

Wegoto: une application Smartphone pour évaluer l'accessibilité de la voirie et des espaces publics aux personnes à mobilité réduite - Etude de preuve de concept

Quentin Mourcou

Univ. Grenoble-Alpes, FRE
3405 Laboratoire AGIM,
CNRS-UJF-UPMF-EPHE,
38706 La Tronche, France
Univ. Lille Nord de France, F-
59000 Lille
EMDouai, IA, F-59500 Douai,
France
quentin.mourcou@agim.eu

Anthony Fleury

Univ. Lille Nord de France, F-
59000 Lille
EMDouai, IA, F-59500 Douai,
France
anthony.fleury@mines-douai.fr

Céline Franco

Univ. Grenoble-Alpes, FRE
3405 Laboratoire AGIM,
CNRS-UJF-UPMF-EPHE,
38706 La Tronche
UJF-Grenoble1/CNRS/TIMC-
IMAG UMR5525, 38041
Grenoble
IDS, 2 av. des Puits, 71300
Montceau-les-Mines, France
celine.franco@imag.fr

Nicolas Vuillerme

Univ. Grenoble-Alpes, FRE
3405 Laboratoire AGIM,
CNRS-UJF-UPMF-EPHE,
38706 La Tronche, France
Institut Universitaire de France
nicolas.vuillerme@agim.eu

Résumé— Cet article propose une approche fondée sur l'utilisation d'une application Smartphone pour évaluer et améliorer l'accessibilité de la voirie et des espaces publics aux personnes à mobilité réduite. Cette application Smartphone dédiée, « Wegoto », enregistre les mesures de plusieurs capteurs complémentaires (accélération linéaire, vitesse angulaire, orientation, position GPS) et permet la désignation de points d'alertes. Par la suite, ces mesures sont interprétées et transformées en indice prenant en compte le profil de l'utilisateur. Ces mesures sont répertoriées dans des cartes intégrées dans un système d'information géographique qui peut, par la suite, calculer l'itinéraire le plus accessible pour les utilisateurs. Une étude de cas a été conduite auprès de deux utilisateurs de fauteuil roulant manuel (respectivement paraplégique et tétraplégique) afin d'évaluer la faisabilité de notre approche. Bien que préliminaires, nos résultats suggèrent que le calcul d'indice personnalisé fonctionne pour ces deux profils. Nos résultats démontrent également l'importance de la prise en compte des différences inter-profils pour l'élaboration de trajets personnalisés. Ainsi, le système Wegoto pourrait être utilisé comme un système d'assistance à la navigation innovant pour personnes en fauteuil roulant et, plus généralement, pour les personnes à mobilité réduite et contribuer ainsi à améliorer leur autonomie et leur qualité de vie.

Mots clés— Accessibilité, Fauteuil roulant, Smartphone, Unités de mesure de mouvement inertielles, Handicap, Personnes à mobilité réduite

I. INTRODUCTION

Être en mesure de se déplacer de manière autonome et sécurisée au travail, à l'école, pouvoir faire du shopping ou rendre visite à ses amis ou à sa famille est essentiel pour notre bien-être et notre vie sociale. La perte de mobilité et d'autonomie pour une personne accroît son isolement, son anxiété et peut mener jusqu'à la dépression [1]. Pour les

personnes à mobilité réduite, par exemple, l'accessibilité de la voirie et des espaces publics est de première importance. Dans de nombreux pays, dont la France et les Etats-Unis, l'accessibilité d'un lieu pour les personnes à mobilité réduite doit être prise en compte lors de la construction ou la rénovation d'un bâtiment ou d'une voirie. Cependant, le chantier de l'accessibilité est un travail de longue haleine nécessitant l'implication d'un grand nombre d'acteurs : décideurs, urbanistes, mais aussi (et surtout) usagers. Dans le but d'indiquer l'itinéraire le plus adapté à une personne en fonction des capacités et des contraintes qui lui sont propres, il faut pouvoir, objectivement et quantitativement, évaluer l'accessibilité d'un lieu. De telles méthodes d'évaluation ont fait l'objet de plusieurs études [2-4]. Ces études ne sont pas toujours fondées sur des procédures homogènes et comparables. Church est le premier à suggérer que la mesure d'accessibilité doit tenir compte à la fois de l'accessibilité « absolue » (technique) et de l'accessibilité « relative » (perception utilisateur, temps de trajet) pour obtenir une mesure fiable [2]. La mesure technique s'effectue par comparaison aux standards des différentes lois, tandis que la mesure relative s'appuie sur des techniques d'évaluation de perception de l'utilisateur dans le but, par exemple, de pondérer la criticité d'une difficulté [4]. Cependant, cette méthode vise à obtenir un indice unique d'accessibilité qui ne tient pas compte du profil particulier de la personne en attente d'une réponse personnalisée au regard de ses capacités.

Par ailleurs, au cours des deux dernières décennies, les progrès dans la miniaturisation des capteurs et des technologies sans fil ont permis le développement de systèmes de suivi actimétrique par le biais de centrales inertielles [5]. Le développement de ces unités de mesure de mouvement inertielles (IMU) est tel qu'elles sont aujourd'hui embarquées dans de nombreux objets du quotidien tels que les Smartphones. Les Smartphones sont désormais utilisés par les

personnes dans le cadre d'auto-mesure (mouvement du « quantified-self »), mais aussi dans le cadre de recherches visant à l'évaluation et la rééducation des capacités de contrôle de la posture [6,7] et de la marche [8,9] ou des tests cliniques plus spécifiques telles que le Timed Up & Go [10]. L'objectif de notre travail est de mettre au point un système de relevé de l'accessibilité de la voirie permettant d'obtenir toutes les informations nécessaires pour proposer des parcours personnalisés en fonction des capacités intrinsèques de son utilisateur. Cet article présente le système de relevé « Wegoto » fondé sur l'utilisation de cet outil du quotidien, désormais disponible par le plus grand nombre, qu'est le Smartphone.

L'organisation de l'article est la suivante. La section II décrit les différentes situations de handicap intégrées par l'outil pour notre étude. La section III présente l'architecture et le fonctionnement du système « Wegoto ». La section IV illustre, à travers une étude de cas conduite sur deux personnes à mobilité réduite utilisatrices de fauteuil roulant manuel, la faisabilité de la méthode en conditions réelles. Les résultats obtenus sont discutés dans la section V.

II. CATÉGORIES D'UTILISATEURS ET SPECIFICITÉS

Chacun d'entre nous possède ses propres capacités de cheminement et de franchissement d'obstacles. Pour une personne à mobilité réduite, par exemple en fauteuil roulant, cela peut être sa capacité à franchir une hauteur de marche. Certaines personnes seront capables de franchir une différence de niveau de 2 cm quand d'autres pourront en franchir 6 cm ou, inversement, seulement 1 cm. Nous présentons dans cette partie (i) les profils génériques d'utilisateurs de fauteuils roulants, puis (ii) le profil d'un « expert de l'urbanisme » dont l'une des missions renvoie au diagnostic et à l'amélioration de l'accessibilité de la voirie.

A. Le profil utilisateur de fauteuil roulant

Chaque utilisateur de fauteuil roulant possède un « profil » qui lui est spécifique en fonction entre autre (i) de sa pathologie, (ii) des caractéristiques de son fauteuil roulant (électrique ou manuel, rendement mécanique, ...), (iii) de l'usage de son fauteuil (style de propulsion, niveau d'expertise) [11]. En tenant compte de l'ensemble de ces paramètres, nous souhaitons créer un indice fiable, valide, utile et utilisable par le plus grand nombre d'utilisateurs de fauteuils roulants. C'est pourquoi nous distinguons, de prime abord, les fauteuils roulants électriques des fauteuils roulants manuels. Ces derniers relèvent ensuite de deux sous-catégories que sont les fauteuils « confort » (e.g., NETTI 4 U FA de Eureka médical, ACTION 3 NG CONFORT de Invacare), d'une part, et les fauteuils « actifs » (e.g., EXELLE de Progeo, EASY MAX de Sunrise Medical), d'autre part. Le coût énergétique et la dépense relative d'énergie de la propulsion sont calculés à partir de la mesure directe de la consommation d'oxygène [12]. A titre indicatif, la dépense énergétique d'un fauteuil roulant à propulsion manuelle, sur un sol lisse et régulier, sans aucune entrave, est d'environ 210 J/m [12], ce qui est proche de la marche dont la valeur est comprise entre 150 et 220 J/m [13]. Toutefois, lorsque les contraintes environnementales telles que la pente, l'irrégularité des sols ou

les obstacles augmentent, le coût énergétique augmente de manière importante et dépasse celui de la marche. Afin de réduire l'effort à son minimum et de prévenir les troubles musculo-squelettiques ou blessures liés à l'usage du fauteuil roulant manuel, notre objectif est d'offrir les parcours les plus accessibles aux utilisateurs en fonction de leur profil, et ce, en créant un indice d'accessibilité qui leur est propre. Chesnay et Axelson ont développé une première méthode permettant de mesurer l'effort développé par une personne se déplaçant sur différents types de surface sur une courte distance [14]. Ils proposent une première technique de calcul d'indice sur longue distance en utilisant cette mesure d'effort comme référence. Par la suite, Kockelman et al. ont identifié, dans leur revue, les facteurs qui influent sur la perception de confort lors d'un déplacement sur un trottoir pour les personnes en fauteuil roulant, et plus particulièrement l'influence du degré des pentes et dévers (pente transversale) [15,16]. Ces facteurs sont : la longueur des trottoirs (en fonction de la pente), la proportion de route dépassant le seuil des 2% de pente transversale, le volume de trafic automobile adjacent à la route, l'état de la pente, la largeur ainsi que le revêtement du trottoir, la météo et enfin l'ensemble des aménagements spécifiques à l'accessibilité (e.g. bateaux de trottoirs, passage piéton). Ferreira et Sanches ont pour leur part utilisé une évaluation technique de la conception de l'infrastructure des trottoirs et des passages piétons, pondérée en fonction de l'importance relative de chacun des attributs de la voirie du point de vue des utilisateurs de fauteuil roulant pour créer également un indice d'accessibilité [4]. Le point de vue de l'utilisateur représente une perception de la difficulté qui a permis aux auteurs de valider leur indice. Dans le cadre d'un relevé d'accessibilité « Wegoto », les indicateurs pris en compte pour quantifier de manière objective et automatique l'accessibilité sont les suivants : le degré de pente et de dévers, le revêtement, les trous ou fentes au niveau du sol, la hauteur du trottoir, la présence d'escaliers, l'éclairage, les obstacles présents sur la voirie, ainsi que deux facteurs de pondération originaux que sont la résistance au roulement et la technicité/manipulation.

B. Le profil « expert en urbanisme »

Le profil « expert en urbanisme » a trait à toute personne dont le travail a un rapport avec l'accessibilité de la voirie. Cette personne peut être chargée des travaux publics ou encore élue politique. A ce jour, ces experts ne disposent d'aucun outil portable capable d'évaluer objectivement et quantitativement l'accessibilité de la voirie en fonction des différents profils de personnes à mobilité réduite. La prise en compte des besoins et des attentes de ces personnes s'inscrivant dans une démarche plus globale est aussi de première importance. L'application de relevé « Wegoto » devrait ainsi permettre d'effectuer des relevés d'accessibilité pour l'ensemble des profils pour la plupart des facteurs de pondération.

Dans le but de calculer l'indice d'accessibilité, un outil de mesure capable de relever des données propres au déplacement de chaque type de profil de personnes à mobilité réduite a alors été élaboré. Ces données seront par la suite utilisées pour fournir un service de guidage propre à chaque

profil et proposer le parcours le plus approprié au profil de l'utilisateur.

III. LE SYSTÈME DE RELEVÉ WEGOTO

Le système de relevé de parcours « Wegoto » est développé sous la forme d'une application Smartphone. Ce choix est justifié par le fait que ce dispositif est de petite taille, léger, communicant et qu'il est devenu un outil de notre quotidien disponible pour le plus grand nombre (accessibilité tarifaire). L'application permet d'enregistrer, en temps réel, la position GPS de l'utilisateur, sa direction, son accélération/décélération, sa vitesse instantanée et le cas échéant, les inclinaisons de son fauteuil dans les plans frontal et sagittal. De plus, le système permet l'identification et la spécification de différents points d'alertes, tels qu'un obstacle (caractérisé en catégorie), une bande d'éveil à la vigilance, un commentaire, et ce, dans différents formats (photo, audio et texte). Le GPS utilisé peut être celui du Smartphone ou, le cas échéant, un GPS de précision (SX Blue II) pouvant s'interfacer *via* une liaison sans fil Bluetooth. Dans les développements futurs, nous prévoyons d'utiliser le principe de map-matching afin d'améliorer la précision de nos relevés de position GPS [17]. Ces relevés sont ensuite utilisés pour calculer automatiquement un indice d'accessibilité pour une partie ciblée de la route. L'interprétation de cet indice nous permet d'éditer des cartes spécifiques à partir du service de cartographie libre OpenStreetMap fondé en 2004. Notre objectif est d'offrir, à terme, *via* une application Smartphone dédiée, une aide à la navigation pour les personnes à mobilité réduite, ainsi qu'un soutien pour la santé et le bien-être (détection de chute [18], appel d'assistance). Les cartes sont incluses dans un Système d'Information Géographique (SIG) qui permet de déterminer l'itinéraire le plus accessible en tenant compte du profil de l'utilisateur. Tous ces logiciels utilisent des géodonnées et des standards ouverts afin de ne pas entraver la libre distribution des données dont la communauté a besoin. Dans la suite de cette section, nous décrivons successivement (A) le matériel utilisé pour le système d'enregistrement, (B) l'algorithme de fusion de données et (C) le traitement des données.

A. Matériel

L'unité inertielle de relevé de mouvements utilisée est le Galaxy Nexus (Samsung, Seoul, South Korea). Il est équipé des trois capteurs tri-axes suivants :

- un gyroscope (InvenSense MPU-3050) mesurant la vitesse angulaire;
- un accéléromètre (Bosch BMA220) mesurant l'accélération linéaire;
- un magnétomètre mesurant le champ magnétique ambiant.

De plus, le Smartphone possède une fonction GPS (utilisant un module GPS SiRF SiRFstarIV GSD4t et le réseau GSM) pour le positionnement géographique, une caméra et un microphone qui peuvent être facilement utilisés pour les relevés d'obstacles et la création de points d'alertes.

B. Algorithme de fusion des données

La stabilité des mesures effectuées est permise par l'utilisation d'un algorithme de fusion des données issues des différents capteurs (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre) basé sur un filtre de Kalman. L'exploitation de la redondance d'informations permet de corriger les biais propres aux différents types de capteurs, tels que les bruits de mesure, les dérives d'intégration, la latence des réponses... Les angles ainsi obtenus sont ensuite utilisés pour déterminer les mouvements de l'utilisateur.

C. Traitement des données

Toutes les données recueillies (Fig. 1, étape 1) sont dans un premier temps enregistrées dans la mémoire interne du Smartphone, puis, dans un second temps, extraites et interprétées par l'utilisateur qui a effectué le relevé et par un logiciel de traitement automatique des données sur un serveur sécurisé dédié aux données de santé. Ainsi, le traitement automatique propose sa propre interprétation de la route qui pourra être vérifiée et validée par l'instigateur du relevé.

Une classification hiérarchique des mouvements a ensuite été construite (Fig. 1, étape 2) tenant compte de ces différents profils. Le but est de classer les activités des utilisateurs à l'aide des signaux de capteurs inertiels et GPS intégrés dans le Smartphone, afin d'identifier le meilleur indice d'accessibilité d'une partie de l'itinéraire. Le premier niveau hiérarchique est utilisé pour déterminer s'il y a un mouvement. Le second niveau contient trois catégories de mouvements - (1) la chute, (2) la propulsion et (3) le changement de direction - pouvant conduire à des activités de réaction (alarme, tournant). Enfin, lorsque l'activité est caractérisée, les trois dernières catégories (vert, orange, rouge) représentent le niveau de l'indice qui peut être choisi lors du traitement des signaux (Fig. 1, étape 3). Un algorithme a été développé pour chaque nœud de décision. Il existe également un traitement de données effectuable en temps réel en utilisant le modèle pour détecter une chute et déclencher une alarme afin d'assurer la sécurité de l'utilisateur qui réalise le relevé. Les données permettant de calculer l'indice d'accessibilité sont ensuite traitées a posteriori du relevé. Deux des paramètres spécifiques qui permettent d'orienter le niveau d'accessibilité (Fig. 1, étape 2) pour les personnes utilisant un fauteuil roulant sont (i) la résistance au roulement et (ii) la technicité/manipulation.

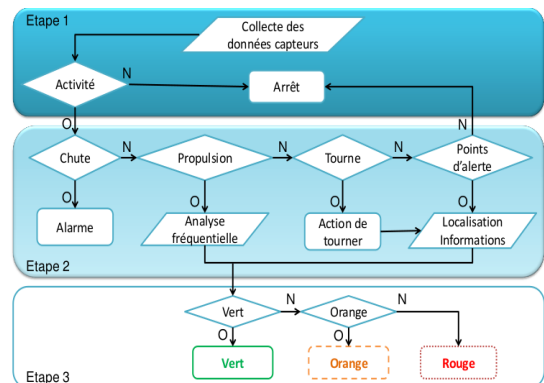


Fig. 1. Organigramme du processus de classification. Étape 1: Collecte des données ; étape 2: Analyse des données ; étape 3: Extraction de l'indice.

Ces paramètres ne peuvent être obtenus que par le relevé d'une personne en situation de handicap moteur. Cela nous permet, en outre, d'affiner l'indice au plus proche de la réalité en comparaison d'un relevé fait par une personne experte de l'urbanisme. Pour le relevé, la démarche optimale serait donc d'effectuer un relevé par un expert de l'urbanisme, qui serait comparé de manière automatique au relevé de la personne utilisant un fauteuil roulant, ou de croiser les données d'accessibilité des services déjà existantes pour ensuite proposer amélioration du relevé de cartographie par l'utilisateur au profil spécifique.

La résistance au roulement du fauteuil roulant, qui représente la force opposée au mouvement quand un corps (comme une balle, un pneu, ou une roue) roule sur une surface, est quantifiée par l'analyse des signaux d'accélération/décélération du fauteuil. Pour ce faire, nous utilisons un processus en trois étapes. Nous commençons tout d'abord par sélectionner la plage de temps à observer en fonction de l'activité. Pour cela, nous avons choisi de différencier les activités en effectuant une analyse de fréquence des pics de signaux accélérométriques (Fig. 1, étape 2). Une forte augmentation de la fréquence de ces pics est considérée comme représentative d'une partie de parcours simple, contrairement à une partie difficile où les cycles indiquant l'action de poussée de la personne sont plus longs. Après cette répartition, l'écart type et l'énergie moyenne sont déterminés selon [17]. L'énergie pour l'axe des y (axe antéropostérieur dans le sens de la poussée), notée E_y , est donnée par l'équation suivante :

$$E_y = \frac{\sum_{j=1}^N |f_y(j)|^2}{N} \quad (1)$$

où f_y est la transformée de Fourier du signal considéré et N le nombre d'échantillons. Elle nous permet de détecter 3 types de périodes: (i) ne contenant aucun mouvement, (ii) mouvement avec un rythme normal et (iii) mouvement avec un rythme soutenu (demandant plus d'effort). Il a été montré que l'utilisation de la moyenne, de l'écart type et de l'énergie d'accélération permet d'aboutir à la distinction entre les activités dynamiques [19]. L'écart type du signal d'accélération a été utilisé pour quantifier la variabilité due aux différentes activités exercées. Cependant, ce qui est le plus important, c'est l'observation de la périodicité qui se reflète dans le domaine des fréquences selon la valeur de l'énergie [19].

En ce qui concerne la technicité/manipulation, c'est la prise en compte des changements de positionnement, pour franchir un obstacle, combiné avec les mesures d'inclinaison, qui nous permet d'orienter le niveau de difficulté. Enfin, ces différentes observations sont combinées et mises en regard des valeurs de bonnes pratiques, pour définir la difficulté et donc l'indice final de la portion de parcours. Par exemple, un trottoir avec une pente transversale de moins de 2% est recommandé [20], ce qui sera pris en compte dans notre algorithme de décision d'indice. Si cette valeur dépasse 6%, et ce, quelque soit le résultat des autres observations, la portion de parcours est jugée comme « difficile d'accès » pour l'ensemble des profils prédéfinis. Cela donne finalement lieu à la construction d'un

arbre de décision en fonction des différentes observations des signaux et indications caractérisant une situation identifiée.

IV. ETUDE DE CAS

Dans cette section, nous présentons une étude de cas visant à évaluer l'utilisation d'une application Smartphone pour mesurer et améliorer l'accessibilité de la voirie et des espaces publics. Deux personnes utilisatrices de fauteuil roulant manuel ont volontairement participé à cette étude.

Notre premier volontaire est un homme paraplégique (âge: 30, taille: 160 cm, poids: 60 kg, niveau lésionnel: scoliose de naissance). Il utilise son fauteuil roulant manuel quotidiennement depuis 20 ans. Son style de propulsion est le « *semi-circulaire* » [1].

Notre second volontaire est un homme tétraplégique (âge : 34, taille : 183 cm, poids : 70 kg, lésion : C5/C6 partielle). Il utilise pour ses déplacements quotidiens un fauteuil roulant manuel. Son style de propulsion est également le « *semi-circulaire* » [1] mais il possède des difficultés de préhension pour la main courante.

Ces deux personnes ont donné leurs consentements écrits à la procédure expérimentale, qui a reçu un avis favorable de la part du Comité d'Éthique pour les Recherches Non Interventionnelles (CERNI 2014-04-21-44) après que la nature de l'étude lui ait été clairement exposée.

Le Smartphone utilisé pour le relevé a été positionné horizontalement sur l'assise du fauteuil, la face de l'écran vers le haut et pointant vers l'avant (Fig. 2). La consigne de trajet était de se rendre d'un point A (arrêt de tramway face au Service Accueil Handicap de l'Université de Grenoble) à un point B (centre de vente de matériel médical) en passant par un point C (Centre de Santé Michel Zorman de l'Université de Grenoble), tous trois connus des usagers, en utilisant le chemin habituel. Le test a été réalisé l'après-midi par temps de pluie. La route ainsi empruntée (Fig. 3) présente dans sa première partie sélectionnée (1) un sol goudronné régulier et une légère pente descendante. Cette partie a été qualifiée « verte » après analyse (Tableau 1). La rupture d'indice avec la partie suivante (2) est le point d'alerte signalé par les deux usagers correspondant à une traversée de rails de tramway. Cette traversée est suivie d'une zone avec dévers non négligeable (7%), mais aussi de nombreuses surélévations de la route provoquée par les racines des arbres. Les cycles de poussée sur cette partie sont plus longs et moins fréquents (Fig. 4). Ainsi, les deux volontaires déploient plus de force sur cette portion de parcours. Cela est également confirmé par l'analyse dans le domaine fréquentiel en utilisant le calcul de l'énergie pour l'utilisateur tétraplégique.



Fig. 2. Emplacement du Smartphone et axe de mesure.

L'usager paraplégique, du fait de sa bonne condition physique, n'a pas rencontré ce même niveau de difficulté. Ceci maintient donc l'indice en orange, pour l'usager tétraplégique, jusqu'à la jonction avec un trottoir d'une surface qui semble plus propice au roulement. Dans la partie (7), la traversée a été signalée comme difficile par le second volontaire à cause d'un bateau non-conforme. En revanche, ce bateau n'a pas posé de problème au volontaire paraplégique puisque qu'il est capable de descendre et monter des trottoirs d'une certaine hauteur, contrairement au volontaire tétraplégique ou aux utilisateurs de fauteuils roulants électriques. A partir de la partie (9), les deux volontaires n'ont pas emprunté le même chemin. La personne paraplégique a choisi de poursuivre son parcours, tandis que la personne tétraplégique a pris un virage sur sa gauche. Ainsi, le reste du parcours de la personne tétraplégique s'est déroulé sans encombre, au contraire de l'utilisateur paraplégique. Après expérimentation, il s'est avéré que la personne paraplégique ne connaissait pas le chemin emprunté. La suite de son parcours s'est d'ailleurs dégradée, notamment au niveau du revêtement du sol. Celui-ci est devenu moins lisse et plus résistant à l'avancement de son fauteuil, ce qui a été constaté sur les signaux accélérométriques. Une première difficulté a été rencontrée en partie (12) à cause d'un obstacle constitué par un bateau non conforme. En partie (13), l'usager a signalé un poteau situé en plein milieu du trottoir et empêchant le passage d'un fauteuil roulant. Il a ainsi été obligé de traverser par un passage piéton, par ailleurs conforme aux normes. Le revêtement du sol du trottoir sur lequel s'est ensuite retrouvé notre usager est devenu encore plus irrégulier. Le plus problématique fut surtout le fait que la continuité de ce passage n'était pas assurée par un bateau et que l'usager a dû descendre d'un trottoir d'une hauteur de 12 cm. Cela est visible *via* les signaux accélérométriques (non cyclique), constat d'une zone « technique ». L'usager paraplégique a ensuite poursuivi son chemin sur le bord de la route signalée comme « passante ». Il a ensuite traversé pour atteindre le prochain trottoir de son trajet en franchissant une hauteur de 6 cm. Toute cette portion a été classée rouge. La partie (14) lui a finalement permis d'atteindre sa destination. Ce sont les différentes mesures d'orientation, de pente et d'accélération/décélération qui ont permis la segmentation des portions. L'analyse des signaux de chacune des portions a ensuite permis de déterminer l'indice d'accessibilité propre à chacun des deux usagers. Les deux chemins empruntés par les deux usagers permettent d'obtenir un relevé de la zone d'arrivée plus étendu. Les résultats ont été présentés a posteriori aux deux usagers. Ceux-ci sont d'accord avec l'interprétation. L'usager tétraplégique nous a par ailleurs confirmé qu'il n'aurait pas pu franchir les obstacles de la partie (13).

TABLE I. DESCRIPTION DES CHOIX D'INDICES

Zones	Informations sur le niveau de l'indice	
	Usager paraplégique	Usager tétraplégique
1	Sol goudronné régulier, pente légèrement descendante (5%) ■	
2	Dévers (7%), 1 obstacle répertorié (rails de tramway) ■ ■ ■	
	Différence d'énergie : 0,10	Différence d'énergie : 0,41
3	Sol goudronné, trottoir récent, absence de dévers ou de pente significative ■	
4		
5	Dévers (environ 26%), sol en dalles irrégulières, un obstacle répertorié (rails de tramway) ■ ■ ■	
6	Sol goudronné, trottoir récent, absence de dévers ou pente significatif	
7	Pas de difficulté de traversée ■	Hauteur de bateau gênante à l'approche de la traversée ■ ■ ■
8	Route goudronnée, pente descendante (8-16%) ■	
9	Poursuite de la route 8 ■	Dévers (13%), pente descendante (15%) ■ ■ ■
10	-	Route goudronnée, pente descendante (12%) ■
11	Poursuite de la route 9 ■	-
12	Bateau non conforme, revêtement irrégulier ■ ■ ■	
13	Hauteur de trottoir (12 cm), traversée dangereuse (circulation, absence de bateau) ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	
14	Sol goudronné régulier ■	

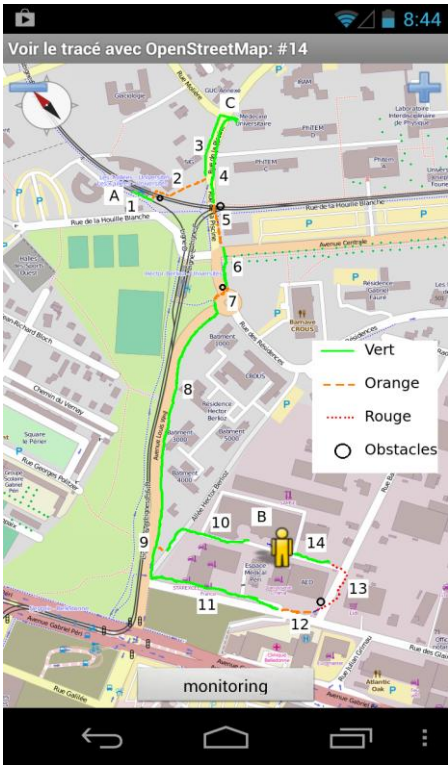


Fig. 3. Capture d'écran de la cartographie du trajet allant de A à B en passant par C avec découpage des parties de parcours de 1 à 14 pour les deux volontaires utilisateurs de fauteuil roulant manuel.

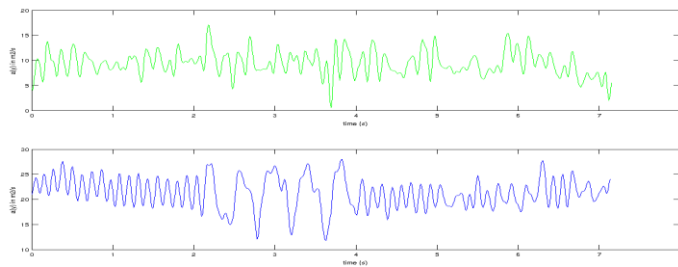


Fig. 4. Signaux accélérométriques (usager paraplégique en haut, tétraplégique en bas) selon l'axe antéropostérieur filtrés passe-bas, en m^2/s en fonction du temps. Ces signaux ont été acquis sur la portion de route (2) sur une distance 86 mètres.

V. DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans cet article, nous décrivons la possibilité d'indexer l'accessibilité des portions de route à l'aide de l'application Smartphone dédiée « Wegoto ». Les résultats de cette étude de cas confirment l'intérêt de notre approche pour déterminer de manière quantitative les indices d'accessibilité en combinant à la fois notre organigramme de processus de décision et l'algorithme de traitement de données. L'analyse de ce parcours a également permis de mettre en évidence l'importance des différences inter-profil qui doivent absolument être considérées pour l'élaboration d'un indice au plus proche des caractéristiques des usagers. Toutefois, la prise en compte des points d'alerte n'a pas encore été intégrée dans l'automatisation du calcul de notre indice. De plus, Holone et al. ont étudié la possibilité d'un feedback des indices de portion de route *via* un outil collaboratif [22]. Ils ont observé que les indices sur les segments de route ne font pas l'objet d'une collaboration explicite, à l'inverse de la dénonciation d'obstacles qui quant à elle est plébiscitée. Nos relevés avec les usagers vont dans ce sens, de même que les retours d'experts en urbanisme qui souhaiteraient une mise à jour régulière et rapide de la cartographie. C'est pourquoi nous pensons que nos relevés doivent être constamment enrichis par une collaboration de type crowdsourcing *via* une application transmise aux utilisateurs finaux, telle que l'application de guidage. Dès lors, les travaux à venir consisteront à classer ces obstacles afin d'être en mesure de les considérer dans la planification de l'itinéraire. De même que Ren et Karimi [17], nous avons également utilisé les données des capteurs pour identifier et classer les mouvements du fauteuil roulant. Nous avons ajouté à cela la prise en compte des données d'inclinaisons (frontale et sagittale), d'obstacles et les aménagements d'accessibilité. Pour confirmer les résultats préliminaires fournis par cette étude de cas et dans le but d'améliorer notre classification, une étude impliquant un plus grand nombre d'utilisateurs de fauteuils roulants manuels et électriques et des experts en urbanisme est en cours. Enfin, nous tenons à mentionner que le système de relevé de parcours « Wegoto » n'est pas un équipement dédié et spécialisé, mais est entièrement intégré dans un Smartphone, ce qui correspond aux souhaits et aux attentes des utilisateurs de fauteuil roulant que nous avons interrogés pour les besoins d'une étude de conception participative préalablement conduite. Les données interprétées sont insérées dans un SIG qui permet aux utilisateurs de planifier leurs itinéraires de navigation sur Smartphone ou ordinateur, puis de suivre cet itinéraire à l'aide d'un guidage spécifique au profil de l'utilisateur.

REFERENCES

- [1] L.I. Lezzoni, E.P. McCarthy, R.B. Davis, et H. Siebens, "Mobility difficulties are not only a problem of old age", *J. Gen. Intern. Med.*, vol. 16, no 4, pp. 235-243, 2001.
- [2] R. Church, et J. Marston, "Measuring accessibility for people with a physical disability." *Geogr. Anal.* vol. 35, no 1, pp. 83-96, 2003.
- [3] J. Rimmer, B. Riley, E. Wang, et A. Rauworth, "Accessibility of health clubs for people with mobility and visual disabilities." *Am. J. Public. Health*, vol. 95, no 11, 2005.
- [4] S. Da Penha Sanches, et M.A. Ferreira. "Proposal of a sidewalk accessibility accessibility" *J. U. E. E.*, vol. 1, no 1, pp. 1-9, 2007.
- [5] G. Fenu, et G. Steri, "IMU based post-traumatic rehabilitation assessment," 3rd ISABEL, pp.1-5, 7-10 Nov. 2010.
- [6] C. Franco, A. Fleury, P.Y. Gumery, B. Diot, J. Demongeot, et N. Vuillerme, "iBalance-ABF: A Smartphone-Based Audio-Biofeedback Balance System," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 60:1, pp.211-5, 2013.
- [7] B.C. Lee, J. Kim, S. Chen, et K.H. Sienko, "Cell phone based balance trainer." *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 9, no 10, 2012.
- [8] H. Kashiwara, et al. "A real-time gait improvement tool using a smartphone." *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conf.*, ACM, pp. 243-243, 2013.
- [9] S. Nishiguchi, et al. "Reliability and validity of gait analysis by android-based smartphone." *Telemed. J. E-health.*, vol. 18, no 4, pp. 292-296, 2012.
- [10] S. Mellone, C. Tacconi, et L. Chiari. "Validity of a Smartphone-based instrumented Timed Up and Go." *Gait Posture*, vol. 36, no 1, pp. 163-165, 2012.
- [11] J.D. Tomlinson, "Managing manoeuvrability and rear stability of adjustable manual wheelchairs: an update", *Phys. Ther.*, vol. 80, no 9, pp. 904-911., 2000.
- [12] C. Bazzi-Grossin, J.P. Fouillot, P. Charpentier, B. Audic, "Coût énergétique et rendement mécanique du déplacement en fauteuil roulant en fonction du niveau neurologique et du terrain." *Le fauteuil roulant, Problèmes en médecine de rééducation*, no.32, pp. 161-167, 1997.
- [13] R.M. Glaser, M.N. Sawka, S.W. Wilde, B.K. Woodrow, et A.G. Suryaprasad, "Energy cost and cardiopulmonary responses for wheelchair locomotion and walking on tile and on carpet." *Spinal Cord*, vol. 19, no 4, pp. 220-226, 1981.
- [14] D.A. Chesney, et P.W. Axelson. "Preliminary test method for the determination of surface firmness [wheelchair propulsion]." *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 4, no 3, pp. 182-187, 1996.
- [15] K. Kockelman, Y. Zhao, L. Heard, D. Taylor, et B. Taylor, "The nature of ADA's sidewalk cross-slopes requirements: a review of the literature." *Transport. Res. Rec.* 1705, no 1705, pp. 53-60, 2000.
- [16] K. Kockelman, L. Heard, Y.J. Kweon, et T.W. Rioux, "Sidewalk cross-slope design: Analysis of accessibility for persons with disabilities." *Transportation Research Record: J. Transport. Res. Board* vol. 1818, no 1, pp. 108-118, 2002.
- [17] M. Ren, et H.A. Karimi, "Movement pattern recognition assisted map matching for pedestrian/wheelchair navigation", *J. Navigation*, no.65, pp.617-33, 2012.
- [18] F. Sposaro, et G. Tyson, "iFall: An android application for fall monitoring and response," *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol., no., pp.6119-22, 3-6 Sept. 2009
- [19] L. Bao, et S.S. Intille, "Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data" *Pervasive Computing*. Springer Berlin Heidelberg pp. 1-17, April 2004.
- [20] French National Law journal, JORF n°36 du 12 février 2005 page 2353 : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000809647&dateTexte=&categorieLien=id>
- [21] M.L. Boninger, A.L. Souza, R.A. Cooper, S.G. Fitzgerald, A.M. Fay, "Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion", *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, no.83, pp.718-23, 2002.
- [22] H. Holone, G. Misund, H. Tolsby, et S. Kristoffersen. "Aspects of personal navigation with collaborative user feedback." *Proc. NordiCHI*, pp.182-191, 2008.