bracelet, les analyses n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre les groupes d'âge ($H(2, N=57) = 2.02, ns$). Le bracelet est ainsi jugé utile par 75.3% des participants, en moyenne. Cette évaluation est descriptivement plus positive chez les participants âgés (90 %, cf. Figure 30 ci-dessous), mais cette différence n'est pas significative statistiquement.

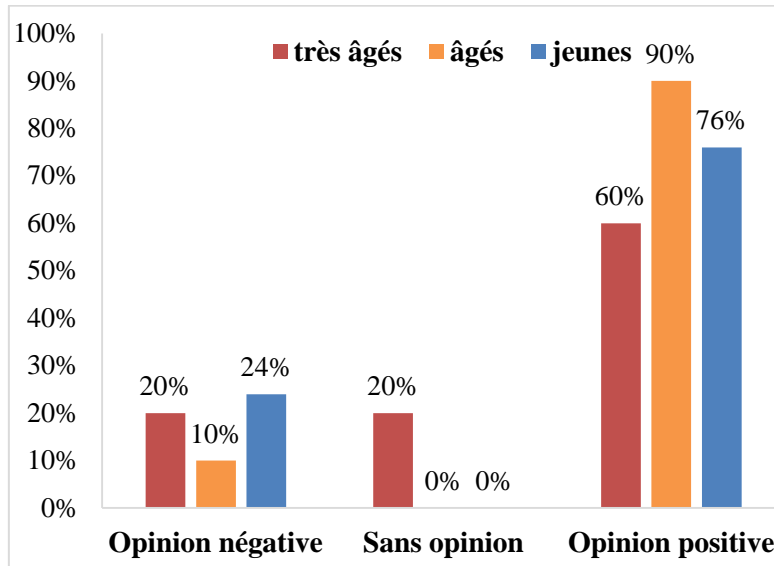


Figure 30. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur l'évaluation de l'utilité perçue du bracelet.

Facilité perçue « je trouve le bracelet facile à utiliser lorsque je traverse la rue »

Tous les participants (100 %) ont évalué positivement la facilité d'utilisation du bracelet. Il faut, toutefois, garder à l'esprit que dans notre contexte expérimental, les participants n'avaient pas à réaliser d'opérations de mise en route ou de programmation du bracelet.

Intention comportementale « je prévois d'utiliser le bracelet dès qu'il sera disponible »

L'analyse des données met en évidence un effet global de l'âge sur les réponses ($H(2, N=57) = 7.11$; $p < .05$; Figure 31). Les comparaisons deux à deux révèlent une différence significative sur la modalité « pas d'intention d'utiliser » entre les participants très âgés et les jeunes ($\chi^2(1, N=37) = 6.36$; $p < .02$) et entre les âgés et les jeunes ($\chi^2(1, N=37) = 4.98$; $p < .05$) et, inversement, sur la modalité « intention d'utiliser » entre les jeunes et les 2 groupes de participants âgés ($\chi^2(1, N=37) = 4.98$; $p < .05$). Ainsi, les deux groupes de participants âgés ont plus l'intention d'utiliser le bracelet que les participants jeunes à l'avenir, mais cette intention reste modérée (40%).

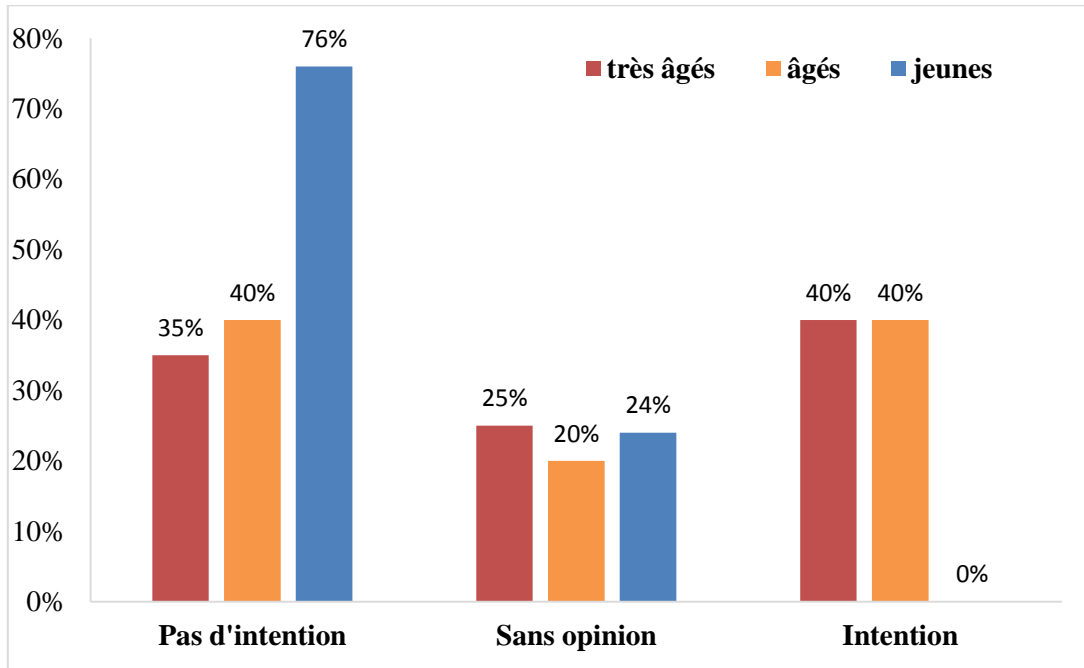


Figure 31. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur l'intention comportementale d'utiliser ce type de bracelet à l'avenir.

6.8. Synthèse des résultats de l'étude 4

Les résultats de cette quatrième étude montrent un réel bénéfice du bracelet en termes de sécurité des décisions de traversée de rue. On observe ainsi que le pourcentage de collisions est réduit significativement et drastiquement chez tous les participants qui le portent en traversant la rue. Le bracelet diminue le risque de collisions de moitié dans tous les groupes d'âge. On note même un bénéfice plus fort chez les piétons les plus à risque, à savoir les femmes très âgées.

Le bracelet s'avère réellement efficace lorsque le message vibrotactile est compris et non « défié » (i.e., mise au défi de ses conseils, manque de confiance envers la technologie). Les données comportementales recueillies sur le simulateur de traversée de rue montrent que le message vibrotactile est correctement répondu dans 50% des cas environ (et même voire légèrement moins chez les plus âgés). Si le bracelet réduit de moitié les décisions dangereuses, il ne les réduit pas à zéro, car un message sur deux est en moyenne non perçu ou défié. Des études futures devront être menées afin de déterminer si l'individu ne perçoit pas ou défie la technologie lorsqu'il émet un avis contraire au message vibrotactile.

En termes de facilité et d'utilité perçues subjectivement par l'utilisateur directement, il est à retenir que le bracelet est jugé utile et facile à utiliser par tous les participants, en moyenne. Alors que l'intention comportementale est faible chez les participants jeunes, 40% des participants âgés déclarent vouloir utiliser à l'avenir ce type de dispositif d'aide à la traversée de rue. Ce résultat pourrait témoigner d'une certaine conscience du danger encouru à traverser la rue avec l'âge. A noter que les participants âgés s'avouent parallèlement être anxieux envers les technologies, d'une part par soucis de dépendance (plutôt que de faire fonctionner leur facultés cognitives), et d'autre part par méfiance envers la géolocalisation.

7. Etude 5 : évaluation de l'efficacité du bracelet vibrotactile dans une tâche de navigation piétonne sur simulateur

7.1. Population

Un échantillon de 58 personnes a été recruté à cette dernière étude, dont :

- 20 adultes jeunes âgés entre 20 et 35 ans (M=27.05, SD=5.68 ; 10 femmes, 10 hommes)
- et 38 personnes âgées réparties en deux groupes :
 - 20 participants âgés entre 60 et 70 ans (M=66.61, SD=2.33 ; 11 femmes, 9 hommes)
 - 18 participants très âgés ¹⁰, et âgés de plus de 70 ans, jusqu'à 80 ans (M=74.45, SD=2.74 ; 10 femmes, 8 hommes).

Les personnes âgées ont été recrutées dans les environs de l'IFSTTAR à Versailles, Vélizy et Paris, dans des clubs ou associations. Les participants âgés sont tous autonomes et indépendants, vivent à leur domicile et se déplacent quotidiennement sans canne ni béquille. Le port d'un stimulateur cardiaque, d'une pompe ou d'un appareil électronique implanté était un motif d'exclusion. Les participants jeunes ont été recrutés dans les universités environnantes ou par annonces diffusées dans des réseaux d'informations (ex. RISC). Pour les rembourser des frais générés par le déplacement pour se rendre dans les locaux de l'IFSTTAR à Versailles Satory, chaque participant a reçu une indemnisation de 30 euros. Au début de chaque rencontre, l'expérimentateur expliquait le déroulement de l'étude. Si le participant acceptait de participer à l'étude, il signait alors le formulaire de consentement libre et éclairé.

7.2. Description du bracelet vibrotactile utilisé dans l'étude 5 et tâche d'apprentissage associée

Le bracelet vibrotactile est le même que celui utilisé dans la tâche de traversée de rue. Dans le contexte de la navigation piétonne, le bracelet délivre quatre types de message (voir Figure 10) :

- une longue vibration de forte intensité sur la droite du poignet signifiant que le participant doit prendre la route à droite (Type 1, cf. Figure 10 page 29);
- une longue vibration de forte intensité sur la gauche du poignet signifiant que le participant doit prendre la route à gauche (Type 1, cf. Figure 10 page 29);
- une succession de vibrations de forte intensité à gauche, au milieu, à droite et répétée 2 fois signifiant que le participant doit faire demi-tour (Type 2, cf. Figure 10 page 29);
- et deux vibrations simultanées de moyenne intensité des trois actionneurs signifiant que le participant est arrivé à destination (Type 2, cf. Figure 10 page 29);

Une application d'apprentissage a été conçue pour l'étude. Chaque message était joué 3 fois en expliquant au participant sa signification et sa conception. L'expérimentateur s'assurait que le participant ressentait bien les vibrations. Un test était ensuite proposé au cours duquel le participant recevait et devait reconnaître les messages transmis dans un ordre aléatoire. Enfin, pour consolider l'apprentissage, chacun des quatre messages était encore une fois joué.

¹⁰ La limite de 70 ans correspond à l'âge médian de l'échantillon de plus de 60 ans.

7.3. Simulateur de navigation piétonne

Le simulateur de navigation piétonne est le même que celui utilisé dans l'étude pilote 3 (pour rappel, cf. Figure 32 ci-dessous). Il permet aux participants de naviguer à pied virtuellement dans une ville via une interface de commande du type manche de direction. Il est composé de 3 écrans de PC (LCD, 47 pouces) pour la visualisation des scènes routières. Les données visuelles 3D représentent un environnement urbain avec trafic urbain peu dense. Chaque carrefour est aménagé de passages piétons et des panneaux indiquant les noms des rues sont positionnés de part et d'autre de la chaussée à chaque intersection. La vitesse de déplacement à pied des participants dans le monde virtuel est fixée à 3 m/s (environ 2 fois la vitesse de marche réelle moyenne). Ce choix a été motivé par le fait que des études ont montré que la vitesse de marche réelle des individus sur simulateur leur apparaît plus lente que dans la vie réelle (Suhr et al., 1958 ; Thurrell et al., 1998 ; Banton et al., 2005) et que les temps de parcours étant mesurés, tous les participants devaient marcher virtuellement à la même allure pour pouvoir comparer ces mesures.

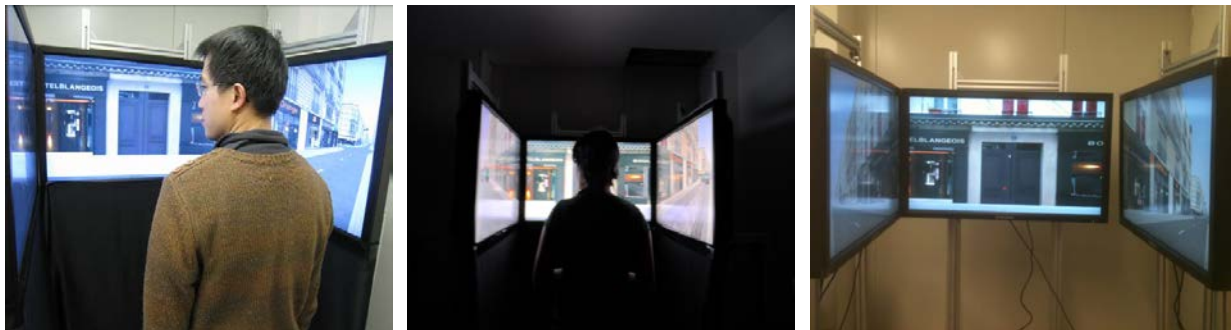


Figure 32. Mini-simulateur piéton de l'IFSTTAR (LEPSIS, Versailles Satory)

7.4. Tâche de navigation piétonne

Chaque participant réalisait individuellement une tâche de navigation piétonne sur le simulateur. Le participant devait se déplacer dans la ville virtuelle comme s'il était piéton en essayant de se comporter comme il le ferait dans la vraie vie.

Chaque participant effectuait 2 itinéraires (contrebalancés) différents dans la ville (voir Figure 33 ci-après) :

- un itinéraire sans bracelet d'aide à la navigation, mais avec une carte et le tracé de l'itinéraire à suivre,
- et un autre itinéraire en portant uniquement le bracelet qui lui indiquait les directions à prendre.

Chaque itinéraire était précédé d'un court itinéraire de familiarisation avec l'environnement et le dispositif.

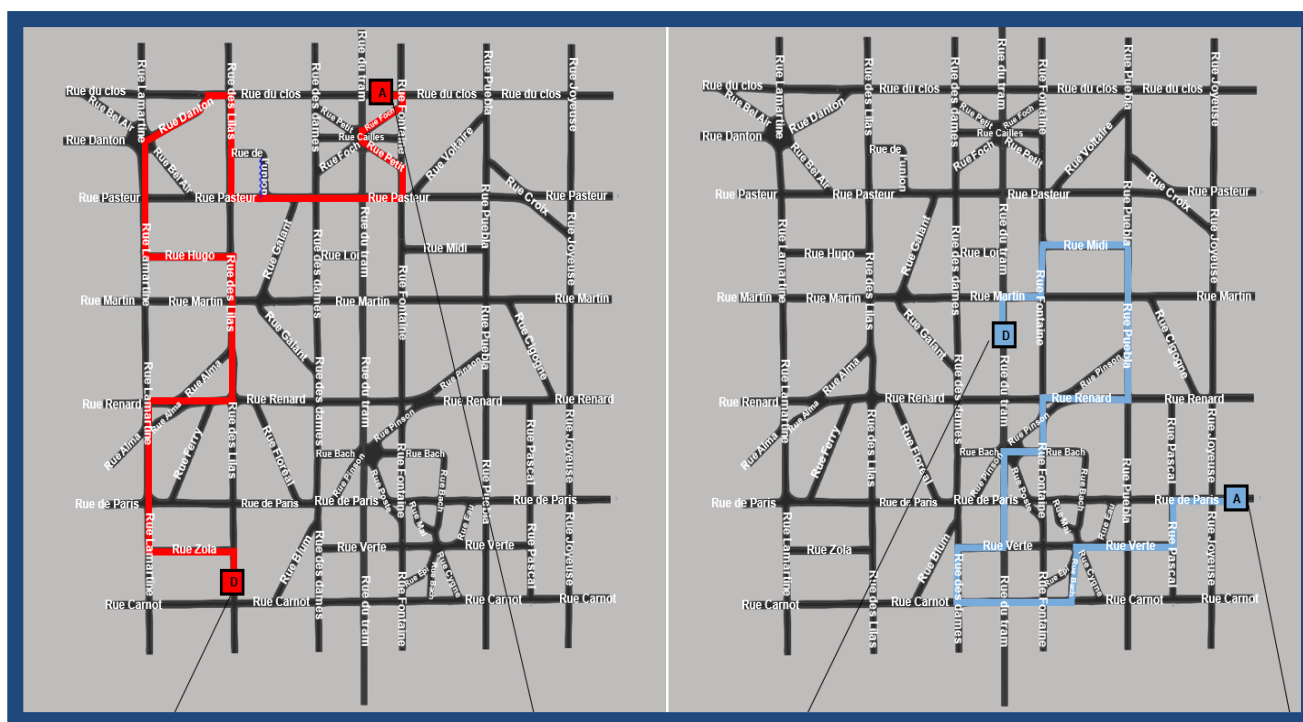


Figure 33. Carte des deux itinéraires réalisés par les participants : un avec la carte et l'autre avec le bracelet

Les deux itinéraires étaient de distance et de temps équivalents (15 minutes) et comportaient chacun autant de virages à droite et à gauche (respectivement 9 et 8). Deux situations de carrefours complexes étaient insérées dans chacun des itinéraires. Il s'agissait de carrefours ou ronds-points proposant minimum 5 alternatives de direction. Dans ce cas, le GPS du bracelet étant programmé pour choisir le parcours le plus court, le bracelet vibrait une première fois pour indiquer si le participant devait prendre le rond-point par la gauche ou par la droite, puis un second message lui indiquait quelle sortie du rond-point prendre. Entre deux itinéraires, le participant faisait une pause. Spécifiquement pour la condition avec bracelet, le participant apprenait d'abord les messages comme décrit plus haut puis réalisait l'itinéraire de familiarisation avec bracelet et terminait avec l'itinéraire expérimental avec bracelet. A la fin des deux itinéraires, le participant répondait à quelques questionnaires (cf. ci-dessous). La durée totale de la session sur simulateur (apprentissage, familiarisations, essais expérimentaux, questionnaires) était de 1h30.

7.5. Questionnaires et tests

Questionnaire d'informations générales - Ce questionnaire était destiné à recueillir des informations concernant le profil des participants, telles que l'âge, le niveau d'études, la catégorie socioprofessionnelle, leurs difficultés perçues à s'orienter, leur autonomie dans les déplacements, les habitudes de déplacements (piéton et conduite) et l'historique des accidents/chutes.

Mini Mental State Examination - Le MMSE mesure le statut cognitif global et représente un bon indicateur des déficits liés à un vieillissement pathologique (Folstein et al., 1975). Ce test consiste en une série de 30 items répartis en six catégories: i) évaluation des capacités d'orientation spatiale et temporelle, ii) évaluation des capacités d'apprentissage et transcription d'informations, iii) évaluation des capacités attentionnelles et de calcul, iv)

évaluation des capacités mnésiques, v) évaluation des capacités langagières et vi) évaluation des praxies constructives (réalisation d'une séquence ordonnée de gestes pour une action précise). Un score total inférieur à 26/30 indique la présence d'un déficit cognitif lié au vieillissement pathologique.

Trail-Making test – Le TMT est issu de l'*Army Individual Test Battery* (1944) et repris pour validation par Corrigan et Hinkeldey (1987). Il s'agit du test papier-crayon le plus connu et utilisé pour évaluer les capacités de flexibilité cognitive. Cette épreuve est constituée de deux parties (A et B). La partie A implique de relier au crayon les pastilles numérotées et réparties aléatoirement sur la page par ordre croissant (i.e., de 1 vers 2 vers 3 et jusqu'à 25). Dans la partie B, le sujet doit relier alternativement un nombre à une lettre de manière croissante (i.e., 1-A-2-B-3-C-4-D, jusqu'à 13). Le participant doit réaliser l'exercice le plus vite possible sans lever le crayon. Lorsque le sujet commet une erreur, l'expérimentateur lui fait remarquer et le sujet repart de la pastille précédente. Chaque partie est chronométrée et le nombre d'erreurs est comptabilisé. Etant donné que la partie A se présente davantage comme une mesure de vitesse perceptive, la mesure utilisée dans les analyses est la différence entre le temps mis pour compléter la partie B et la partie A, afin de ne conserver que la mesure de flexibilité comme mesure du fonctionnement exécutif (e.g., Corrigan & Hinkeldey, 1987).

Questionnaire d'évaluation subjective du bracelet - Ce questionnaire est basé sur le modèle *Technology Acceptance Model 3* (Venkatech & Bala, 2008). Il vise à recueillir l'avis de chaque participant envers l'efficacité du bracelet, son efficience, sa satisfaction et son intérêt perçu. Ces notions permettent d'obtenir des données plus fines de l'acceptabilité et l'utilisabilité du bracelet. Ce questionnaire validé est composé de 54 affirmations regroupées en 16 catégories. A chaque affirmation le participant doit répondre sur une échelle allant de 1 étant « Pas du tout d'accord » à 7 « Tout à fait d'accord ». Pour notre étude, nous avons adapté ce questionnaire à l'utilisation et au fonctionnement du bracelet. Certaines catégories ont été supprimées car elles ne correspondaient pas à une utilisation en situation expérimentale. Nous avons donc gardé 12 catégories sur les 16 soit 40 affirmations.

Le questionnaire de présence (Witmer et al., 1998, 2005) – La présence virtuelle est définie comme le sentiment de présence suscité par les environnements virtuels (Sheridan, 1992). Selon Schubert et Crusius (2002), le sentiment de présence ne dépendrait pas de l'immersion mais passerait par une représentation cognitive construite sur la base de stimulations sensorielles. L'émergence ou non d'un sentiment de présence chez l'utilisateur dépendrait du modèle mental construit. Ce questionnaire vise à mesurer la présence dans un environnement virtuel via quatre facteurs : le niveau de contrôle (ou d'interaction) sur l'environnement, des facteurs sensoriels (la qualité de l'immersion), le niveau de distraction qui peut perturber l'expérience et le degré de réalisme de l'environnement virtuel.

7.6. Procédure expérimentale

Chaque participant était accueilli par l'expérimentateur qui lui présentait les objectifs de l'étude et les conditions de sa participation. Il complétait ensuite le formulaire de consentement libre et éclairé. Cette session se poursuivait par le remplissage du questionnaire d'informations générales.

Ensuite, la moitié des participants commençait par réaliser la tâche de navigation avec bracelet et l'autre moitié des participants d'abord avec la carte. Les participants passaient ensuite le MMSE et le TMT suivi du questionnaire de présence puis réalisaient la seconde tâche de navigation selon l'autre condition (avec bracelet ou avec carte). A la fin, les participants répondaient au questionnaire issu du TAM.

7.7. Données recueillies et analyses statistiques opérées

Les données suivantes ont été recueillies :

- le pourcentage de réponses correctes : si le bracelet ou le tracé de l'itinéraire indiquait un changement de direction et que le participant avait effectivement pris la bonne direction, il lui était compté une réponse correcte. Trois mesures ont ainsi été calculées :
 - un pourcentage de réponses correctes pour l'ensemble de l'itinéraire incluant le point d'arrivée (score sur 18 « réponses »),
 - un pourcentage de réponses correctes pour les intersections simples (score sur 13 « réponses »),
 - un pourcentage de réponses correctes pour les carrefours complexes (score sur 4 « réponses »).
- le temps de parcours : calculé entre le moment où le participant actionne pour la première fois le manche de direction pour avancer et le moment où il n'actionne plus du tout le manche de direction à la fin de l'itinéraire.

Les données de navigation ont été étudiées par des analyses de variances multivariées et univariées sur chacune des mesures retenues via des comparaisons entre les groupes de participants en fonction de leur âge (jeunes ; âgés et très âgés), de leur sexe, et de la situation de passation (avec ou sans bracelet). Les quatre variables ont été considérées en même temps dans le cadre d'une analyse de variance multivariée (MANOVA). La MANOVA est en effet appropriée lorsqu'il y a une forte corrélation entre les variables dépendantes (Tabachnick & Fidell, 1989).

La statistique multivariée du lambda Wilks Λ a donc été utilisée. Elle varie de 0 à 1; plus elle est basse, plus l'effet donné contribue au modèle. Les effets avérés significatifs dans la MANOVA ont ensuite été testés pour chaque variable dépendante à l'aide d'analyses univariées (ANOVA). La statistique de l'ETA-carré partiel (η^2) a été utilisée comme indice de l'importance de la taille des effets. Les tests de post hoc ont été réalisés à l'aide du test HSD de Tukey qui permet de comparer chaque groupe ou condition à chaque groupe ou condition a posteriori.

Les données issues du TAM ont été codées numériquement et ont été traitées comme des données ordinales par le biais de statistiques non paramétriques (Jamieson, 2004). Les comparaisons des groupes ont été réalisées en utilisant le test de Kruskal-Wallis (effet du groupe d'âge) avec les scores moyens fournis sous forme de données descriptives. Cependant, les pourcentages de réponses ont été privilégiés lorsqu'ils se sont révélés plus informatifs. Pour ces données de fréquence, le test du chi-carré a été utilisé pour tester l'hypothèse de l'indépendance entre deux échantillons de répondants.

Pour l'ensemble des analyses, le niveau de significativité a été fixé à 0,05.

7.8. Résultats

7.8.1. Données comportementales de navigation : efficacité du bracelet

Analyse multivariée

Une analyse multivariée (MANOVA) sur l'ensemble des variables dépendantes (les 3 pourcentages de réponses correctes et le temps de parcours) a été réalisée. Celle-ci a révélé un effet principal de la condition ($\Lambda=.51$; $F(4,49)= 11.66$; $p<.0001$, $\eta^2 = .49$), du groupe d'âge ($\Lambda=.55$; $F(8,98)= 4.28$; $p<.000$; $\eta^2 = .26$), et une interaction significative entre la condition et le groupe d'âge ($\Lambda=.68$; $F(8,98)= 2.58$; $p<.02$, $\eta^2 = .17$).

Pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble de l'itinéraire¹¹

L'analyse univariée n'a pas mis en évidence d'effet de la condition (bracelet *versus* carte) sur le pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble de l'itinéraire ($F(1,52)=0.23$; ns).

En revanche, on note un effet principal de l'âge ($F(2,52)= 7.82$; $p<.002$; $\eta^2=.23$; Figure 18) et du sexe ($F(1,52)= 6.63$; $p<.02$; $\eta^2=.11$; Figure 34) sur le pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble de l'itinéraire. Plus particulièrement, les participants très âgés ont moins de réponses correctes que les jeunes (test HSD de Tukey, $p<.001$), et les hommes plus de réponses correctes que les femmes, quelle que soit la condition de passation. Aucune interaction entre l'âge et le sexe n'a été révélée par l'analyse ($F(2,52)=1.91$; ns).

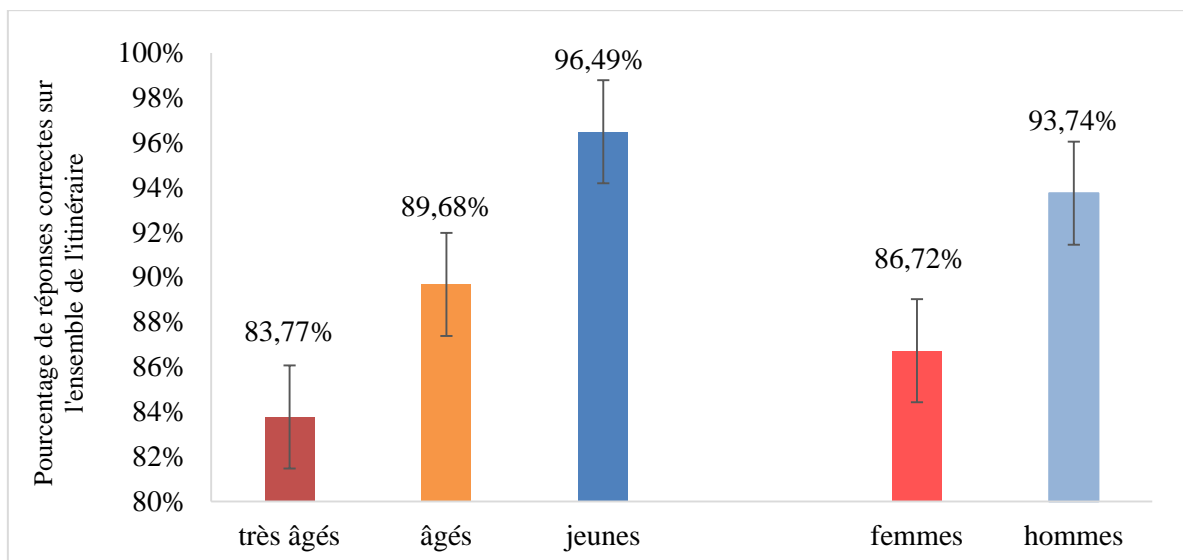


Figure 34. Pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble de l'itinéraire en fonction du groupe d'âge et du genre des participants quelle que soit la condition.

Enfin, l'étude des corrélations a mis en évidence une corrélation négative entre les difficultés des participants à s'orienter dans un environnement non-familier (données issues du questionnaire d'informations générales) et le pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble de l'itinéraire avec la carte ($r(56) = -.26$; $p<.05$). Ainsi, plus les participants ont des difficultés à s'orienter et plus ils commettent d'erreurs avec la carte.

¹¹ Les effets univariés du sexe sont reportés ici bien qu'ils ne soient pas retrouvés en analyses multivariées

Pourcentage de réponses correctes aux intersections simples

L'analyse révèle un effet de la condition (bracelet *versus* carte) sur le pourcentage de réponses correctes aux intersections simples ($F(1,52)=7.46$; $p<.01$; $\eta^2=.12$; Figure 35). Dans les intersections simples, les participants ont plus de réponses correctes d'orientation avec le bracelet qu'avec la carte.

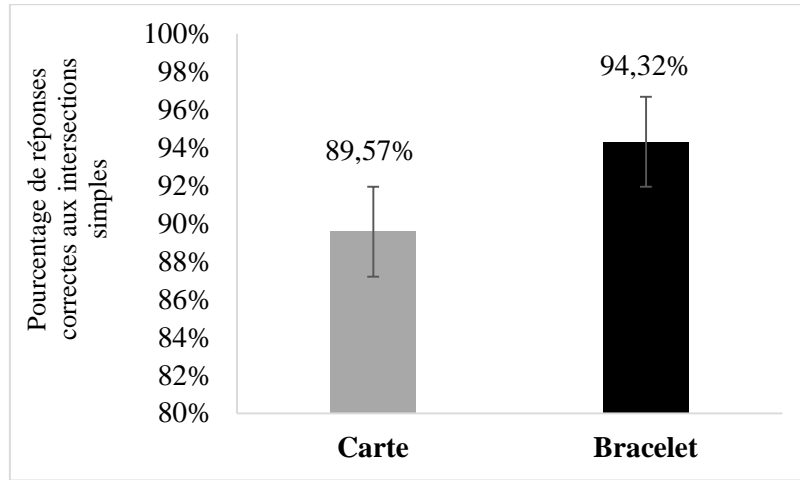


Figure 35. Pourcentage de réponses correctes aux intersections simples en fonction de la condition de passation (carte ou bracelet)

L'analyse des données révèle aussi un effet principal de l'âge ($F(2,52)= 7.23$; $p<.003$; $\eta^2=.22$; Figure 19) et du sexe ($F(1,52)= 4.44$; $p<.05$; $\eta^2=.08$; Figure 36) sur le pourcentage de réponses correctes aux intersections simples. Plus particulièrement, les participants jeunes ont plus de réponses correctes que les très âgés (test HSD de Tukey, $p<.001$) et que les âgés (test HSD de Tukey, $p<.05$), et les hommes ont plus de réponses correctes que les femmes, quelle que soit la condition de passation. Aucune interaction entre l'âge et le sexe n'a été révélée par l'analyse ($F(2,52)=1.74$; ns).

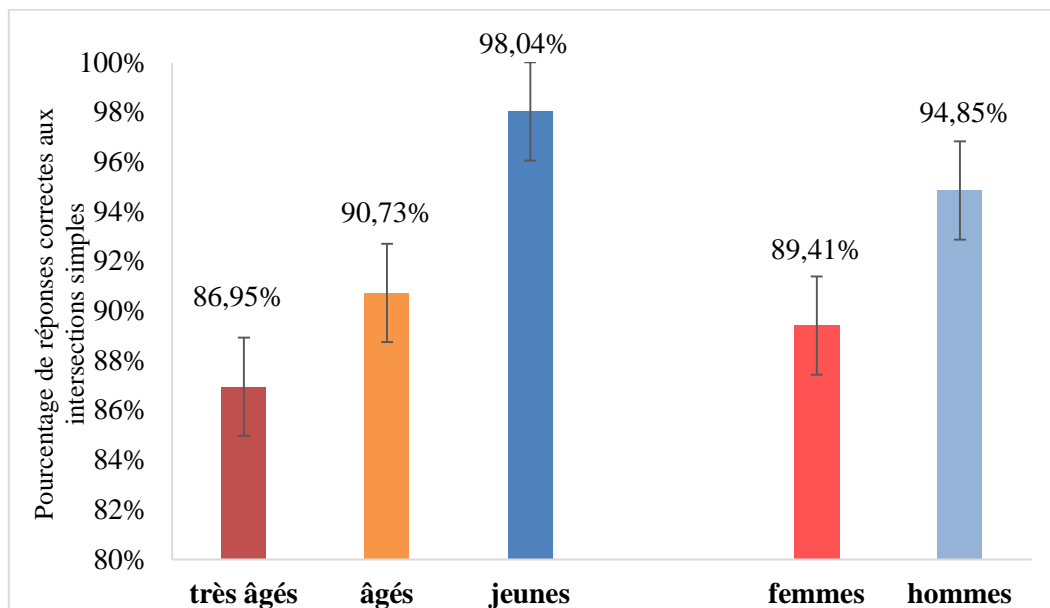


Figure 36. Pourcentage de réponses correctes aux intersections simples en fonction du groupe d'âge et du sexe des participants.

Enfin, une tendance à un effet d'interaction entre la condition et le groupe d'âge a été observée ($F(2,52)=2.70$; $p=.08$; $\eta^2=.10$; Figure 37). On observe que les plus âgés ont significativement plus de réponses correctes avec le bracelet qu'avec la carte (test HSD de Tukey, $p<.01$), alors que les différences bracelet-carte sont non significatives dans les deux autres groupes d'âge

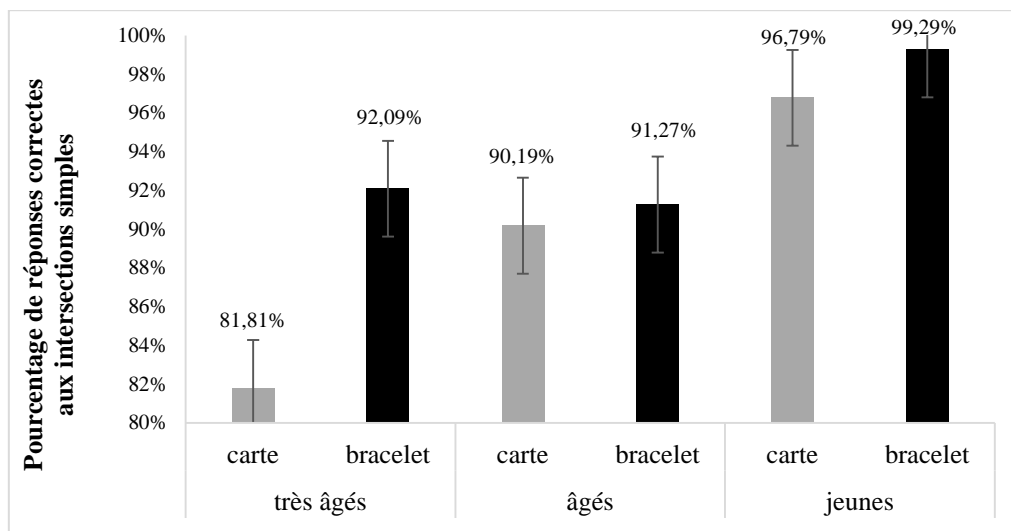


Figure 37. Pourcentage de réponses correctes aux intersections simples en fonction de la condition de passation (carte ou bracelet) et du groupe d'âge.

A noter que les analyses n'ont pas révélé d'interactions significatives entre la condition et le sexe ($F(1,52)=0.44$; ns) ou entre le sexe et le groupe d'âge ($F(2,52)=1.74$; ns).

Pourcentage de réponses correctes dans les carrefours complexes

L'analyse des données a mis à jour un effet principal de la condition ($F(1,52)= 6.26$; $p<.02$; $\eta^2=.11$; Figure 38) sur le pourcentage de réponses correctes aux carrefours complexes. Cette fois-ci, les participants ont moins de réponses correctes avec le bracelet qu'avec la carte. Ce résultat intéressant peut s'expliquer par les deux messages envoyés au participant dans le cas des ronds-points à voies de direction multiples (5 environ) : un premier pour la direction du rond-point à prendre (droite ou gauche) puis second pour la sortie à prendre. Ces deux messages semblent avoir généré de la confusion.

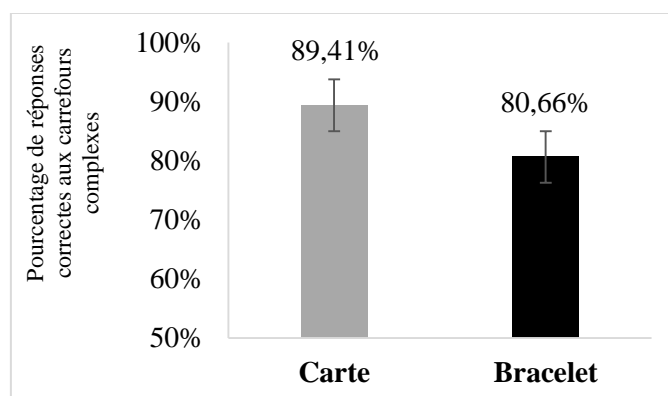


Figure 38. Pourcentage de réponses correctes aux carrefours complexes en fonction de la condition de passation (carte ou bracelet)

De plus, l'âge tend à avoir un effet sur le pourcentage de réponses correctes aux carrefours complexes ($F(2,52)= 3.07$; $p=.05$; $\eta^2=.11$; Figure 39). Plus particulièrement, les participants jeunes ont significativement plus de réponses correctes que les très âgés dans les carrefours complexes (test HSD de Tukey, $p<.05$).

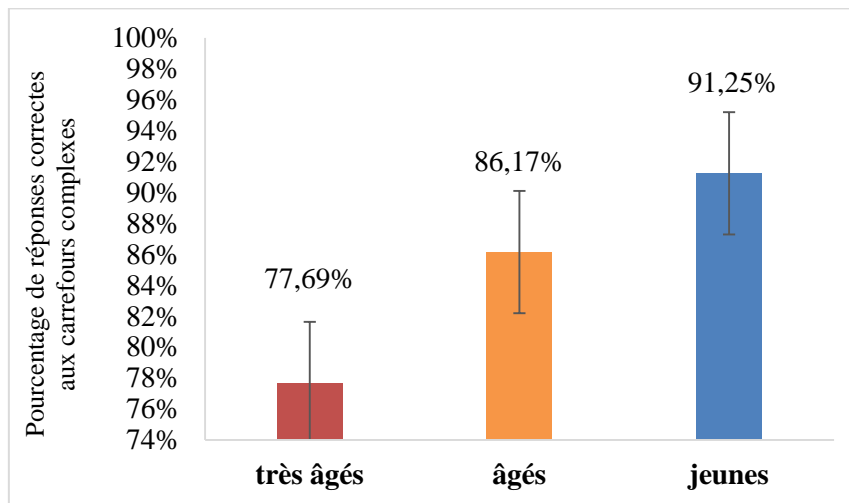


Figure 39. Pourcentage de réponses correctes aux carrefours complexes en fonction du groupe d'âge des participants

Aucune interaction entre la condition et l'âge n'a été révélée par l'analyse ($F(2,52)=1.54$; ns).

Temps de parcours

L'analyse des données a mis en évidence un effet principal de la condition ($F(1,52)= 38.36$; $p<.001$; $\eta^2=.42$; Figure 40) sur le temps moyen de parcours. Les participants mettent plus de temps à réaliser l'itinéraire avec la carte qu'avec le bracelet.

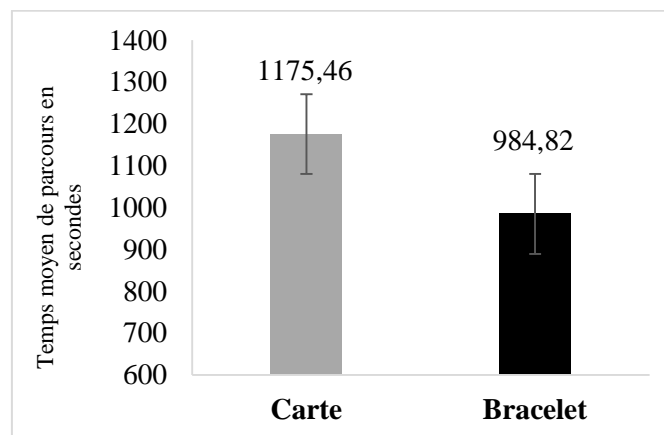


Figure 40. Temps de parcours moyen en secondes avec la carte et avec le bracelet

De plus, le temps de parcours diffère significativement en fonction de l'âge des participants ($F(2,52)= 14.64$; $p<.001$; $\eta^2=.36$; Figure 41), les jeunes étant plus rapides que les âgés (test HSD de Tukey, $p<.001$) et les très âgés (test HSD de Tukey, $p<.001$).

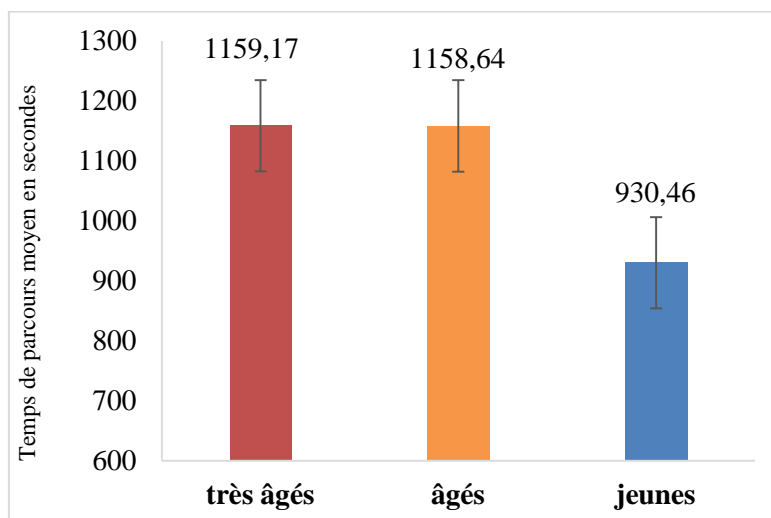


Figure 41. Temps de parcours moyen en secondes en fonction du groupe d'âge d'appartenance des participants quelle que soit la condition.

Enfin, une interaction significative entre la condition et l'âge des participants a été observée ($F(2,52)= 5.53$; $p<.01$; $\eta^2=.17$; Figure 42). Les participants âgés et très âgés mettent significativement moins de temps avec le bracelet qu'avec la carte pour réaliser l'itinéraire (comparaisons par test HSD de Tukey ; $ps<.001$) mais il ne semble pas y avoir de différences chez les participants jeunes (test HSD de Tukey ns).

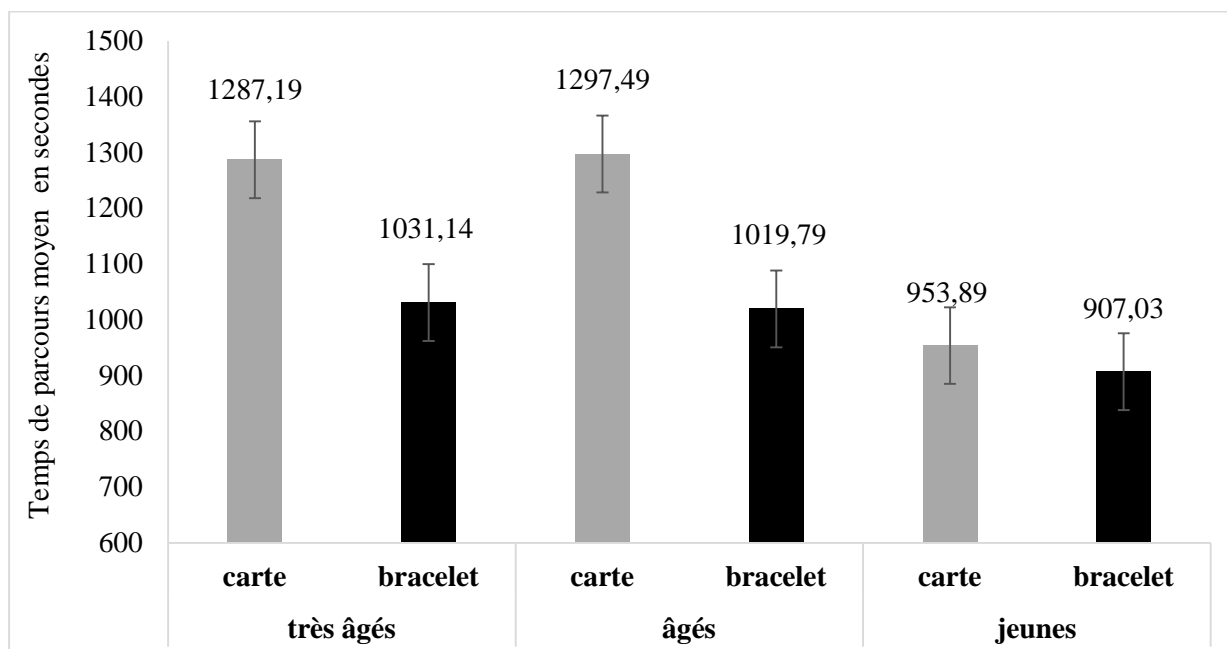


Figure 42. Temps de parcours moyen en secondes en fonction du groupe d'âge d'appartenance des participants et la condition de passation.

L'étude des corrélations a également permis d'identifier :

1/ une corrélation positive entre le score obtenu au TMT et le temps de parcours avec la carte ($r(56) = .39$; $p < .01$). Ainsi, plus les participants ont des difficultés de flexibilité cognitive et plus ils mettent de temps avec la carte.

2/ une corrélation positive entre les difficultés des participants à s'orienter dans un environnement familier (données issues du questionnaire d'informations générales) et le temps de parcours avec la carte ($r(56) = .45$; $p < .001$). Ainsi, en toute logique, plus les participants ont des difficultés à s'orienter et plus ils mettent de temps avec la carte.

7.8.2 Evaluation subjective du bracelet avec le questionnaire du TAM

Globalement, l'utilité et la facilité perçues sont évaluées positivement par les participants (cf. figure 43).

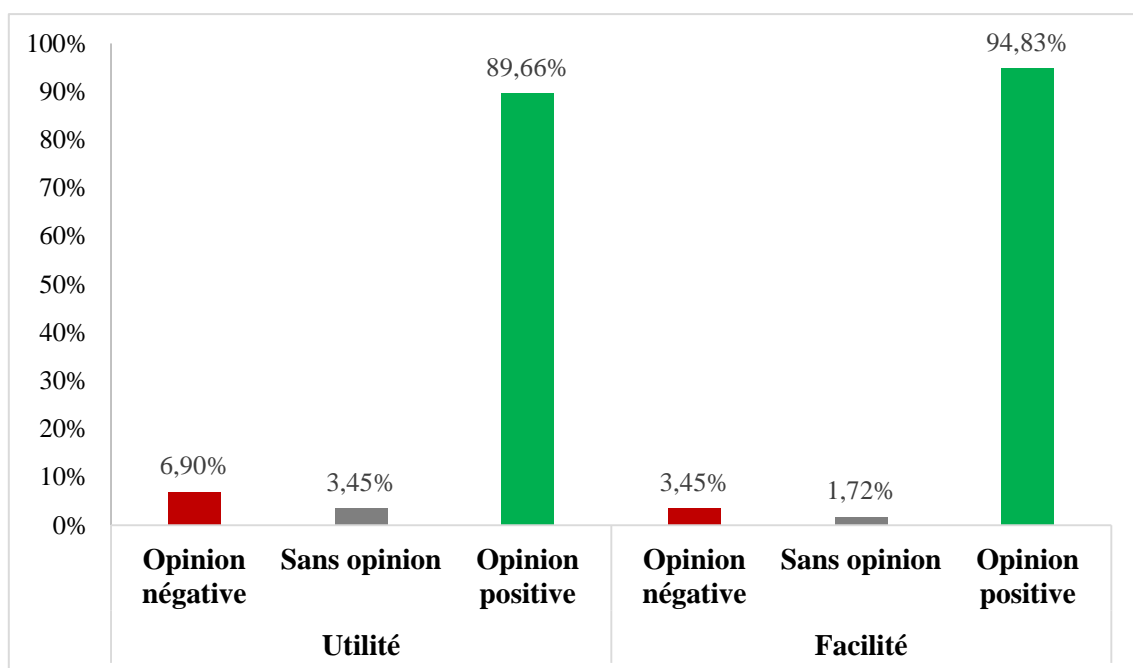


Figure 43. Répartition en pourcentage des participants sur les questions portant sur l'utilité du bracelet (à gauche) et la facilité d'utilisation du bracelet (à droite).

L'analyse de variance Kruskal-Wallis a révélé des différences en fonction du groupe d'âge des participants sur certains items. Ainsi, les âgés sont ceux qui évaluent le plus souvent le bracelet comme étant facile à utiliser, suivis des participants très âgés et des jeunes ($H(2, N=58)=6.11$; $p<.05$). De même, les participants très âgés sont ceux qui jugent le plus le bracelet comme étant utile, suivis des âgés puis des jeunes ($H(2, N=58)=10.45$; $p<.01$). Interrogés sur l'anxiété ressentie lorsqu'ils utilisent des technologies, les participants très âgés sont plus nombreux à rapporter au moins une anxiété moyenne (environ un tiers d'entre eux ; $H(2, N=58)=9.71$; $p<.01$).; cf. Figure 44 ci-après).

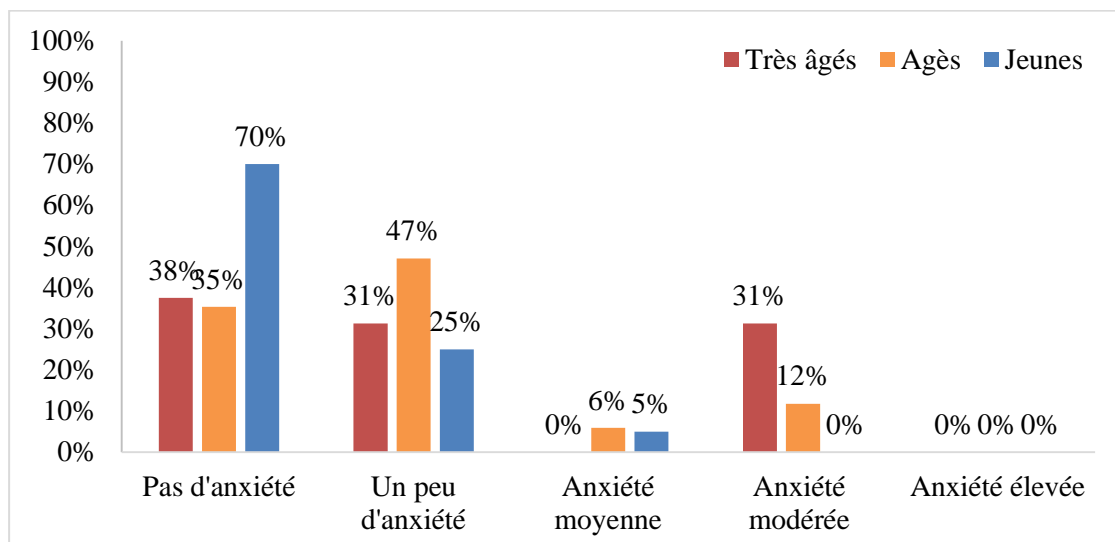


Figure 44. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur l'anxiété face aux nouvelles technologies

Concernant le plaisir d'utilisation, 100% des participants très âgés déclarent avoir ressenti du plaisir à utiliser le bracelet d'aide à la navigation, et se distinguent ainsi des deux autres groupes de participants comme le montre la figure 45 ci-dessous ($H(2, N=58)=6.04$; $p<.05$).

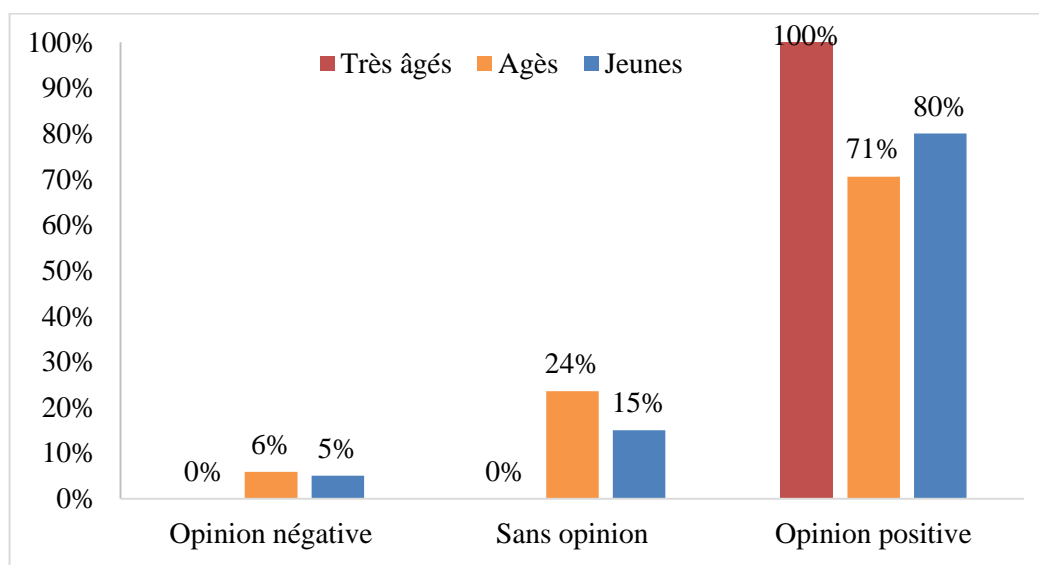


Figure 45. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur le plaisir d'utilisation du bracelet

Enfin, en ce qui concerne l'intention comportementale (« je prévois d'utiliser le bracelet dès qu'il sera disponible »), les analyses montrent également des différences de patterns de réponse en fonction de l'âge ($H(2, N=58)=14.44$; $p<.001$). Ce sont les participants les plus âgés qui sont les plus nombreux à déclarer avoir l'intention d'utiliser le bracelet d'aide à la navigation à l'avenir. Ils sont en effet 75% contre seulement 24% des âgés et 10% des jeunes (cf. Figure 46).

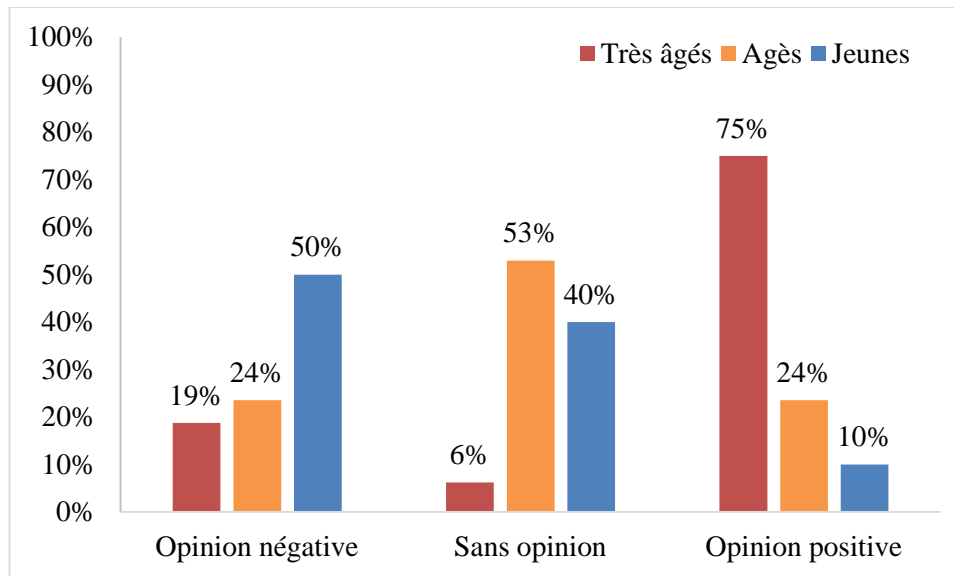


Figure 46. Répartition en pourcentage des participants par groupe d'âge à la question du TAM portant sur l'intention d'utiliser le bracelet dès qu'il sera disponible.

7.8.3. Sentiment d'immersion dans la ville virtuelle

L'évaluation des participants de leur état de présence dans la ville virtuelle est plutôt positive. Par exemple, 84.48% des participants estiment avoir été presque complètement ou complètement immergé dans l'environnement virtuel. Ils sont également 96.55% à avoir déclaré de pas être incommodés par la qualité visuelle de l'environnement. Enfin, bien que les participants âgés aient rapporté et témoigné durant la tâche des difficultés avec le manche de direction, 96.94% des participants estiment que le contrôle du mouvement dans l'environnement par le manche de direction n'a pas du tout ou que très faiblement interféré avec la réalisation de la tâche de navigation. L'analyse de variances n'a mis en évidence que 3 différences d'évaluation du sentiment de présence en fonction du groupe d'âge d'appartenance des participants :

1/ sur le contrôle des événements ($H(2, N= 58) =10.54$; $p<.01$) ; descriptivement, les jeunes ($SR=780$) estimaient pouvoir plus contrôler les événements que les âgés ($SR=456$) et les très âgés ($SR=475$).

2/ sur le réalisme de l'environnement virtuel ($H(2, N= 58) =7.8$; $p<.02$) ; descriptivement, les très âgés ($SR=739$) évaluaient l'environnement comme étant plus réaliste que les âgés ($SR=523$) et les jeunes ($SR=449$).

3/ sur la vitesse d'adaptation aux événements ($H(2, N= 58) =10.54$; $p<.01$) ; descriptivement, les jeunes ($SR=795$) se déclarent s'adapter plus vite à l'environnement virtuel

7.9. Synthèse des résultats de l'étude 5

Les données comportementales recueillies sur simulateur de navigation piétonne montrent un réel bénéfice du bracelet en termes d'efficacité d'orientation. Le bracelet s'avère efficace en termes de directions correctement prises (gauche/droite) dans des intersections simples (carrefours en T) et de temps de parcours plus courts avec le bracelet plutôt qu'avec une carte papier. Ces bénéfices s'observent globalement chez tous les participants qui le portent en navigant dans la ville virtuelle. Néanmoins, les bénéfices semblent plus importants chez les participants les plus âgés qui montrent des difficultés à utiliser la carte mais bénéficient grandement de l'aide apportée par le bracelet vibrotactile pour naviguer à pied dans la ville virtuelle (en termes de directions correctement prises dans des intersections simples et de temps de parcours plus courts). Par contre, le bracelet ne se révèle pas efficace dans le cas des carrefours complexes (à plus de 5 alternatives de directions), les participants montrant des erreurs de direction (confusions dans la direction à prendre une fois le rond-point engagé, ex. la troisième à droite). Ce résultat montre que la façon dont nous avons choisi de transmettre les informations dans le cas des carrefours complexes (i.e., indiquer d'abord la direction du rond-point à prendre, puis la sortie à choisir), et qui nous semblait être la plus intuitive au préalable, n'était pas la plus adaptée. Peut-être faut-il, similairement aux GPS audio actuels, indiquer le numéro de la sortie (3^e sortie à gauche) ? Mais comment par la voie haptique ? Ou encore adopter une conception plus cohérente avec les intersections simples ? Afin de définir le moyen le plus optimal et compréhensible de transmettre ce type d'informations dans le cas des carrefours complexes, il est nécessaire de réaliser d'autres études se concentrant sur cet aspect-là en particulier, en comparant diverses méthodes.

Si le bracelet réduit les difficultés de navigation, il ne les réduit pas à zéro, car quelques messages ont parfois été non / mal perçus ou défiés, même dans des intersections simples (5%), les chiffres étant plus importants dans le cas des intersections complexes (environ 20% des messages non/mal perçus ou défiés). Le bracelet s'avère en effet efficace lorsque le message vibrotactile est compris et non défié.

Enfin, les participants ont globalement évalué le bracelet d'aide à la navigation utile et facile à utiliser, quel que soit leur âge. Mais alors que les participants très âgés rapportent un peu plus d'anxiété envers les technologies que les participants jeunes et âgés, tous ont déclaré éprouver du plaisir à utiliser le bracelet. Ils sont également plus nombreux (75%) à déclarer avoir l'intention d'utiliser à l'avenir ce genre de bracelet d'aide à la navigation piétonne, contrairement aux adultes jeunes (10%) et âgés entre 60 et 70 ans (24%). Le refus des adultes plus jeunes semble être lié au fait qu'ils associent ce type de dispositif à des aides au handicap. Parallèlement à cela, la modalité haptique est très peu utilisée dans les dispositifs disponibles aujourd'hui sur le marché. Cette modalité haptique a d'ailleurs historiquement été plutôt envisagée pour aider les non-voyants. Une intégration des fonctionnalités du bracelet vibrotactile dans les dispositifs modernes de type « smartwatch » pourrait favoriser l'intention d'acquérir et d'utiliser ce type d'informations pour naviguer, notamment puisque ces populations utilisent déjà fortement des dispositifs de navigation de type GPS.

8. Discussion générale, conclusions et recommandations

Parce qu'ils n'ont aucune protection, les piétons font partie des usagers de la route les plus vulnérables aux accidents mortels. Si les piétons sont des usagers vulnérables, les piétons âgés le sont doublement en raison des déclin perceptifs, cognitifs et physiques qui les rendent plus exposés à des accidents de la route (en raison de temps de réaction ralentis, de moins flexibles, ou encore de décisions parfois dangereuses). Les accidents leur sont également plus fatals, avec une probabilité d'en réchapper moindre. Ainsi, en 2012, 18,6 % de l'ensemble des accidents concernaient des piétons, et 489 personnes perdaient la vie dans un accident en tant que piéton. Parmi ces tués, la plupart était âgé de plus de 75 ans (40%, ONISR, 2013).

Dans le contexte mondial d'urbanisation croissante et de vieillissement de la population, la mobilité des piétons âgés constitue un enjeu majeur auquel la société doit faire face pour garantir l'autonomie des personnes et préserver leur qualité de vie, tout en assurant leur sécurité. L'amélioration des chiffres d'accidents et la promotion de la marche à pied en tant que mode de déplacement actif et sécurisé, quelle que soit la catégorie d'âge visée, supposent d'agir sur le système dans sa globalité, c'est-à-dire dans l'interaction Homme-Véhicule-Environnement. Agir sur l'Environnement implique des modifications d'infrastructure (ex. voies réservées aux piétons) qui sont pour la plupart coûteuses et longues à mettre en place. Agir sur le Véhicule vise à en modifier sa structure (ex. airbag piéton dans le capot) ou encore à implémenter des dispositifs d'aide au conducteur pour détecter un piéton et activer un freinage automatique en cas de collision imminente. Ces dispositifs sont en cours de déploiement et ne sont pas disponibles sur l'ensemble des véhicules qui composent le trafic routier en France. Un moyen plus rapide et moins coûteux consiste à agir sur l'Homme directement, en modifiant ses comportements pour les adapter à l'environnement et aux conditions de trafic, mais également en palliant à ce qui lui fait potentiellement défaut (ex. avec le vieillissement, ou en raison d'une pathologie). L'idée du projet A-PIED était de fournir aux usagers piétons une aide technique efficace et adaptée.

Dans le contexte actuel scientifique, technologique et sociétal, le projet A-PIED visait à répondre à deux objectifs principaux : (i) analyser les besoins des piétons âgés pour des interfaces d'aide à la traversée de rue et à l'orientation en milieu urbain, ainsi que l'acceptabilité de ces interfaces ; (ii) tester une solution technologique innovante et originale, basée sur une interface vibrotactile portée sur le poignet, pour aider le piéton à émettre des décisions sécurisées de traversée de rue et à mieux s'orienter en ville. Le bracelet vibrotactile est composé de 3 vibreurs (à gauche, au centre et à droite du poignet). Les messages vibrotactiles délivrés à l'utilisateur se présentaient comme des séquences de vibrations variant en rythme, intensité et localisation autour du poignet indiquant une alerte pour la tâche de traversée de rue (vibration forte tout autour du poignet) et des informations de direction (ex. le vibreur s'active à gauche pour signifier au piéton de tourner à gauche) pour l'activité de navigation à pied dans une ville.

8.1. Le recours aux aides à la navigation avec l'âge

Un premier travail d'enquêtes (un atelier de travail auprès de 7 personnes âgées et deux questionnaires en ligne auprès de 359 répondants au total) a permis de dresser le portrait des aides à l'orientation et à la navigation utilisées avec l'avancée en âge. Tous modes de déplacement confondus, les aides les plus utilisées sont Internet, les GPS, les cartes et les plans, la signalétique et les repères, et enfin l'aide humaine. Peu de différences apparaissent avec l'âge, si ce n'est une légère tendance à moins utiliser les aides à caractère technologique

avec l'âge (ex. Internet et GPS). Ce résultat pourrait néanmoins provenir d'un effet de cohorte car les plus âgés d'aujourd'hui utilisent encore peu, pour la plupart, les technologies de l'information et de la communication. Mais d'ici 10 ou 20 ans, quasiment toutes les personnes âgées seront utilisatrices des technologies, puisque celles présentement âgées d'environ 50 ans les utilisent déjà. Un autre facteur explicatif tient à l'utilisabilité et l'utilité perçues des aides technologiques à la navigation, et par là même à l'acceptabilité de ces technologies par les personnes âgées. Si les GPS pour voitures sont connus du grand public, ils ne sont pas pour autant faciles à utiliser par les plus âgés. L'utilité perçue en est alors d'autant plus faible. Quant aux aides technologiques à la mobilité piétonne en ville, elles sont méconnues par la plupart des personnes âgées. Peu sont disponibles sur le marché, hormis les applications développées sur les smartphones que les plus âgés n'utilisent pas.

Plusieurs dispositifs techniques ont en effet vu le jour dans les laboratoires et sur le marché des smartphones surtout (cf. figures 47 et 48). Ceux-ci posent néanmoins des questions d'ordre technique et social importantes (précision de la navigation, traitement des données utilisateurs, nécessité d'une connexion internet mobile, possibilité de personnalisation du système etc.).



**Figure 47. Application mobile
Google Maps**



Figure 48. Google Gass

Les systèmes d'aide au déplacement piéton existants utilisent principalement la voie auditive et/ou visuelle pour donner de l'information au piéton qui navigue à pied dans une ville. Le recours à des modalités sensorielles déjà utilisées dans les activités sollicitant la marche à pied soulève la question d'interférences. Un piéton coupé des informations auditives de son environnement par le port d'un casque audio sur les oreilles peut alors ne pas percevoir des véhicules à l'approche, situation extrêmement dangereuse dans le cas de la traversée de rue notamment. Un piéton rivé sur son écran de téléphone portable peut lui aussi être privé d'informations utiles à son déplacement piéton, comme la perception visuelle d'un événement inattendu sur la chaussée, d'un véhicule soudainement trop près, etc.

Ces différents systèmes posent par ailleurs des questions d'acceptabilité, d'utilité et d'utilisabilité, tant du point de vue de la modalité sensorielle en jeu, que de la perception sociale du dispositif en lui-même, dans ses aspects pratiques et techniques. Ces questions n'ont pas encore été étudiées dans la littérature internationale, ou très peu, les développements étant pour la plupart trop récents.

De récentes recherches témoignent parallèlement du bénéfice apporté par l'utilisation du sens haptique. Les informations vibrotactiles semblent en effet être plus vite intelligibles par les utilisateurs (Pielot et al., 2012). Elles s'avèrent surtout utiles car elles ne sont pas sollicitées au cours de la marche à pied, contrecarrant alors d'éventuels effets d'interférences attentionnelles et sensorielles.

8.2. La conception centrée usagers d'une aide à la mobilité piétonne sollicitant le sens haptique

Les diverses études menées au cours du projet APIED ont permis de mettre en place une démarche de conception participative et itérative basée sur l'utilisation de métaphores adaptées aux personnes âgées. Cette démarche, proposée initialement par Brunet (2014), a pour but de renforcer le lien entre les messages fournis et les stimulations vibrotactiles associées afin de les rendre plus intuitifs et plus faciles à mémoriser, tout en plaçant l'utilisateur au centre de cette démarche et à toutes les étapes afin de répondre au mieux à ses besoins. Cette démarche semble particulièrement appropriée pour les personnes âgées qui peuvent présenter des difficultés attentionnelles et mnésiques. Cependant, cette démarche est assez longue et implique beaucoup d'utilisateurs différents à toutes les étapes. Au cours du projet A-PIED, nous avons fait le choix de simplifier et adapter cette démarche aux personnes âgées. En effet, le choix initial des messages a été réalisé par les concepteurs mais il a ensuite été affiné durant les étapes de conception en fonction des besoins exprimés par les utilisateurs âgés eux-mêmes. Pour le reste, l'implication des utilisateurs âgés s'est concentrée principalement sur les étapes de conception des stimulations vibrotactiles, i.e. 1/ lister les métaphores correspondant aux messages, 2/ les utiliser pour concevoir les stimulations vibrotactiles associées et 3/ les évaluer pour valider les messages et choisir les plus appropriés pour un jeu final adapté au contexte de navigation.

Outre le fait qu'est rapidement apparue la nécessité d'adapter les consignes à une population de personnes âgées, en évitant par exemple les abstractions, les diverses étapes de conception et itérations nous ont permis de mettre en évidence plusieurs constats :

1/ Les personnes âgées ont une certaine réticence à utiliser de nouvelles technologies. Cette réticence peut provenir de plusieurs facteurs. Les personnes âgées ont montré, d'une part, une certaine méfiance envers la géolocalisation avec la crainte d'être pistées et, d'autre part, une association négative entre ces aides technologiques et les aides au handicap. En effet, les personnes âgées ne sont pas enclins à utiliser des dispositifs les « diminuant » mais souhaitent au contraire continuer à utiliser leurs capacités cognitives afin de palier à leur crainte d'éventuels déclin cognitifs.

2/ Les jeunes seniors (< 75 ans) déjà confrontés aux nouvelles technologies durant leur carrière et ouverts aux nouveaux développements sont très favorables au dispositif vibrotactile. Ils ne partagent pas les mêmes craintes que les personnes les plus âgées (> 75 ans) n'utilisant pas de nouvelles technologies de type GPS par exemple, ou de smartphone. Ceci démontre que l'exposition aux nouvelles technologies est un facteur important pour l'acceptabilité et l'adoption d'une nouvelle technologie non présente sur le marché.

3/ Les personnes âgées ont des besoins et des priorités différents des adultes jeunes d'âge moyen concernant les messages à transmettre et leur conception (en comparant les résultats avec ceux issues des études de Brunet, 2014).

L'ensemble des études itératives pour la conception et l'évaluation des messages vibrotactiles menées dans la première année du projet A-PIED nous a permis de lister plusieurs recommandations concernant la conception des messages. (cf. Arab et. al., 2015).

Recommandation 1 : il est nécessaire de concevoir des messages spécifiques à la tâche, sur la base des priorités données par les adultes âgés. Ainsi, les personnes âgées ont considéré les messages directionnels comme cruciaux pour la tâche de navigation, tandis que les autres messages ont été considérés comme d'une importance secondaire. Toutefois, il est à rappeler que l'environnement utilisé dans l'étude 2 (i.e., milieu naturel « protégé » autour du bâtiment du CEA Nano-Innov à Gif-sur-Yvette) a pu influencer les évaluations car il ne présentait pas

de point d'intérêt intéressant (ex. un magasin) ni de danger réel (pas de trafic). Par conséquent, les messages spécifiques pour la tâche (i.e., les directions liées à la navigation devront être conçus de telle sorte qu'ils soient les plus intuitifs et les plus faciles à mémoriser. Aussi, la conception de ces messages relatifs à la tâche principale doit se distinguer suffisamment des conceptions utilisées pour des messages secondaires à la tâche (ex. points d'intérêt).

Recommandation 2 : la conception des messages importants doit être la plus simple possible. Dans nos études, les types de conception les mieux reconnus et préférés des participants étaient constitués de stimulations fortes et continues, sans trop de répétitions. Ces messages vibrotactiles ont été considérés comme les plus « intuitifs », nécessitant moins d'efforts de mémorisation. En général, pour les messages tels que les directions, une seule répétition avec la plus grande amplitude possible a été préférée. Par conséquent, diverses combinaisons de paramètres (telles que les répétitions, les variations sur les durées et l'amplitude des stimulations) doivent être évitées autant que possible pour de tels messages.

Recommandation 3 : nos études ont montré que les répétitions d'une même séquence au sein d'un même message vibrotactile (ex. 3 vibrations fortes et longues à droite pour le message « tourner à droite ») doivent être utilisées avec parcimonie. Nous avons émis l'hypothèse, étant donné l'augmentation des difficultés attentionnelles et mnésiques avec l'âge, que d'avoir des répétitions d'une même séquence dans un message aideraient à sa reconnaissance. En effet, même si la première séquence était manquée, les séquences suivantes permettraient encore sa reconnaissance. Cependant, dans un ensemble contenant au moins 6 messages, chacun avec des répétitions et des combinaisons différentes, ceci a amené de la confusion. En manquant la ou les premières stimulations, les participants ne savaient pas ce qu'ils avaient manqué exactement et ne pouvaient plus distinguer de manière appropriée le message parmi des messages similaires.

Recommandation 4 : L'utilisation d'une conception basée sur des métaphores est une piste prometteuse. En effet, les taux de reconnaissance étaient plutôt élevés pour les messages « Demi-tour » (Type 2) fondé sur le mouvement de retournement et pour « Problème » où la métaphore sous-jacente est une alarme (répétée ou non). Au contraire, pour les messages où les métaphores étaient moins significatives, i.e., moins intuitives, naturelles et plus abstraites (ex. « point d'intérêt »), les taux de reconnaissance étaient assez faibles. L'utilisation des métaphores a d'ailleurs déjà prouvé son efficacité auprès d'une population plus jeune (Brunet, 2014) et devrait être encore plus investiguée et appliquée pour les personnes âgées afin de renforcer le lien entre les vibrations et la signification du message à mémoriser.

Recommandation 5 : Pour que la mise sur le marché d'une aide haptique réussisse, son acceptabilité « physique » doit être étudiée avec autant d'importance que le développement du langage haptique lui-même. Compte tenu des réticences des personnes âgées envers les accessoires technologiques, il est important de tenir compte de l'esthétique, du confort et de la portabilité de l'aide à la navigation. Nous avons choisi comme facteur de forme un bracelet ressemblant à une montre pour faciliter son acceptabilité. A travers les réponses qualitatives, ce choix de conception s'est avéré fructueux puisque les participants ne l'ont pas rejetée et se sentaient à l'aise avec le bracelet. Souvent, ils oubliaient de le retirer en commençant à répondre au questionnaire.

Tout ce processus itératif de conception-évaluation a ainsi permis de mettre en évidence les besoins des personnes âgées en termes de création et d'utilisation des messages vibrotactiles, ainsi que du design du bracelet lui-même, dans le but de générer un jeu final et optimal de messages pour les expérimentations sur simulateur, discutées dans la section suivante.

8.3. L'évaluation de l'efficacité, l'utilisabilité et l'acceptabilité d'un bracelet vibrotactile pour aider le piéton à traverser la rue et à s'orienter à pied dans une ville

Après une première phase de conception adaptée aux besoins et difficultés des piétons âgés, la deuxième année du projet a consisté en une phase d'évaluation de l'efficacité, de l'utilisabilité et de l'acceptabilité du bracelet vibrotactile. Deux études ont été menées auprès de participants jeunes et plus âgés.

Une étude sur simulateur s'est d'abord attelée à tester le bracelet dans une tâche de traversée de rue, le bracelet aidant le piéton à émettre des choix (plus) sécurisés de traversée de rue. Un message vibrotactile était transmis au participant, qui portait le bracelet à son poignet droit, lorsque la situation était dangereuse et ne lui permettait pas de traverser en toute sécurité (il n'avait pas le temps de franchir une ou les deux voies de circulation ; les trois vibreurs s'enclenchaient alors tous en même temps et tout autour du poignet pour lui signifier le danger). Les résultats de cette étude menée auprès de 57 participants jeunes et plus âgés montrent un réel bénéfice du bracelet, en termes de sécurité des décisions de traversée de rue. Le bracelet s'est avéré réellement utile : nous avons ainsi observé une diminution du pourcentage de décisions dangereuses de l'ordre de la moitié (décisions qui ont mené à une collision avec un véhicule à l'approche) chez tous les participants qui le portaient en traversant la rue. Le bracelet a diminué le risque de collisions dans tous les groupes d'âge. On note néanmoins un bénéfice plus fort chez les piétons les plus à risque, à savoir les femmes très âgées (> 70 ans). Cette efficacité du bracelet à guider le piéton dans des choix de traversée de rue plus sécuritaires pourrait permettre, à terme, de diminuer nettement les statistiques d'accidents en France.

Si les données comportementales recueillies sur simulateur montrent que le bracelet réduit de moitié les décisions dangereuses, il ne les réduit totalement pas à zéro, car un message sur deux est en moyenne non perçu ou défié, quel que soit l'âge des participants. Des études futures doivent être menées afin de déterminer pourquoi le participant émet un avis contraire au message vibrotactile (il ne perçoit pas ou défit la technologie ?).

En termes d'utilisabilité et d'utilité perçues, les données subjectives recueillies auprès des participants montrent des avis globalement positifs. Nous retenons que le bracelet est jugé utile et facile à utiliser par tous les participants, en moyenne. Alors que l'intention comportementale est nulle chez les participants jeunes (0%), 40% des participants âgés et très âgés déclarent vouloir utiliser à l'avenir ce type de dispositif d'aide à la traversée de rue. A noter que les participants âgés et très âgés s'avouent par contre être anxieux envers les technologies.

La dernière étude visait cette fois-ci à tester le bracelet dans une tâche de navigation piétonne, le bracelet guidant l'individu à s'orienter correctement dans une ville. Pour cela, le bracelet émettait une vibration forte continue sur la droite du poignet pour signifier que le piéton devait tourner à droite, une vibration forte continue sur la gauche du poignet pour signifier au piéton de tourner à gauche, une succession de vibrations fortes et courtes à gauche, milieu, droite répétée 2 fois pour signifier de faire demi-tour, et deux vibrations simultanées de moyenne intensité des trois vibreurs signifiant que le participant était arrivé à destination. Les résultats de cette étude menée auprès de 58 piétons jeunes et âgés montrent un réel bénéfice du bracelet en termes de d'efficacité de navigation. Le bracelet s'est avéré réellement efficace, en termes d'orientations correctement prises (gauche/droite) dans des intersections simples (carrefours en T) et de temps de parcours plus courts avec le bracelet plutôt qu'avec une carte matérielle. Ces bénéfices s'observent chez tous les participants qui le portent en navigant la ville virtuelle. Néanmoins, les bénéfices semblent plus importants chez

les participants les plus âgés (> 70 ans) qui montrent des difficultés à utiliser la carte et bénéficient donc grandement de l'aide apportée par le bracelet (en termes de temps de parcours plus courts et d'orientations correctement prises dans des intersections simples). En revanche, le bracelet ne se révèle pas efficace dans le cas des carrefours complexes (à plus de 5 alternatives de direction), les participants montrant des erreurs de direction (confusions dans la direction à prendre une fois le rond-point engagé, ex. la troisième à droite). Ce résultat est lié à notre choix de transmettre deux informations dans le cas des carrefours complexes (i.e., indiquer d'abord la direction du rond-point à prendre, puis la sortie à choisir). Les résultats montrent toutefois que ce choix n'était pas adapté. Similairement aux GPS audio actuels, il suffirait peut-être d'indiquer directement et seulement le numéro de la sortie (3^e sortie à gauche) ? Mais comment le faire par la voie haptique ? Des travaux futurs devront répondre à ces questions afin de définir le moyen le plus optimal et compréhensible de transmettre des d'informations de direction dans le cas des carrefours complexes.

Finalement, les données subjectives recueillies auprès des participants montrent des avis globalement très positifs. En termes d'utilité et de facilité perçues, le bracelet d'aide à la navigation est jugé en moyenne utile et facile à utiliser par tous les participants, quel que soit leur âge. Mais alors que les participants les plus âgés rapportent plus d'anxiété envers les technologies que les âgés et les jeunes, tous ont déclaré éprouver du plaisir à utiliser le bracelet. Ils sont également plus nombreux (75%) à déclarer avoir l'intention d'utiliser à l'avenir ce genre de bracelet d'aide à la navigation piétonne, contrairement aux adultes jeunes (10%) et âgés entre 60 et 70 ans (24%).

8.4. Interprétations générales des résultats et perspectives

Ces résultats nous encouragent à poursuivre les développements et les recherches sur le bracelet vibrotactile pour aider le piéton à mieux traverser la rue et à mieux s'orienter à pied dans une ville.

D'un point de vue technologique, nous envisageons d'explorer la possibilité, pour l'utilisateur, de personnaliser les messages vibrotactiles, voire de les concevoir lui-même, parce que, lors de nos études, nous avons observé une grande variété des métaphores sous-jacentes, pouvant favoriser la compréhension du sens des messages délivrés. Cette possibilité de personnalisation impliquera la conception de logiciels facilement utilisables, qui permettront la manipulation des nombreux paramètres impliqués dans la conception d'une stimulation tactile. Aussi, nous voudrions travailler sur la miniaturisation des actionneurs, sans remettre en cause la richesse des stimulations délivrées. Une telle miniaturisation amènera une intégration plus facile dans tout type d'interfaces portées, ainsi qu'une consommation énergétique moins importante. Enfin, nous voudrions également explorer l'intégration de dispositifs vibrotactiles portés tels que le bracelet à des systèmes de transport intelligents basés sur l'infrastructure ou les véhicules. Une telle intégration nous permettra de proposer au piéton une offre informationnelle et de services complète et performante en termes de sécurité et confort.

D'un point de vue méthodologique, de nouvelles recherches devront être menées en environnement réel, afin d'étudier le port du bracelet dans des conditions naturelles plus complexes que celles offertes par la réalité virtuelle, outil privilégié des études menées jusqu'à présent dans le projet A-PIED. L'avantage des simulateurs est d'abord de fournir un environnement sûr où les réactions des individus à des événements potentiellement dangereux peuvent être examinées (ex. survenue brutale d'un véhicule sur la chaussée). Un autre avantage est de pouvoir manipuler et étudier certains facteurs environnementaux (tels que la

complexité du trafic et la vitesse d'approche des véhicules, des configurations d'infrastructure plus ou moins complexes, comme des ronds-points versus des intersections simples) identiques pour tous les participants d'une même étude. Dans une situation du monde réel, il est très difficile d'étudier les conditions liées au trafic et à l'environnement extérieur, car une étude d'observation en milieu naturel dépend des caractéristiques existantes de l'infrastructure et de la circulation, et ne permet pas (ou difficilement) le contrôle de ceux-ci. De travaux futurs en milieu naturel devront toutefois être menés afin de confirmer nos résultats et poursuivre l'étude d'une telle aide à la mobilité piétonne. Ces travaux ne pourront être menés que d'ici quelques années, car ils nécessitent au préalable que les trois éléments du système routier – les véhicules, l'infrastructure et les usagers - soient connectés pour communiquer entre eux.

La question du besoin chez les plus vulnérables, dans le cadre d'un âge très avancé notamment (au-delà de 90 ans par exemple), ou encore du vieillissement pathologique, mériteraient d'être abordés dans le cas de futurs travaux. Les participants recrutés dans le cadre du présent projet APIED sont tous des individus autonomes, capables de subvenir à leurs besoins fonctionnels et de se déplacer à pied sans aide à la marche. Ils n'ont pas été recrutés dans des instituts médicalisés, et semblent représenter la population des personnes âgées actives, même à un âge avancé (jusqu'à 85 ans), sujettes à des déclin, plus ou moins importants selon les individus, normaux avec l'avancée en âge. Les résultats seraient sans doute différents auprès d'une population plus fragile, institutionnalisée, moins mobile et moins autonome. La question de l'apport d'une aide à la navigation piétonne dans le cadre de la maladie Alzheimer par exemple, soulève des enjeux et réponses différents que dans le présent projet de recherche APIED, car la maladie entraîne des déclin très importants, au niveau cognitif et mnésique particulièrement, jusqu'à une perte complète d'autonomie.

Les aides haptiques présentent aussi un intérêt fort pour des personnes avec handicap visuel. Leur applicabilité (sous forme de bracelet ou de ceinture) pour les déplacements de ces personnes a déjà été investiguée (ex. projets européens ENABLED et HAPTMAP dans lesquels le CEA a participé). Le dispositif testé dans APIED pourrait certainement être utile et utilisé pour des nonvoyants et malvoyants. Cependant, il devrait être intégré à un système de localisation et guidage très précis. Cette intégration n'est envisageable que lorsque les technologies de géo-localisation auront avancé suffisamment et lorsque les bases de données géographiques contiendront des informations précises sur des repères de l'environnement.

L'évaluation subjective du bracelet a été faite par le biais d'un questionnaire bien établi en Ergonomie, le *Technology Acceptance Model* (TAM, Venkatesh & Bala, 2008). Néanmoins, certaines limites existent à l'utilisation de ce questionnaire. La première concerne le recours aux échelles de Likert qui réduisent les possibilités de traitements statistiques et entraînent parfois des effets « plafond » limitant également des analyses différentielles fines entre les individus. Une autre limite concerne l'aspect ponctuel et contextuel de l'évaluation du bracelet sur simulateur. Les participants nous ont beaucoup alertés sur le fait que leur évaluation serait sans doute plus positive s'ils avaient utilisé le bracelet dans un contexte naturel et de manière répétée avec le temps. Le TAM est d'ailleurs construit, comme beaucoup de tests d'acceptabilité, sur le principe d'un usage répété et volontaire, ce qui est difficilement concevable dans le cadre de technologies comme celle présentement étudiée dans le projet A-PIED non encore disponible sur le marché. Il serait ainsi intéressant de développer un outil d'évaluation de technologies nouvelles et non encore en vente sur le marché, i.e. applicable à un contexte de recherche et à des développements prototypiques.

Les travaux menés sur le bracelet vibrotactile font parfois apparaître des différences entre données subjectives et données comportementales recueillies sur simulateurs. Au-delà d'avis subjectifs déclarés comme étant très positifs, l'individu bénéficie-t-il de la technologie aussi dans son comportement effectif ? Les résultats de nos travaux montrent que ce n'est pas toujours le cas, un avis subjectif positif ne se ressent pas forcément sur le comportement directement. L'individu peut juger la technologie utile et efficace sur une échelle de Likert en 6 points, mais sans pour autant agir lui-même comme la technologie le voudrait, i.e. comme elle a été conçue. Par exemple, dans le cas de la traversée de rue, les avis subjectifs sont très positifs, avec une utilité perçue proche de 80% en moyenne. Pourtant, environ la moitié des messages vibrotactiles a été non/mal perçue ou défiée, quel que soit l'âge des participants. L'individu peut déclarer trouver le dispositif utile sans pour autant lui faire entièrement confiance.

Si des études futures devront être menées afin de déterminer si l'individu ne perçoit pas ou défie la technologie lorsqu'il émet un avis contraire au message vibrotactile, ces résultats peuvent témoigner d'un phénomène de réactance psychologique. Selon Brehm (1966), chaque fois qu'un comportement accessible à un individu est pour une raison ou une autre retiré de son champ des possibles (ou menacé de l'être), cet individu ressent une restriction de sa liberté, ce qui éveille en lui un état de réactance psychologique, i.e., un état émotionnel orienté vers un recouvrement de sa liberté (par exemple, par l'expression d'un choix différent du choix proposé). La réactance psychologique est plus simplement définie comme la réaction négative des individus à toute tentative de contrainte de leur libre choix.

Dans notre étude, nous retenons un état de réactance psychologique dans le cas de la tâche de traversée de rue particulièrement. L'écart (et le manque de correspondance) entre utilité perçue et utilité réelle apparaît en effet plus fort dans le contexte de la traversée de rue que dans le cadre d'une tâche d'orientation en milieu urbain inconnu. Ainsi, dans la tâche de navigation piétonne sur simulateur, le bracelet a été très positivement évalué, avec en moyenne 80% d'avis positifs quant à son utilité perçue. Et dans le comportement, peu de messages ont été non / mal perçus ou défiés dans le cas des intersections simples (5%), les chiffres étant plus importants dans le cas des intersections complexes (environ 20% des messages non/mal perçus ou défiés) en raison d'un choix (à priori) de guidage non adapté (i.e., donner deux messages à l'approche d'un rond-point). Ces chiffres sont toutefois plus faibles que dans la tâche de traversée de rue où le pourcentage d'essais pour lesquels le participant ne répond pas ou défie les messages vibrotactiles atteint les 50%.

La plus grande confiance et la délégation des prises de décision de l'individu envers le système semblent être plus grandes dans le cas de tâches où le degré de liberté est faible. S'orienter dans un milieu urbain totalement inconnu laisse peu de libertés à l'individu, qui est alors obligé de déléguer ses choix à l'aide technique apportée par le GPS. Il ne connaît pas l'environnement et est donc totalement dépendant du GPS en l'absence d'autres dispositifs comme une carte papier. C'est d'autant plus le cas dans nos travaux où l'expérimentateur ne disait pas aux participants où ils devaient aller, par l'absence d'adresse ou de point d'arrivée précis lorsqu'ils portaient le bracelet vibrotactile. Par contre, traverser la rue est un choix qui est libre et inhérent à chaque individu, dans n'importe quel milieu routier, urbain ou non, et connu ou non, où la liberté et la responsabilité dans la tâche sont de rigueur. Apporter une aide à la prise de décision de traverser la rue semble être plus délicat car l'individu peut ressentir de fausses alertes (alors qu'elles ne le sont pas) en raison d'une mauvaise perception du trafic et d'un sentiment subjectif d'erreur. Le manque de confiance envers un système d'aide paraît ainsi être plus fort dans le cadre de tâches où la liberté de l'individu est grande. Par exemple, qui n'a pas défié un GPS dans le cas d'environnements familiers, en pensant

connaître un « meilleur » chemin, ceci étant impossible dans un environnement totalement inconnu.

Cette question de réactance psychologique est d'ailleurs en lien avec les résultats que nous avons obtenus au TAM pour les questions portant sur l'intention comportementale des participants à utiliser ce genre de dispositif vibrotactile à l'avenir. Ainsi, et alors que les participants âgés montrent une intention comportementale forte pour le bracelet d'aide à la navigation (75%), ils se déclarent peu enclins à utiliser ce dispositif pour les aider à traverser la rue. Dans leur discours, nous notons des remarques du type « *cela peut être utile pour les plus faibles, ou les aveugles, mais pas pour moi* ». Dans ce sens, les adultes jeunes ne montrent pas d'intention comportementale pour le bracelet, tant dans sa composante traversée de rue (10%) qu'orientation (0%). Ils se déclarent « *pas concernés mais bien/utile/ingénieux pour les personnes âgées/ les malvoyants/ les Alzheimer* ». Tous les participants s'accordent par contre à dire que de tels services pourraient être intégrés dans un dispositif plus large et non dédié au déplacement piéton, comme un smartphone ou une montre connectée.

Dans une perspective plus fondamentale, des travaux restent à mener pour examiner l'utilité de faire appel au sens haptique dans le cadre de la marche pied en milieu urbain bruyant. Les informations issues du toucher sont-elles vraiment plus rapidement perceptibles dans un contexte bruyant et urbain ? Un piéton se déplaçant dans une ville où le trafic est dense, où la foule est présente et les stimulations visuelles et auditives donc très nombreuses a-t-il des ressources mentales encore disponibles pour percevoir des informations vibrotactiles ? Si oui, avec quelles contraintes d'intensité et de fréquence ? Ces questions n'ont pas encore trouvé de réponses précises dans la littérature et des travaux restent donc à mener dans le cadre de la marche à pied en milieu naturel urbain.

Les travaux menés dans le cadre du projet A-PIED soulèvent également la question de concevoir des aides technologiques d'assistance à la mobilité piétonne où la confidentialité des données règne. Le développement et déploiement massifs d'objets intelligents au cours de ces dernières années ont transformé notre environnement et notre vie quotidienne. Par exemple, plus d'un milliard de smartphones a été vendus dans le monde en 2013, ces dispositifs étant même considérés par certains comme une extension intelligente du bras humain. La science n'a pas encore pleinement pris en compte l'ensemble des évolutions technologiques développées ces dernières années pour inventer de nouveaux dispositifs adaptés aux besoins de l'ensemble de la population, et à l'ensemble des activités de la vie quotidienne. Les développements technologiques sont parfois si rapides qu'ils devancent les besoins réels des usagers. Ces évolutions technologiques et industrielles impliquent par contre une forte intrusion dans notre vie privée et au-delà, dans nos données personnelles. Les technologies de nos téléphones portables ont par exemple la capacité de localiser l'individu sur des cartes géographiques, indépendamment de sa volonté. Les dispositifs portables intelligents envoient des données de localisation à un ou plusieurs serveurs généralement sans que l'utilisateur l'ait désiré. Les voyageurs laissent des traces sur les serveurs en échange d'informations ou de services. Cela se produit souvent sans savoir où les données sont hébergées et par qui, ou comment elles pourraient être traitées. Ces questions d'accès aux données personnelles s'avèrent être un point important rappelé par les participants âgés de nos études. Par exemple, les participants déclaraient parfois « *ne pas vouloir être suivi par mes proches* » ; « *vouloir être libres de mes mouvements* » ; « *ne pas être harcelés par de la publicité qui récupère mes informations* ».

La notion même d'assistance à la mobilité peut d'ailleurs faire peur aux personnes âgées. Certaines ne se sentent pas concernées alors qu'elles le sont. Avec l'avancée en âge, les

capacités visuelles, cognitives et motrices déclinent nécessairement, et ces déclins ont *de facto* un impact sur les déplacements piétons, qui ralentissent, deviennent plus dangereux (chutes et accidents) ou plus complexes (difficultés d'orientation en milieu inconnu). Or certaines personnes âgées ont des difficultés à prendre conscience de ces déclins, se les avouer, jusqu'à admettre qu'une aide leur est devenue maintenant nécessaire, comme l'illustrent les propos de quelques participants âgés de plus de 70 ans « *C'est sans doute bien pour les vieux* », « *c'est bien/utile/ingénieux pour les personnes âgées/ les malvoyants/ les Alzheimer* », « *c'est destiné à des personnes qui ont des pertes de mémoire, des problèmes d'orientation, des personnes âgées en bref!* ». Cette question du déni chez certaines personnes âgées était d'ailleurs particulièrement évoqué dans le rapport du récent projet de recherche MAPISE¹², également financé par le PREDIT entre 2011 et 2014, qui s'interrogeait sur la façon de « faire dire » aux personnes âgées la « réalité » sur leurs propres perceptions d'eux-mêmes (i.e. leurs difficultés à parler sincèrement de certaines faiblesses, de leurs difficultés à réaliser telle ou telle chose, etc.). D'autres personnes âgées se montrent effrayées quant à elles à l'idée de perdre leur autonomie si elles utilisent des aides ou assistances à la mobilité, comme l'illustrent les propos de quelques participants : « *c'est sans doute très bien mais je ne veux pas être une machine* » ; « *je vais perdre mon autonomie* ». Avec le temps, et l'usage important d'une aide au déplacement, l'utilisateur peut, in fine, ne plus parvenir à s'orienter seul. Par exemple, l'usage massif des répertoires électroniques sur téléphones portables rend l'utilisateur amnésique des numéros de téléphone, plus du tout habitué à composer lui-même les numéros de son répertoire. N'en sera-t-il pas de même avec les aides à la navigation ? L'utilisateur ne deviendra-t-il pas, in fine, incapable de se déplacer seul dans un environnement inconnu ?

Enfin, les travaux menés dans le cadre du projet A-PIED témoignent de l'utilité de poursuivre les études relatives aux déplacements piétons plus généralement. Si la marche est le mode de transport le plus simple, durable et abordable, elle est pour autant souvent oubliée. La recherche scientifique et les politiques locales ou nationales mettent, en effet, depuis bon nombre d'années déjà, l'accent sur les déplacements motorisés, et notamment automobiles, alors que tous les déplacements commencent ou finissent à pied. La marche est ainsi nécessaire au fonctionnement du transport public, ou encore à l'usage d'un véhicule individuel dont elle est le complément incontournable. La marche est, de ce fait, le vecteur de continuité de tous les déplacements de l'utilisateur de la route. Pour répondre aux enjeux soulevés par le changement climatique, la pollution, la mobilité d'une population vieillissante, et plus généralement la santé (ex. lutte contre l'obésité), la marche doit être conçue comme une solution attrayante et complémentaire au déplacement motorisé (ITF, 2012). Mais pour autant, la sécurité des piétons est aujourd'hui loin d'être garantie dans nos villes françaises, et les statistiques d'accidents en témoignent. Restent donc encore bien des travaux de recherche à mener, des initiatives gouvernementales et locales à insuffler, et des services et technologies à développer pour promouvoir la marche à pied comme un moyen sûr de se déplacer en ville.

¹² Rapport disponible en ligne : <http://www.predit.prd.fr/predit4/publication/46391>

9. Communications et publications issues du projet

Communications dans des conférences internationales avec actes

Arab, F., Panëels, S., Coeugnet, S., Dommès, A., Chevalier, A. & Anastassova, M. (2015). Haptic patterns and older adults: to repeat or not to repeat? *IEEE Worldhaptics '15*, Evanston, IL, USA.

Coeugnet S., Dommès, A., Dang, N.T., Vienne, F., Panëels, S., Arab, F., Chevalier, A. & Anastassova, M., (2015). A vibrotactile device to help older pedestrians to get around safely. *14th European Congress of Psychology*, Milan, Italie, Juillet

Le Morellec, F., Anastassova, M., Dommès, A., Panëels, S. & Lozada, J. (2014). Capabilities, resources and conversion factors: towards an analytical model of older pedestrians' mobility. *28th International Congress of Applied Psychology*, Division 13: Traffic Psychology.

Panëels, S., Le Morellec, F. & Anastassova, M. (2014). "Smiles, kids, happy songs!": Co-designing haptic metaphors with older adults. *ACM CHI 2014 Extended Abstracts*.

Articles dans des revues internationales

Quatre articles sont en cours de préparation. Ils concernent les études préliminaires, l'étude 4 et l'étude 5. Ils seront soumis dans des revues internationales à comité de lecture.

10. Références bibliographiques

- Arab, F., Panëels, S., Coeugnet, S., Dommès, A., Chevalier, A. & Anastassova, M. (2015). Haptic patterns and older adults: to repeat or not to repeat? *IEEE Worldhaptics '15*, Evanston, IL, USA.
- Army Individual Test Battery. (1944). *Manual of directions and scoring*. Washington, DC: War Department, Adjutant General's Office.
- Banton, T., Stefanucci, J., Durgin, F., Fass, A. & Proffitt, D. (2005). The perception of walking speed in a virtual environment. *Presence: Teleoperator Virtual Environment*, 14, 394-406.
- Berthoz, A. Viaud-Delmon, I. (1999). Multisensory integration in spatial orientation. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 708-712.
- Bevan, N. (1995) Measuring usability as quality of use. *Software Quality Journal*, 4, 115-150.
- Brehm, J. W. (1966). *A theory of psychological reactance*. NY, Academic Press.
- Brunet, L. (2014). *Etude ergonomique de la modalité haptique comme soutien à l'activité de déplacement piéton urbain: un projet de conception de produit innovant*. Thèse de Doctorat de Psychologie, Université Paris Sud-Paris XI, France.
- Bruseberg, A., & McDonagh-Philp, D. (2001). New product development by eliciting user experience and aspirations. *International Journal of Human – Computer Studies*, 55, 435-452.
- Burles, F., Guadagni, V., Hoey, F., Arnold, F.A.E.G, Levy, R.M., O'Neill, T., Iaria, G. (2014). Neuroticism and self-evaluation measures are related to the ability to form cognitive maps critical for spatial orientation. *Behavioural Brain Research*, 271, 154-159.
- Burns, P.C. (1999). Navigation and the mobility of older drivers. *The Journal of Gerontology*, 54, 49–55.
- CERTU (2001). *Rapport d'étude : la mobilité des personnes âgées, analyse des enquêtes ménages déplacements*. Collection du CERTU, Lyon.
- Corbetta, M., Kincade, J.M., & Shulman, G.L. (2002) Neural systems for visual orienting and their relationship to spatial working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 508-523.
- Corrigan J. D., Hinkeldey N. S. (1987). Relationships between parts A and B of the trail making test. *Journal of Clinical Psychology*, 43, 402–409.
- Cushman, L.A., Stein, K. & Duffy, C.J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71, 888–895.
- Davey, J. A. (2006). Older people and transport: coping without a car. *Ageing and Society*, 27(01), 49.
- Dillon, A., & Morris, M. G. (1996). User acceptance of information technology: Theories and models. *Annual Review of Information Science and Technology*, 31, 3-32.
- Dommès, A., Cavallo, V. (2011). The role of perceptual, cognitive, and motor abilities in street-crossing decisions of young and older pedestrians. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31, 292-301.
- Dommès, A., Cavallo, V. (2012). Can simulator-based training improve street-crossing safety for older pedestrians? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15, 206-218.

- Dommes, A., Cavallo, V., Dubuisson, J.B., Tournier, I., Vienne, F. (2014). Crossing a two-way street: comparison of young and old pedestrians. *Journal of Safety Research*, 50, 27-34.
- Dommes, A., Cavallo, V., Oxley, J.A. (2013). Functional declines as predictors of risky street-crossing decisions in older pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 135-143.
- Dommes, A., Cavallo, V., Vienne, F., Aillerie, I. (2012). Age-related differences in street-crossing safety before and after training of older pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 44, 42-47.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R., 1975. Mini-mental state: A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12 (3), 189-98.
- Foster Jr, S. T. & Franz, C. R. (1999). User involvement during information systems development : a comparison of analyst and user perceptions of system acceptance. *Journal of Engineering and Technology Management*, 16, 329 – 348.
- Gilhooly, M.G. (2002). *Transport and ageing: Extending quality of life for older people via public and private transport*. Economic and Social Research Council, UK, pp. 5-31.
- Goodman, J., Gray, P., Khammampad, K. & Brewster, S. (2004). *Using landmarks to support older people in navigation*. In Proceedings of Mobile Human-Computer Interaction (MobileHCI 2004), 3160, 38-48, LNCS.
- Hakamies-Blomqvist L., Wahlström B. (1998). Why do older drivers give up driving? *Accident Analysis and Prevention*, 30(3), 305-12.
- Harrell, W.A. (1991). Precautionary street crossing by elderly pedestrians. *International Journal of Aging and Human Development*, 32 (1), 65-80.
- Harruff, R.C., Avery, A., & Alter-Pandya, A.S. (1998). Analysis of circumstances and injuries in 217 pedestrian traffic fatalities. *Accident Analysis and Prevention*, 30 (1), 11-20.
- Head, D. & Isom, M. (2010). Age effects on wayfinding and route learning skills. *Behavioural Brain Research*, 209, 49-58.
- Henze, N., Heuten, W. & Boll, S. (2006). *Non-intrusive somatosensory navigation support for blind pedestrians*. In Proceedings of EuroHaptics, 459-64.
- Holland, C., & Hill, R. (2007). The effect of age, gender and driver status on pedestrians' intentions to cross the road in risky situations. *Accident Analysis and Prevention*, 39(2), 224-37.
- Holland, C., & Hill, R. (2010). Gender differences in factors predicting unsafe crossing decision in adult pedestrians across the lifespan: a simulation study. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 1097- 1106.
- Hovbrandt, P., Ståhl, A., Iwarsson, S., Horstmann, V., & Carlsson, G. (2007). Very old people's use of the pedestrian environment: functional limitations, frequency of activity and environmental demands. *European Journal of Ageing*, 4 (4), 201-211.
- Hunt, M., Harper, D.N., & Lie, C. (2011). Mind the gap: training road users to use speed and distance when making gap-acceptance decisions. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 2015-2023.
- ITF (2012). *Pedestrian Safety, Urban Space and Health*. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789282103654-en>

- ISO 9241-11 (1998). *Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation*. International Organization for Standardization (ISO). Switzerland.
- ISO FDIS 9241-210 (2009). *Ergonomics of human system interaction Ergonomics of human system interaction - Part 210: Human-centered design for interactive systems* (formerly known as 13407). International Organization for Standardization (ISO). Switzerland.
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: how to (ab)use them. *Medical Education*, 38, 1212–1218.
- Kalova, E., Vlcek, K., Jarolimova, E. & Bures, J. (2005). Allothetic orientation and sequential ordering of places is impaired in early stages of Alzheimer's disease: corresponding results in real space tests and computer tests. *Behavioural Brain Research*, 159, 175–186.
- Leonard, D. & Rayport, J.F. (1997). Spark innovation through empathic design. *Harvard Business Review*, 6, 102 – 113.
- Lithfous, S., Dufour, A. & Desprès, O. (2013). Spatial navigation in normal aging and the prodromal stage of Alzheimer's disease: Insights from imaging and behavioral studies. *Ageing Research Reviews*, 12, 201-213.
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions: The effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task, *Accident Analysis and Prevention*, 39 (5), 934-943.
- Lobjois R, & Cavallo V. (2009). The effects of aging on street-crossing behavior: from estimation to actual crossing. *Accident Analysis and Prevention*, 41 (2), 259-267.
- Marottoli, R. A., de Leon CFM, Glass, T. A., Williams, C. S., Cooney, L. M., & Berkman, L. F. (2000). Consequences of driving cessation: decreased out-of-home activity levels. *The Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 55(6), S334–40.
- Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E. & Moffat, S.D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural Brain Research*, 205, 88–95.
- May, A.J., Ross, T., Bayer, S.H. & Tarkiainen, M.J. (2003). Pedestrian navigation aids: information requirements and design implications. *Personal and Ubiquitous Computing*, 7, 331-338.
- Millonig, A. & Schechtner K. (2007). *Decision loads and route qualities for pedestrians – key requirements for the design of pedestrian navigation services*. In Waldau, N., Gattermann, P., Knoflacher, H., Schreckenberg, M. (eds.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Springer Berlin Heidelberg (2007), 109-118.
- Moffat, S.D., Kennedy, K.M., Rodrigue, K.M. & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17, 1274–1282.
- Moffat, S.D., Zonderman, A.B. & Resnick, S.M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22, 787–796.
- Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR, 2013). *La sécurité routière en France. Bilan de l'année 2012*. La documentation Française, Paris.
- Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR, 2012). *La sécurité routière en France. Bilan de l'année 2011*. La documentation Française, Paris.
- Ohm, C., Bienk, S., Kattenbeck, M., Ludwig, B., & Müller, M. (sous presse). Towards interfaces of mobile pedestrian navigation systems adapted to the user's orientation skills. *Pervasive and Mobile Computing*.

- O'Neill, E. & Srikulwong, M. (2011). Wearable tactile display of landmarks and direction for pedestrian navigation: a user survey and evaluation. *International Journal of Mobile Human-Computer Interaction*, 3, 31-49.
- Oxley, J., Fildes, B., Ihsen, E., Charlton, J., & Day, R. (1997). Differences in traffic judgments between young and old adults pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, 29, 839-847.
- Oxley, J., Fildes, B., Ihsen, E., Charlton, J., & Day, R. (2005). Crossing roads safely: an experimental study of age differences in gap selection by pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 962-971.
- Panëels, S., Anastassova, M., Strachan, S., Van, S.P., Sivacoumarane, S. & Bolzmacher, C. (2013). *What's Around Me? Multi-Actuator Haptic Feedback on the Wrist*. In Proceedings of WorldHaptics 2013.
- Pielot, M., Poppinga, B., Heuten, W. & Boll, S. (2012) *Pocketnavigator: studying tactile navigation systems in-situ*. In Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12), pages 3131–3140. ACM, 2012.
- Poppinga, B., Heuten, W. & Boll, S. (2014). NavMem explorer: an orientation aid for people with mild cognitive impairments. In Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth '14), pages 178-181, ICST, 2014.
- Radoczky, V. (2007). *How to design a pedestrian navigation system for indoor and outdoor environments*. In Proceedings of Location Based Services and TeleCartography 2007: 301-316
- Raz, N., Gunning-Dixon, F., Head, D., Rodrigue, K.M., Williamson, A. & Acker, J.D. (2004). Aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry of the cerebral cortex: replicability of regional differences in volume. *Neurobiology of Aging*, 25, 377–396.
- Risser, R., Haindl, G. & Ståhl, A. (2010). Barriers to senior citizens' mobility in Europe. *European Journal of Ageing*, 7 (2), 69–80.
- Robertson, S. (2001). Requirements trawling : techniques for discovering requirements. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 405-421.
- Roenker, D.L., Cissel G.M., Ball, K.K., Wadley, V.G., & Edwards J.D. (2003). Speed-of-processing and driving simulator training result in improved driving performance. *Human Factors*, 45 (2), 218-233.
- Romoser M, & Fisher D (2009). The effect of active versus passive training strategies on improving older drivers' scanning in intersections. *Human Factors*, 51 (5), 652-668.
- Rosenkvist, J., Risser, R., Iwarsson, S., Wendel, K., & Ståhl, A. (2009). The challenge of using public transport: descriptions by people with cognitive functional limitations. *Journal of Transport and Land Use*, 2 (1), 65–80.
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in desk-top virtual environments: experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology*, 3, 143–159.
- Schroder, C.J., Mackaness, W.A. & Gittings, B.M. (2011). Giving the 'right' route directions: the requirements for pedestrian navigation systems. *Transactions in GIS*, 15, 419–438.
- Schubert, T. & Crusius, J. (2002). *Five theses on the book problem: Presence in books, film and VR*. Proceedings of the Fifth Annual Inter-national Workshop on Presence, pages 53–58, Porto, Portugal.

- Shackel, B. (1991). Usability - context, framework, design and evaluation. In B. Shackel & S. Richardson (Eds.), *Human factors for informatics usability* (pp. 21-38). Cambridge : Cambridge University Press
- Sheridan, T.B. (1992) Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environment, 1*, 120–126.
- Sjölander, M., Hook, K., Nilsson, L. G., & Andersson, G. (2005). Age differences and the acquisition of spatial knowledge in a three-dimensional environment: Evaluating the use of an overview map as a navigation limitations. *International Journal of Human-Computer Studies, 63*(6), 537-564.
- Sperandio, J.-C. (2001). *Critères ergonomiques de l'assistance technologiques aux opérateurs*. Communication présentée à JIM'2001 : Interaction Homme – Machine & Assistance, Metz, France, juillet.
- Strayer, D. L., & Drews, F. A. (2004). Profiles in driver distraction: Effects of cell phone conversations on younger and older drivers. *Human Factors, 46*, 640–649.
- Suhr, V.W., Lauer, A.R., & Allgaier, E. (1958). Judgment of speed on the high way and on the autotrainer, *Traffic Safety Research Review, 12*, 27-31.
- Szymczak, D., assmus-Gröhn, K., Magnusson, C. & Hedvall, P.-O. (2012). *A real-world study of an audio-tactile tourist guide*. In Proceedings of the 14th International conference on Human-computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '12).
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (1989). *Using multivariate statistics* (2nd ed.). New York: Harper Collins.
- Thomson J.A., Tolmie A.K., Foot, H.C., Sarvary P., Whelan K.M., & Morrison, S. (2005). Influence of virtual reality training on the roadside crossing judgments of child pedestrians. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 11*, 175-186.
- Thurrell, A.E.I., Pelah, A., & Distler, H.K. (1998). The influence of non-visual signals of walking on the perceived speed of optic flow. *Perception, 27*, 147.
- Tricot, A. (2007). *Apprentissages et documents électroniques*. Paris: Belin.
- Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences, 39*(2), 273–315.
- Tscheligi, M. & Sefelin, R. (2006). Mobile navigation Support for pedestrians: can it work and does it pay off? *Interactions, 13*, 31-33.
- Van Schaik, P. (1999). Involving users in the specification of functionality using scenarios and model-based evaluation. *Behaviour & Information Technology, 18*, 455 –466.
- Veldkamp, D., Hagehorn, F., Kröse, B. & de Greef, P. (2008). The use of visual landmarks in a wayfinding system for elderly with beginning dementia. In Proceedings of Med-e-Tel 2008: International Educational and Networking Forum for eHealth, Telemedicine and Health ICT, Luxembourg, 161 – 165.
- Völkel, T.; Kühn, R. & Weber, G. (2008). *Mobility impaired pedestrians are not cars: requirements for the annotation of geographical data*. In: K. Miesenberger et al. (Eds.): Proceedings of the International Conference on Computers Helping People With Special Needs (ICCHP'08), LNCS 5105, 1085-1092.
- Witmer, B.G. & Singer. M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments, 7*, 225-240.
- Witmer, B.J., Jerome, C.J., & Singer, M.J. (2005). The factor structure of the Presence Questionnaire. *Presence, 14*, 298-312.

Wretstrand, A., Svensson, H., Fristedt, S., & Falkmer, T.(2009). Older people and local public transit: mobility effects of accessibility improvements in Sweden. *Journal of Transport and Land Use*, 2 (2), 49-65.