



**HAL**  
open science

## **SAM-Guide : vers un premier Laser Run à destination de sportifs non-voyants**

Katerin Romeo-Pakker, Ennaji Abdellatif, Lecomte Christèle, Luo Wenqi, Graff Christian, Huet Sylvain, Denis Pellerin, Elise Faugloire, Mantel Bruno, Thomas Mathieu, et al.

### ► To cite this version:

Katerin Romeo-Pakker, Ennaji Abdellatif, Lecomte Christèle, Luo Wenqi, Graff Christian, et al.. SAM-Guide : vers un premier Laser Run à destination de sportifs non-voyants. 2026. <hal-05563750>

**HAL Id: hal-05563750**

**<https://hal.science/hal-05563750v1>**

Preprint submitted on 23 Mar 2026

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

# SAM-Guide : vers un premier Laser Run à destination de sportifs non-voyants

K. ROMEO, A. ENNAJI, C. LECOMTE, W. LUO

LITIS UR4108

Université de Rouen Normandie, Normandie-Univ  
Rouen, France

[Katerine.Romeo@univ-rouen.fr](mailto:Katerine.Romeo@univ-rouen.fr)

S. HUET, D. PELLERIN

GIPSA

CNRS, Université Grenoble Alpes  
Grenoble, France

[Sylvain.Huet@gipsa-lab.fr](mailto:Sylvain.Huet@gipsa-lab.fr)

C. GRAFF, C. FONS

LPNC

CNRS, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc  
Grenoble, France

[Christian.Graff@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:Christian.Graff@univ-grenoble-alpes.fr)

E. FAUGLOIRE, B. MANTEL, M. THOMAS

CERREV UR3918

Université de Caen Normandie, Normandie Univ  
Caen, France

[Elise.Faugloire@unicaen.fr](mailto:Elise.Faugloire@unicaen.fr)

F. ALOUGES<sup>a,b</sup>, S. FERRAND<sup>a</sup>, C. FRANQUEVILLE<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université Paris Saclay, Université Paris Cité, ENS Paris Saclay, CNRS, SSA, INSERM, Centre Borelli,  
F-91190, Gif-sur-Yvette, France

<sup>b</sup> Institut Universitaire de France

[falouges@ens-paris-saclay.fr](mailto:falouges@ens-paris-saclay.fr)

**Résumé**—Le projet ANR SAM-Guide vise à rendre le Laser Run praticable par des personnes aveugles et malvoyantes grâce à la combinaison multimodale de systèmes d'aide à la navigation et à l'atteinte de cible. Le dispositif fournit un retour auditif et/ou tactile en temps réel sur la position du corps et l'orientation du pistolet vers une cible virtuelle. Nous décrivons l'architecture du système et rapportons les premiers résultats obtenus auprès de participants avec ou sans capacité visuelle.

**Mots-clés** — *guidage multimodal ; perception ; navigation ; vision par ordinateur ; système embarqué ; biathlon ; cécathlon ; handicap visuel ; handisport.*

## I. INTRODUCTION

Les activités physiques de loisir offrent de formidables occasions de rencontre et de développement de compétences utilisables au quotidien. Cependant, en situation de handicap, visuel en particulier, elles nécessitent souvent l'aide de plusieurs personnes pour les pratiquer. Pour pallier ces difficultés, des dispositifs de *substitution* sensorielle visant à présenter des “*images*” via d'autres canaux perceptifs, ont été développés [1]. Si ces dispositifs n'ont pas tenu leur promesse initiale de remplacer intégralement un canal sensoriel manquant par un autre [1], de nombreux outils ont été développés pour permettre de réaliser des tâches spécifiques, comme prendre les transports en commun, connaître la couleur des vêtements ou lire un texte, dans une logique de *suppléance* perceptive.

Dans cet article, nous nous intéressons à une activité sportive particulière : le Laser Run. Composante du

pentathlon moderne, il s'agit d'une épreuve sportive alliant vitesse et précision qui consiste à enchaîner courses et tirs au pistolet laser. Nous présentons un aperçu des travaux réalisés au sein du projet SAM-Guide afin de mettre en place une activité de Laser Run handisport. Les jeux stimulent le développement de nombreuses technologies, particulièrement dans le handisport. Ils offrent un terrain d'expérimentation aux chercheurs et développeurs pour trouver des moyens de contourner le handicap, affichant pour seule ambition de permettre aux utilisateurs finaux en quête d'autonomie, de s'amuser ou de se dépasser. Ils facilitent également la socialisation.

SAM-Guide est un consortium, financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), qui réunit des chercheurs de cinq laboratoires spécialisés en sciences cognitives, en ergonomie, en informatique et en mathématiques. Tous ont étudié et développé des systèmes d'aide à la navigation ou à l'atteinte de cible sans la vue dans un environnement contrôlé. Ces systèmes sont actuellement combinés, afin d'être déployés dans des gymnases ou des stades, et de permettre de marcher ou de courir, de saisir un pistolet et de tirer sur une cible virtuelle sans la vue. La position du corps par rapport au circuit et la position du pistolet par rapport à la cible sont contrôlées de façon à fournir un retour d'information sonore et/ou tactile à l'athlète.

Dans cet article, nous décrivons la logique des différents dispositifs, leur combinaison, et présentons quelques résultats des premiers essais menés auprès de participants avec ou sans capacité visuelle.

## II. PISTOLET TIRANT DANS LE VIRTUEL

### A. Positionnement

Les dispositifs matériels dédiés au tir à l'aveugle guidé par le son, disponibles dans le commerce reposent sur une caméra infrarouge embarquée dans l'arme associée à des sources infrarouges positionnées sur la cible. En particulier, les produits [ECOAIMS](#) et [VIASS](#), homologués pour la pratique compétitive du tir handisport, présentent un coût et une protection propriétaire qui limite leur adaptabilité et leur reproductibilité. Nous développons un dispositif alternatif destiné à l'implémentation de jeux de tir sonifié à destination de personnes aveugles et malvoyants. Notre approche vise à fournir une plateforme matérielle et logicielle modulaire, permettant l'expérimentation de scénarios ludiques et pédagogiques variés (Fig. 1)



Fig. 1. Système de tir.

### B. Dispositif de type pistolet

Nos travaux sont appuyés sur les principes issus du rétrogaming, et plus particulièrement sur les technologies de pistolets optiques développées dans les projets [OpenFIRE](#), [Light Gun](#) et [Gun4IR](#). Contrairement aux dispositifs de rétrogaming classiques, dans lesquels la cible est affichée dynamiquement sur un écran, la cible proposée dans ce travail est fixe, non visuelle et entièrement physique, ce qui la rend compatible avec des usages hors écran et adaptés à des utilisateurs aveugles et malvoyants.

1) *L'arme.* Le pistolet lui-même est un modèle factice d'arme sur lequel est disposée une caméra infra-rouge DF-Robot, que l'on dirige vers une "cible" réelle constituée d'un support sur lequel est fixé un jeu de LEDs. La caméra capte l'image de cette configuration de LEDs, dont le centre ancre le cœur de la cible virtuelle. Sa position dans le champ de la caméra permet de déterminer la position de l'arme par rapport au centre de la cible virtuelle. Le pistolet interactif est basé sur un modèle [Picon-OG](#), dont le modèle 3D est librement accessible en ligne. Notre version intègre également un vibreur dans la crosse, un solénoïde simulant le recul de la culasse, un voyant LED RGB à l'arrière de la culasse, des interrupteurs associés à la gâchette et au système de rechargement et une carte microcontrôleur Arduino Pro Micro.

2) *Interfaçage.* L'Arduino Pro Micro est connecté à un ordinateur de contrôle via une liaison USB, assurant aussi l'alimentation électrique, sauf celle (optionnelle) du solénoïde

qui nécessite une alimentation externe de 12 V. Le microcontrôleur exécute un logiciel embarqué assurant l'interface entre les différents éléments matériels du pistolet et l'ordinateur de contrôle. La communication s'effectue via une liaison série utilisant un port COM virtuel sur USB. Dans ce cadre, l'Arduino transmet au PC de contrôle l'état de la gâchette, du système de rechargement et les coordonnées des quatre points infrarouges détectés par la caméra DF-Robot. En retour, il reçoit les commandes émises par le PC concernant le pilotage de la LED RGB, l'activation du vibreur et l'activation du solénoïde.

3) *Cible infrarouge.* La cible est constituée de quatre LED infrarouges de puissance nominale 3 W, émettant à une longueur d'onde de 940 nm avec un angle d'ouverture de 120°. Leur configuration géométrique forme un triangle isocèle de base 400 mm et de hauteur 300 mm, complété par une LED centrale qui matérialise le centre de la cible.

4) *Ordinateur et logiciels de contrôle.* Un ordinateur dédié assure le contrôle global du dispositif et exécute deux types de logiciels, le logiciel de contrôle, et le logiciel de synthèse sonore. Le logiciel de contrôle est développé en langage C++. Il gère le scénario de jeu, calcule les coordonnées du point d'intersection entre l'axe optique de la caméra et le plan défini par le triangle formé par la cible, exprime ce point dans le référentiel de la cible pour déterminer l'écart par rapport au centre (ainsi que les composantes horizontale et verticale de cet écart), et transmet via le protocole OSC (Open Sound Control) les informations relatives au scénario de jeu et les grandeurs géométriques au logiciel de synthèse sonore. Le logiciel de synthèse sonore est chargé de produire les signaux auditifs de retour (armement, tir au centre ou non, fin de séquence de tir). Deux logiciels de synthèse sonore ont été utilisés alternativement : FAUST (Functional Audio Stream), développé par [GRAME](#) et L2Ork, une distribution étendue de Pure Data.

## III. MÉTAPHORES DE CONVERSION POUR LA VISÉE

### A. État de l'art

En compétition de biathlon classique (ski + tir à la carabine) pour aveugles, le système du fabricant ECOAIMS convertit la distance entre le point de visée sur la cible et son centre comme un radar de recul automobile : à longue distance en tempo, et à proximité du centre en fréquence sonore. Très peu d'études ont recherché à améliorer cette sonification. Apavou et al [2] lui ont ajouté un son de référence marquant le cœur de la cible. Ils ont aussi dissocié les axes verticaux et horizontaux, facilitant une stratégie de recherche axe par axe. Cependant, la sonification qui fournissait le plus d'informations (à la fois la direction et la distance à la cible pour les deux dimensions, inspirée de [3]), nécessitait le plus de temps pour tirer, ce qui s'explique par une plus lourde charge cognitive.

Or, dans la continuité de divers systèmes de substitution visuo-auditive (The VoIce, MeloSee), les systèmes de guidage 3D sonore fournissent les écarts à la cible sur chaque

dimension simultanément, que ce soit pour la navigation ou pour atteindre de la main un objet-cible en 3D [4-7]. Nous avons observé, dans leurs tentatives d'atteinte de cible de la main guidée par le son, une tendance de nos participants à utiliser une stratégie « étape par étape » [8-9], reprenant la démarche adoptée spontanément dans le guidage verbal. Nous avons donc implémenté une sonification séquentielle, présentant l'une après l'autre, chaque dimension dont l'écart est le plus critique. Celle-ci s'est montrée plus rapide et a été jugée plus ergonomique que la sonification parallèle qui les présente simultanément. Nous tenterons donc d'optimiser la visée sur ces principes, en fournissant un écart à la fois, plutôt qu'en maximisant la quantité d'informations.

### B. Nos sonifications pour le tir

Nous avons démarré en laboratoire à l'aide d'un prototype de pistolet fonctionnant par capture de mouvement, avec 24 personnes fermant les yeux et une malvoyante ; elles n'avaient pas suivi d'entraînement formel au tir [10]. Nous avons comparé la méthode traditionnelle du système ECOAIMS utilisant uniquement la fréquence (PO), à une variante y rajoutant un bruit blanc pour indiquer le centre de la cible (PWN), et à deux méthodes séparant les dimensions horizontale (fréquence continue et stéréo binaire) et verticale (timbre binaire) : soit par étapes (PSTseq), soit avec une présentation simultanée des dimensions (PSTpar).

Toutes nos sonifications innovantes améliorent la précision du tir, et la facilité d'utilisation par rapport à la méthode traditionnelle (PO). L'ajout de bruit blanc (PWN) améliore considérablement la précision et la facilité d'utilisation. L'amélioration des performances obtenue en distinguant les dimensions (PSTseq, PSTpar), par rapport à PWN, est moins prononcée, bien que PSTseq (sonification séquentielle) permette une visée plus rapide, un atout pour les épreuves nécessitant d'être rapide comme le Laser Run. Cependant, ces résultats dépendent peut-être du niveau d'entraînement des tireurs, et pourraient être altérés dans une épreuve combinée avec une course de vitesse.

### C. Tests en contexte écologique

Le prototype décrit en partie III nous permet de désormais de tester nos sonifications hors laboratoire. Nous avons donc sollicité 24 étudiants en complément d'un cours optionnel de biathlon (course et carabine laser) du service des activités physiques sportives de notre université. Lors de la première séance (initiation) en gymnase, chaque étudiant réalise séparément, les yeux bandés, deux sessions de tir, et deux courses à pied. Sur le modèle du Laser Run (pentathlon moderne), chaque session de tir se termine 50 secondes après le premier tir ou après 5 tirs réussis, sur un nombre d'essais illimité de tir. La sonification utilisée était PWN décrite précédemment (fréquence + bruit blanc au centre). Le nombre de tirs réussis augmente entre la 1ère session ( $M = 1,8$  ;  $ET = 1,4$ ) et la 2ème session ( $M = 2,5$  ;  $ET = 1,2$ ) ( $t(19) = -2,79$  ;  $p = .006$ ) ; les tirs sont plus rapides à la 2ème session ( $M = 16,9$  s ;  $ET = 7,4$  s) qu'à la 1ère ( $M = 22,5$  s ;  $ET = 12,1$  s) ( $t(19) = 2,1$  ;  $p = .026$ ), et plus précis ( $M = 31,8$  mm ;  $ET = 15,2$  mm

contre  $M = 47,3$  mm ;  $ET = 35,2$ ) ( $t(19) = 2,7$  ;  $p = .008$ ). Les courses en aveugle sont guidées par un autre étudiant voyant en se tenant par le bras. Une course consiste en un aller-retour en (deux) lignes droites de 37,2 M de distance. Les temps se réduisent entre la 1ère ( $M = 24,4$  s ;  $ET = 3,8$  s) et la 2ème course ( $M = 20,0$  s ;  $ET = 2,7$  s) ( $t(16) = 7,9$  ;  $p < .001$ ).

Lors des séances suivantes, les étudiants testeront un «Cécithlon» complet (alternance de phases de tir et de course), ainsi que les sonifications testées dans l'étude précédente, afin de voir s'il y a un avantage à dissocier les dimensions verticale et horizontale en condition sportive réaliste (contrainte de temps et de précision, essoufflement après la course). A terme, le guidage de course sera fait par une assistance électronique telle que celles développées ci-dessous.

## IV. REPÉRER LE COULOIR D'UNE PISTE D'ATHLÉTISME

Traditionnellement, les personnes aveugles se déplacent avec des aides physiques ou des solutions collaboratives. Cependant, ces solutions fournissent des informations limitées sur l'environnement et ne permettent pas une compréhension automatique et structurée de la scène. Avec les progrès récents de l'intelligence artificielle, de nombreux systèmes d'assistance sont capables d'analyser automatiquement l'environnement et d'en extraire des informations pertinentes pour l'utilisateur. Parmi ces systèmes, certains utilisent les méthodes basées sur la vision par ordinateur et permettent d'exploiter directement les informations visuelles contenues dans les images pour la détection. Kamal et al. [11] ont proposé un système combinant une caméra, un capteur ultrasonique et un Raspberry Pi 4 pour la détection d'objets, de visages et de textes. Aladren et al. [12] ont utilisé une caméra RGB-D afin de détecter les obstacles et d'estimer la distance aux objets à partir de nuages de points. Chen Z. et al. [13] ont intégré des méthodes de segmentation sémantique basées sur l'IA à un système de localisation et de cartographie simultanées (SLAM), permettant l'extraction d'informations géométriques et sémantiques en temps réel, avec une fréquence pouvant atteindre 25 images par seconde (FPS).

### A. Le système

Dans cette partie, nous nous concentrons sur la détection des lignes d'athlétisme à l'aide de méthodes basées sur la vision par ordinateur. Nous proposons un système d'assistance intégrant l'acquisition visuelle, le traitement par l'apprentissage profond, conçu pour fonctionner en temps réel. Les images de la scène sont acquises par une caméra et transmises par connexion filaire à une plateforme de calcul embarquée NVIDIA Jetson Orin Nano. Sur cette plateforme, un modèle d'apprentissage profond préalablement entraîné pour la détection des lignes de routes est utilisé pour analyser les images et prédire la position des lignes d'athlétisme. Les informations issues de cette prédiction sont ensuite transmises via le protocole MQTT à une ceinture tactile, qui fournit un retour haptique à l'utilisateur en fonction de la proximité des lignes gauche et droite (Fig. 2). Cette architecture permet de combiner robustesse, faible latence et flexibilité.

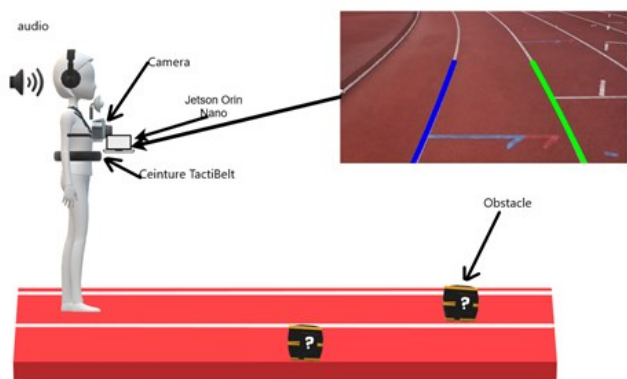


Fig. 2. Système de repérage de couloir d'athlétisme.

## B. Résultats

Nous avons évalué la méthode proposée sur un ensemble de 1355 images de pistes d'athlétisme. Les résultats montrent que la méthode détecte avec précision les lignes d'athlétisme dans les conditions variées et complexes, incluant des voies courbes, des marquages, des ombres, des occultations, de réflexion ainsi que les scènes complexes. De plus, l'implémentation du modèle sur la plateforme embarquée NVIDIA Jetson Orin Nano permet d'atteindre une vitesse de traitement d'environ 42 images par seconde au maximum, assurant ainsi une détection en temps réel compatible avec les contraintes d'un système d'assistance embarqué.

## V. GUIDAGE AVEC UNE SOURCE SONORE SPATIALISÉE

### A. État de l'art

Le guidage de personnes aveugles et malvoyantes le long d'un trajet fixé (connu ou inconnu) nécessite le repérage le long de la trajectoire et la fourniture d'instructions de direction à suivre. Le repérage d'une personne en extérieur est rendu possible par la GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites). La faible précision de la GNSS des débuts (voir [14] par exemple) a largement progressé et Loomis et al. [15-16] ont pu localiser fidèlement une personne et la guider le long d'une trajectoire grâce à des instructions vocales ou du son spatialisé. La technique du son spatialisé ou binaural [17], que nous utilisons aussi, permet de reproduire un environnement spatial très naturel en positionnant une source sonore dans la direction que l'utilisateur doit suivre. Afin de spatialiser le son, la source sonore utilisée (typiquement une musique) subit un traitement qui consiste à appliquer un filtrage avec des fonctions de transfert, appelées HRTF pour "Head Related Transfer Functions" qui reproduisent le son entendu par chacune des oreilles. Ces HRTF dépendent de l'orientation que l'on souhaite donner au son et il y en a une pour chaque oreille. Ainsi, l'utilisateur aura avec un simple casque stéréophonique, l'impression d'une scène sonore dans laquelle le son provient d'une direction précise. L'illusion est d'autant plus forte lorsque les mouvements de tête sont pris en compte. Ce "head-tracking" permet de positionner en temps réel la source sonore dans une direction fixe, indépendamment

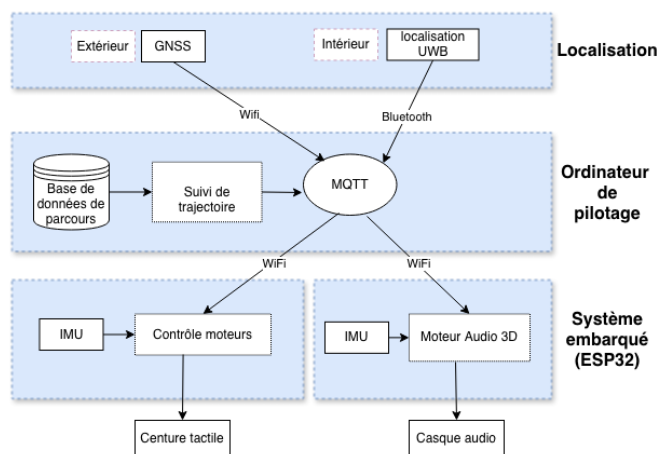


Fig. 3. Architecture du dispositif de guidage. Un système de localisation intérieur ou extérieur fournit, via une interface MQTT, les coordonnées du sujet à un ordinateur de pilotage qui, compte tenu de la trajectoire à suivre, peut calculer une direction, qui sera alors rendu en audio et/ou tactile.

de l'orientation de la tête de l'auditeur. C'est ce principe, utilisé pour le guidage audio dans [18-20] que nous reprenons et développons dans cette étude.

### B. Le dispositif de guidage audio

Compte tenu de l'architecture logicielle du projet qui nécessite de pouvoir faire communiquer différents dispositifs, nous avons opté pour une solution dans laquelle le système de guidage sonore et en particulier le moteur de rendu binaural est complètement posé sur le casque. Pour éviter que l'utilisateur ne transporte trop de poids sur la tête, le code est embarqué dans un microcontrôleur de type ESP32, qui communique avec un serveur MQTT via WiFi. Les pistes audios sont soit transmises par Bluetooth, soit embarquées sur une carte SD afin de limiter les communications sans fil. Une centrale inertielle de type ICM20948 est utilisée pour fournir en temps réel une approximation des angles d'Euler décrivant l'orientation de la tête de l'utilisateur. Le dispositif complet, intégrant la partie tactile (voir infra) est représenté Fig. 3 et 5. Il est suffisamment léger pour pouvoir l'utiliser dans des contextes sportifs ou des séances relativement longues sans fatigue ni gêne. Il est par ailleurs possible, comme cela a été réalisé lors d'une étude précédente, d'utiliser un casque à conduction osseuse qui ne recouvre pas les oreilles et permet à l'utilisateur de continuer à entendre les bruits ambiants.

### C. Résultats préliminaires

Le dispositif a été utilisé lors d'une précédente étude visant à évaluer la pertinence du guidage audio spatialisé pour des personnes aveugles et malvoyantes. Cette étude, menée en collaboration avec l'Institut de la Vision et son équipement StreetLab a permis de tester le système sur 18 personnes dont la moitié atteinte de déficience visuelle. Les participants devaient suivre des trajets virtuels, de même longueur et comprenant tous le même nombre de virages. Ils étaient équipés soit d'un casque HiFi semi-ouvert (Beyerdynamics DT-990 pro), soit d'un casque à conduction osseuse (AfterShockz SPORTZ Titanium AS451). Les résultats

montrent une meilleure précision avec le casque HiFi (erreur de positionnement moyen d'environ 40 cm vs 50 cm), mais une meilleure acceptation du casque à conduction osseuse par les personnes aveugles et malvoyantes. Malheureusement la surface expérimentale du StreetLab étant limitée (environ 4x8 m) il n'a pas été possible de construire des parcours permettant un déplacement confortable à la vitesse de marche habituelle des sujets. Nous avons donc poursuivi ces expériences de guidage dans un gymnase en collaboration avec les équipes du CERREV comme décrit plus loin.

## VI. GUIDAGE AVEC UNE CEINTURE VIBROTACTILE

### A. État de l'art

L'idée de communiquer des informations par la peau est ancienne [21-22] et ses potentialités pour les personnes aveugles et malvoyantes ont rapidement généré de grandes ambitions [1]. Si les premiers dispositifs, dits de "substitution sensorielle", qui se proposaient de convertir l'ensemble d'une scène visuelle sous forme tactile, se sont révélés peu fonctionnels dans les faits, la multiplication des travaux sur les dispositifs vibrotactiles constatée sur ces dernières décennies apporte de nouvelles perspectives. Parmi celles-ci, l'aide à la navigation au moyen d'une ceinture vibrotactile est particulièrement prometteuse, en particulier pour les situations de déficience visuelle. Composées de plusieurs vibreurs répartis autour de l'abdomen de l'utilisateur, les ceintures vibrotactiles ont pour grand avantage de présenter une correspondance directe entre la localisation de la stimulation sur la peau et la direction indiquée à l'utilisateur [23]. Comme pour le son spatialisé (voir section précédente), l'information délivrée sous cette forme n'est donc pas abstraite ou encodée : elle indique directement l'orientation à suivre, à la manière d'une « tape sur l'épaule » [24].

Avec un premier prototype de ceinture composé d'un micro-ordinateur embarqué, d'une batterie et de 8 vibreurs placés autour de la taille, tous les 45°, nous avons demandé à 12 participants voyants de s'orienter dans la direction indiquée dans deux conditions de vision (lumière normale et obscurité totale) et selon trois modes de guidage : le langage verbal (e.g., "90° à gauche"), un mode tactile unique (une vibration de 1 s), et un mode tactile continu présentant un couplage entre les vibrations et la rotation du corps de l'utilisateur [23]. Dans ce dernier mode, la stimulation était composée de plusieurs vibrations courtes (200 ms d'activation suivies de 200 ms de pause) dont la localisation était actualisée en temps réel en fonction du mouvement de l'utilisateur, de façon à indiquer en permanence la direction demandée par rapport à son orientation. Avec des erreurs absolues moyennes d'azimut de 8,66° en condition de lumière et de 9,14° en condition d'obscurité, le mode tactile continu s'est révélé significativement plus efficace ( $ps \leq .002$ ) que les deux autres modes (erreurs absolues moyennes 12,90° et 15,42°). Par ailleurs, les scores attribués par les participants sur les critères de facilité, d'intuitivité et de précision perçue, étaient également tous significativement supérieurs pour le mode tactile continu que pour le langage verbal ( $ps < .001$ ) et le mode tactile unique ( $ps \leq .031$ ). A la suite de ces premiers résultats, nous avons poursuivi le développement du dispositif afin d'ajouter la locomotion à

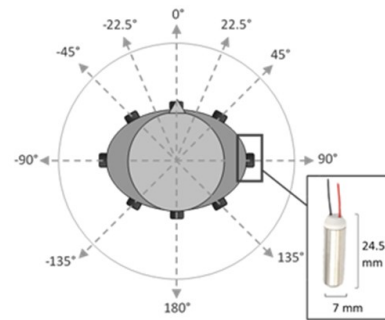


Fig. 4. Position des vibreurs (en noir) autour du torse de l'utilisateur avec les directions indiquées correspondantes (vue du dessus) et zoom sur un des vibreurs ERM inséré dans la partie textile du gilet.

l'orientation. Nous avons également défini une architecture commune aux différents dispositifs en vue de permettre la combinaison des modalités tactile et audio, et donc par exemple de transmettre une même information de manière redondante ou des informations complémentaires, ou encore de laisser le choix de la modalité à l'utilisateur (Fig. 3).

### B. Le dispositif de guidage tactile

Le dispositif tactile actuel se compose d'un microcontrôleur ESP32, d'une IMU, d'une batterie, et de 10 vibreurs cylindriques (moteurs à masse excentrée rotative ou ERM, encapsulés) autour du torse. Ces composants sont intégrés dans un gilet que l'utilisateur enfle et qui se ferme par fermeture éclair, les vibreurs étant distribués autour du torse dans une partie élastiquée pour indiquer 10 directions dans l'environnement (Fig. 4). Pour les déplacements en intérieur, l'utilisateur est localisé grâce à un système QORVO ultra wideband. Pour les déplacements en extérieur, la localisation de l'utilisateur est assurée grâce au GPS d'un smartphone.

### C. Travaux en cours

Quatorze personnes voyantes et six personnes malvoyantes sévères ou aveugles ont participé à une expérimentation dans laquelle elles devaient suivre, dans un demi-gymnase d'une surface de 400 m<sup>2</sup>, des itinéraires invisibles simples (ellipses) ou complexes (labyrinthe composé de changements de direction brusques) grâce à trois modalités de guidage : tactile, audio spatialisé et bimodal combinant ces deux modalités (Fig. 5). En cohérence avec nos résultats précédents [23][25], et à la différence de la plupart des autres travaux sur le guidage vibrotactile, nous avons opté pour un couplage continu de la stimulation aux actions de l'utilisateur (200 ms on/200 ms off). A la fin de l'expérimentation, le ressenti des participants était recueilli à l'occasion d'un entretien, incluant une évaluation quantitative et qualitative sur les différentes modalités de guidage. Les données de performance (e.g., vitesse de marche, écart à l'itinéraire) et les retours des participants sont actuellement en cours de traitement.

## CONCLUSION

Le projet SAM-Guide illustre le potentiel des méthodes d'augmentation sensorielle multimodales pour favoriser des

pratiques sportives complexes, telles que le Laser Run, pour des personnes aveugles et malvoyantes. En combinant un pistolet optique à sonification séquentielle, une détection de piste par vision et intelligence artificielles, ainsi que des guidages par audio spatialisé et matrice de vibreurs, ce consortium développe une pluralité de solutions d'assistance à la navigation et à la visée. Les expérimentations en contexte réel permettent d'affiner la synergie de ces différents dispositifs, avec pour ambition finale d'offrir aux athlètes aveugles et malvoyants une plus grande autonomie et de nouvelles opportunités de dépassement de soi.



Figure 5. Participant non-voyant suivant un itinéraire virtuel guidé par le dispositif audio et le dispositif tactile.

#### REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été soutenus financièrement par l'ANR, via le projet « SAM-Guide (ANR-216CE33-0011). Nous remercions les étudiants, le personnel de nos établissements, les personnes aveugles et malvoyantes, et leurs associations d'avoir participé à nos essais et contribué aux évaluations.

#### RÉFÉRENCES

[1] P. Bach-y Rita, C. C. Collins, F. A. Saunders, B. White, and L. Scadden, "Vision substitution by tactile image projection," *Nature*, vol. 221, no. 5184, pp. 963–964, 1969.

[2] F. Apavou, T. B. Bouchara, and P. Bourdot, "Accessibility of shooting task for blind and visually impaired : A sonification method comparison," in 29th International Conference on Auditory Display (ICAD 2024), 2024.

[3] T. Ziemer and H. Schultheis, "A psychoacoustic auditory display for navigation," in 24th International conference on auditory displays (ICAD2018), Houghton, MI, 2018, pp. 136–144.

[4] R. Guarese, E. Pretty, A. Renata, D. Polson, and F. Zambetta, "Exploring audio interfaces for vertical guidance in augmented reality via hand-based feedback," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 30, no. 5, pp. 2818–2828, 2024.

[5] X. Hu, A. Song, Z. Wei, and H. Zeng, "Stereopilot : A wearable target location system for blind and visually impaired using spatial audio rendering," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 30, pp. 1621–1630, 2022.

[6] Y. Liu, N. R. Stiles, and M. Meister, "Augmented reality powers a cognitive assistant for the blind," *ELife*, vol. 7, p. e37841, 2018.

[7] J. C. Lock, I. D. Gilchrist, I. D. Gilchrist, G. Cielniak, and N. Bellotto, "Experimental analysis of a spatialised audio interface for people with visual impairments," *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–21, 2020.

[8] C. Fons, S. Huet, D. Pellerin, S. Gerber, and C. Graff, "Moving towards and reaching a 3-d target by embodied guidance : Parsimonious vs explicit sound metaphors," in International Conference on Human-Computer Interaction. Springer, 2023, pp. 229–243.

[9] C. Fons, S. Huet, D. Pellerin, and C. Graff, "Using fits' law to compare sonification guidance methods for target reaching without vision," in VISIGRAPP 2024-19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications-HUCAPP, vol. 1. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2024, pp. 444–454.

[10] C. Fons, S. Huet, D. Pellerin, and C. Graff, "Refining sonification methods to improve shooting performance and ergonomics for the visually impaired," in ICAD 2025-30th International Conference on Auditory Display (ICAD 2025), 2025.

[11] I. M. Kamal, M. Salah Abd-elhafeez, and A. Farghal, "Camera-based navigation system for blind and visually impaired people," *Sohag Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2023.

[12] A. Aladren, G. López-Nicolás, L. Puig, and J. J. Guerrero, "Navigation assistance for the visually impaired using rgb-d sensor with range expansion," *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 922–932, 2014.

[13] Z. Chen, X. Liu, M. Kojima, Q. Huang, and T. Arai, "A wearable navigation device for visually impaired people based on the real-time semantic visual slam system," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1536, 2021.

[14] D. Brusnighan, M. Strauss, J. Floyd, and B. Wheeler, "Orientation aid implementing the global positioning system," in Proceedings of the Fifteenth Annual Northeast Bioengineering Conference. IEEE, 1989, pp. 33–34.

[15] J. M. Loomis, R. G. Golledge, and R. L. Klatzky, "Navigation system for the blind : Auditory display modes and guidance," *Presence*, vol. 7, no. 2, pp. 193–203, 1998.

[16] J. M. Loomis, J. R. Marston, R. G. Golledge, and R. L. Klatzky, "Personal guidance system for people with visual impairment : A comparison of spatial displays for route guidance," *Journal of visual impairment & blindness*, vol. 99, no. 4, pp. 219–232, 2005.

[17] J. Blauert, *Spatial hearing : the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997.

[18] S. Ferrand, F. Alouges, and M. Aussal, "Binaural spatialization methods for indoor navigation," in Audio Engineering Society Convention 142., 2017.

[19] S. Ferrand, F. Alouges, and M. Aussal, "An augmented reality audio device helping blind people navigation," in International Conference on Computers Helping People with Special Needs. Springer, 2018, pp. 28–35.

[20] S. Ferrand, F. Alouges, and M. Aussal, "An electronic travel aid device to help blind people playing sport," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 14–21, 2020.

[21] F. A. Geldard, "Adventures in tactile literacy," *American Psychologist*, vol. 12, no. 3, p. 115, 1957.

[22] F. A. Geldard, "Some neglected possibilities of communication : For some kinds of messages the skin offers a valuable supplement to ears and eyes," *Science*, vol. 131, no. 3413, pp. 1583–1588, 1960.

[23] E. Faugloire and L. Lejeune, "Evaluation of heading performance with vibrotactile guidance : The benefits of information–movement coupling compared with spatial language," *Journal of Experimental Psychology : Applied*, vol. 20, no. 4, p. 397, 2014.

[24] J. B. Van Erp and M. H. Verschoor, "Cross-modal visual and vibrotactile tracking," *Applied Ergonomics*, vol. 35, no. 2, pp. 105–112, 2004.

[25] E. Faugloire, L. Lejeune, M.-A. Rivière, and B. Mantel, "Spatiotemporal influences on the recognition of two-dimensional vibrotactile patterns on the abdomen," *Journal of Experimental Psychology : Applied*, vol. 28, no. 3, p. 606, 2022.