



HAL
open science

Sonification du mouvement pour la rééducation après une lésion cérébrale acquise : conception et évaluations de dispositifs

Iseline Peyre

► **To cite this version:**

Iseline Peyre. Sonification du mouvement pour la rééducation après une lésion cérébrale acquise : conception et évaluations de dispositifs. Interface homme-machine [cs.HC]. Sorbonne Université, 2022. Français. NNT : 2022SORUS414 . tel-04093256

HAL Id: tel-04093256

<https://theses.hal.science/tel-04093256>

Submitted on 10 May 2023

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.



Sonification du mouvement pour la rééducation après une lésion cérébrale acquise : Conception et Évaluations de dispositifs

Iseline PEYRE

THÈSE DE DOCTORAT DE SORBONNE UNIVERSITÉ

École doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique
Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique
UMR Sciences Technologies de la Musique et du Son

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de SORBONNE UNIVERSITÉ

Soutenue le 9 décembre 2022 devant le jury composé de :

Stéphanie BUISINE
Jérémy DANNA
Isabelle BONAN
Sylvain HANNETON
Mohamed CHETOUANI
Frédéric BEVILACQUA
Pascale PRADAT-DIEHL
Agnès ROBY-BRAMI
Véronique MARCHAND-PAUVERT

Rapporteuse
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Co-Directrice de thèse
Membre invitée
Membre Invitée

CESI Paris Nanterre
Université de Toulouse
Université de Rennes
Université Paris Cité
Sorbonne Université
STMS-IRCAM
Sorbonne Université
Sorbonne Université
Sorbonne Université

RÉSUMÉ

Première cause de handicap acquis de l'adulte, les lésions cérébrales acquises non dégénératives induisent de multiples troubles affectant les sphères sensitivo-motrices, cognitives et psycho-sociales. La chronicisation des déficits résiduels est à l'origine d'une perte d'autonomie dans la réalisation des activités de vie quotidienne. L'accompagnement en rééducation favorise la récupération fonctionnelle grâce au recours à des méthodes, techniques et outils complémentaires. Ainsi, la poursuite de la rééducation en autonomie supervisée lors de la phase chronique est désormais encouragée. Avec le développement des technologies pour la santé, de nouvelles modalités d'accompagnement font actuellement l'objet d'investigations.

L'émergence d'outils interactifs de sonification du mouvement permettant de disposer en temps réel d'informations sonores continues en lien avec les mouvements réalisés constituent une voie prometteuse pour la rééducation. Cependant, des questionnements relatifs à l'orientation des choix de conception, particulièrement concernant les caractéristiques des retours sonores et les modalités d'interactions gestes-sons, sont actuellement au cœur des réflexions.

Face à ces constats, l'objectif principal de cette thèse interdisciplinaire, santé-arts-sciences, était de développer un dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation en autonomie supervisée de patients présentant des séquelles motrices après une lésion cérébrale acquise.

Dans cette perspective, le premier objectif était d'évaluer l'effet de différents types de retours sonores (caractéristiques sonores et modalités d'interactions gestes-sons) sur deux tâches gestuelles : un mouvement d'antépulsion (extension du coude), et un maintien postural, avec des participants de différents profils.

Le deuxième objectif était de définir les critères de conception et de sélectionner les solutions adaptées pour la création d'un dispositif de sonification du mouvement répondant aux caractéristiques et besoins de patients présentant des séquelles motrices au membre supérieur suite à une lésion cérébrale acquise, dans la perspective d'un usage en autonomie supervisée.

Le troisième objectif était d'initier une évaluation du dispositif conçu, afin de disposer d'éléments formels permettant d'envisager une étude clinique.

Les travaux menés ont notamment permis de confirmer l'effet de la présence de retours sonores interactifs lors de l'exécution de gestes et l'importance de la prise en considération des modalités d'interaction gestes-sons.

Le processus de co-conception centré utilisateurs mis en œuvre avec des experts de plusieurs disciplines a conduit à la création d'un dispositif de sonification du mouvement mobile novateur, fonctionnel, flexible (personnalisable), adapté à une situation de rééducation en autonomie supervisée. Peu onéreux, le dispositif a été dupliqué en 10 exemplaires.

Les premiers résultats des évaluations réalisées auprès de thérapeutes sont très encourageants.

Ce travail de thèse ouvre ainsi des perspectives d'évaluation clinique à grande échelle.

Mots-Clés: Lésion cérébrale acquise; Sonification du mouvement; Rééducation; Autonomie

ABSTRACT

As the leading cause of acquired disability in adults, non-degenerative acquired brain injuries lead to multiple disorders affecting the sensory-motor, cognitive and psycho-social dimensions. The chronicisation of residual deficits leads to a loss of autonomy in the performance of daily living activities. Rehabilitation support promotes functional recovery through the use of complementary methods, techniques and tools. Thus, the pursuit of rehabilitation in supervised autonomy during the chronic phase is now encouraged. With the development of health technologies, new support methods are currently being investigated.

The emergence of interactive movement sonification tools that provide continuous sound information in real-time in relation to the movements performed is a promising approach to rehabilitation. However, the orientation of design choices, particularly concerning the characteristics of sound feedback and the modalities of gesture-sound interactions, are currently at the centre of reflection.

The main objective of this interdisciplinary health-arts-sciences thesis was to develop a movement sonification device for the supervised autonomous rehabilitation of patients with motor impairment after an acquired brain injury.

In this perspective, the first objective was to evaluate the effect of different types of sound feedback (sound characteristics and modalities of gesture-sound interactions) on two gestural tasks: an elbow extension movement, and a postural maintenance, with participants of different profiles.

The second objective was to define the design criteria and to select the appropriate solutions for the creation of a movement sonification device responding to the characteristics and needs of patients with motor impairment in the upper limb following an acquired brain injury, with a perspective of use in supervised autonomy.

The third objective was to initiate an evaluation of the designed device, in order to consider a clinical study.

The studies carried out confirmed the effect of the presence of interactive sound feedback during the execution of gestures and the importance of taking into consideration the modalities of gesture-sound interaction.

The user-centered co-design process implemented with experts from several disciplines led to the creation of an innovative, functional, flexible (customisable) mobile movement sonification device, adapted to a supervised autonomous rehabilitation situation. The device is inexpensive and has been duplicated in 10 copies.

The first results of the evaluations carried out with therapists are very encouraging, opening up perspectives for large-scale clinical evaluation.

Keywords: Acquired brain injuries; Movement sonification; Rehabilitation; Autonomy

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Frédéric Bevilacqua, ainsi qu'à ma co-directrice de thèse, le Pr Pascale Pradat-Diehl, pour la confiance qu'ils m'ont témoigné, leurs conseils, écoute et patience.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des membres du jury, en premier lieu Stéphanie Buisine, et Jérémy Danna, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ce travail, aux côtés d'Isabelle Bonan et Sylvain Hanneton. J'adresse une mention particulière à Mohamed Chetouani, présent à chaque grand moment de ce projet, depuis sa préparation au cours du projet ISMES porté par le Labex SMART jusqu'à la soutenance.

Je remercie également Alain Hamaoui pour la qualité de ses questions et remarques toujours bienveillantes lors des comités de suivi.

Je remercie très sincèrement Agnès Roby-Brami, dont le soutien et les nombreux conseils ont été une ressource précieuse, et ma chère Véronique Marchand-Pauvert, qui m'a ouvert les portes de son laboratoire et tant appris.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des contributeurs de ce travail: Benjamin Matuszewski, Emmanuel Fléty, Alain Giron, Arnaud Recher, Victor Audouze, Mikael Chevallier, Lydia Rodriguez de la Nava, Suzanne Saint-Cast, et Maël Segalen, ainsi qu'aux membres des équipes de rééducation avec qui j'ai eu la chance de collaborer, notamment Clémence, Miguel, et Elsa pour leurs conseils et aide au cours du processus de conception du dispositif.

J'adresse également mes remerciements aux membres du projet Element, tout particulièrement Baptiste Caramiaux, impliqué dans l'analyse des entretiens de la 1ère étude.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres des équipes du Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, dirigé par Lori Bridal, et de l'Unité Mixte de Recherche de Sciences et Technologies de la Musique et du Son de l'Institut de Recherche et Coordination en Acoustique Musique dirigé par Brigitte d'Andréa-Novel. Je remercie tout particulièrement mes collègues des équipes Connectivité Neurale et Plasticité, notamment Alexandra, et Interactions Sons Musique Mouvement, Marion, Riccardo, Antoine, Jean-Philippe, Victor, Aliénor et Diemo, pour leurs conseils, soutien, et enthousiasme à se prêter aux différents tests des prototypes.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des participants des études, sans qui rien ne serait possible.

J'adresse une pensée toute particulière à ceux à qui j'aurais été si fière de présenter ce travail, et que je remercie profondément pour les valeurs qu'ils m'ont transmis: Rose Katz, Geneviève Bard, et Etienne Jauffret.

Enfin, je remercie mes proches, famille et amis, sur qui je peux compter à chaque instant.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	4
Remerciements	6
Liste des figures	14
Liste des tableaux	17
Liste des abréviations	18
INTRODUCTION	22
1. Contexte	22
2. Objectifs et contributions	23
PREMIÈRE PARTIE NOTIONS ÉLÉMENTAIRES	26
Chapitre 1 Les Lésions Cérébrales Acquises Non Dégénératives de l'adulte: De l'urgence vitale à la pathologie chronique	28
1. Généralités: définitions, épidémiologie, étiologie, typologies	30
1.1 Introduction	30
1.2 Les accidents vasculaires cérébraux	30
1.3 Les traumatismes crâniens	32
1.4 Les tumeurs cérébrales	33
1.5 Les infections cérébrales	34
1.6 Les anoxies cérébrales	34
1.7 Synthèse	35
2. Principaux troubles et parcours de soin post-AVC	36
2.1 Introduction	36
2.2 Troubles initiaux, diagnostic, prise en charge et orientation des victimes	36
2.3 Principaux troubles suite à la phase aiguë, et parcours de soins	38
2.3.1 Troubles physiques	39
2.3.1.1 Troubles moteurs	39
2.3.1.2 Troubles sensitifs	40
2.3.1.3 Troubles sensoriels	41
2.3.1.4 Troubles de l'équilibre et du maintien postural	41
2.3.1.5 Troubles vésico-sphinctériens	42
2.3.2 Troubles cognitifs	42
2.3.2.1 Troubles de l'attention	42
2.3.2.2 Troubles mnésiques	43
2.3.2.3 Troubles des fonctions exécutives	44
2.3.2.4 Troubles praxiques	44
2.3.2.5 Troubles visuo-spatiaux	45
2.3.2.6 Agnosies et anosognies	45
2.3.2.7 Troubles du langage	46
2.3.3 Troubles psycho-sociaux	46
2.3.4 Orientation des patients	47
3. Principes et méthodes principales de rééducation	49

3.1 Bases physiopathologiques de la récupération spontanée: pénombre, diaschisis et plasticité cérébrale	49
3.2 Récupération induite: principes et techniques de rééducation-réadaptation	49
3.3 Spécificités de la phase chronique et du retour à domicile	51
4. Auto-rééducation et Télé-Rééducation: l'ère de l'e-Santé	52
4.1 Contexte et définitions	52
4.2 Enjeux	54
4.3 Synthèse	55
5. Handicap, Classifications, Autonomie	56
5.1 Le handicap: évolution des définitions et modèles	56
5.2 La Classification Internationale du Fonctionnement	57
5.3 L'enjeu de l'autonomie	58
Chapitre 2 La Sonification du Mouvement: Principes et Usages	60
1. Auditory Display: origine, taxonomie et définitions	62
1.1 Les prémices de la sonification: rendre audible l'invisible	62
1.2 La famille des Auditory Display	62
2. Sonification du mouvement	64
2.1 Spécificités	64
2.2 Principe	65
2.3 Modalités d'interactions gestes-sons	66
2.4 Usages	67
2.4.1 Pratiques artistiques	67
2.4.2 Pratiques sportives	68
2.4.3 Recherches fondamentales	69
2.4.4 Santé et Rééducation	70
SYNTHÈSE	74
DEUXIÈME PARTIE EXPÉRIMENTATIONS	76
Chapitre 3 Etude 1: Effect of sonification types in upper-limb movement: a quantitative and qualitative study in hemiparetic and healthy subjects	78
1. Introduction	80
2. Background	85
3. Method	88
3.1 Participants	88
3.2 Protocol	88
3.3 Experimental setup	90
3.4 Sonification design	92
3.4.1. Direct sound modulation	92
3.4.2. Melody Playing	93
3.4.3. Environmental sounds Triggering	93
3.5 Data Analysis	94
3.5.1 Movement Analysis	94
3.5.2 Participant's experience Analysis	94
4. Results	95
4.1 Participants Description	95
4.2 Movement data results	95
4.2.1 Individual data	95
4.2.2 Comparison between the sound and no sound conditions	97
4.2.3 Comparison between each sound condition	99

4.3 Results concerning the participant's experience	101
4.3.1 Sound preferences and Experience qualifiers	101
4.3.2 Thematic analysis based on semi-directive interviews	101
4.3.2.1. Common theme to the patient and healthy group: the perception of the gesture-sound interaction	102
4.3.2.2. Common to the patient and healthy group: Emotional mobilization, mental imagery and attentional process	104
4.3.3 Theme specific to the healthy participants group: Analysis of the sonification system	107
4.3.4 Theme specific to the group of patient participants: Applicability of the sonification system	107
4.4 Discussion	108
4.4.1 Temporality: with sound versus without sound feedback	108
4.4.2 Specificity of the sound feedback	111
5. Conclusion, limitations and perspectives	113
6. Synthèse	130
Chapitre 4	
Conception d'un dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation en autonomie supervisée	132
1. Co-conception centrée utilisateurs: définition du projet et présentation des acteurs impliqués	134
1.1 Contexte et objectifs	134
1.2 Experts impliqués	135
2. Étapes de la conception	137
2.1 Présentation générale	137
2.2 Première étape: Établir les critères orientant la conception du dispositif à partir de la définition des besoins des patients et thérapeutes, de leurs spécificités, et des enjeux et contextes d'usage	137
2.3 Deuxième étape: Répertorier les ressources et contraintes afin d'assurer la viabilité de la conception	139
2.4 Troisième étape: Organiser et formaliser la conception à partir d'une présélection de solutions répondant aux critères établis	140
2.4.1 Hardware	140
2.4.2 Software	141
2.4.3 Contenu	141
2.5 Quatrième étape: mise en forme du prototype α	142
2.5.1 Hardware	142
2.5.2 Software	143
2.5.2.1 Transposition du système de sonification vers Soundworks	
2.5.2.2 Modalité de sonification des exercices de maintien de posture	
2.5.2.3 Interface	
2.5.3 Contenu	144
2.6 Cinquième étape: Pré-Tests	145
2.6.1 Mise en oeuvre des pré-tests	145
2.6.2 Modifications et corrections apportées	146
2.6.2.1 Hardware	146
2.6.2.2 Software	146
2.6.2.3 Contenu	146
3. Description du β Prototype	148
3.1 Matériel	148
3.1.1 Capteurs de mouvements	148

3.1.2	Coques imprimées en 3D	149
3.1.3	Système de port des capteurs	150
3.1.4	Boîte	151
3.1.4.1	Structure	151
3.1.4.2	Façade	152
3.1.4.3	Dessus de la boîte	154
3.1.4.4	Arrière de la boîte	154
3.1.5	Contenu de la boîte	155
3.1.6	Accessoires complémentaires	155
3.2	Application	156
3.2.1	Constellation CoMo	156
3.2.2	Spécificités CoMo-Rééducation	157
3.3	Contenus de l'application	160
3.3.1	Exercices	160
3.3.2	Design sonore	161
3.3.3	Modalités d'interactions gestes-sons et synthèse sonore	162
3.3.3.1	Exercices statiques	164
3.3.3.2	Exercices Dynamiques	165
3.3.3.3	Exercices Memory	168
3.3.4	Navigation	169
3.3.5	Tutoriels	171
4.	Discussion : points forts, limites et perspectives d'améliorations	171
Chapitre 5	Évaluations du dispositif	174
1.	Évaluations techniques du β prototype	176
1.1	Matériel	176
1.2	Fonctionnalité dispositif	177
1.2.1	"Monkey testing"	177
1.2.2	Tests répétés avec des utilisateurs non experts	178
1.2.2.1	Contexte et objectifs	178
1.2.2.2	Participants	179
1.2.2.3	Déroulements des tests	179
1.2.2.4	Résultats des tests	180
1.2.2.5	Discussion	181
2.	Évaluations des exercices et modalités de couplages développés	183
2.1	Objectifs	183
2.2	Participants	183
2.2.1	Critères d'inclusion et de non inclusion	183
2.2.2	Description des participants	184
2.3	Déroulement de l'étude	185
2.4	Étude portant sur l'évaluation des modalités de couplages dans le cas des exercices de répétition de mouvements	185
2.4.1	Contexte et objectifs	185
2.4.2	Protocole	186
2.4.3	Modalités de traitement et d'analyse des données	187
2.4.4	Résultats	188
2.4.5	Discussion des résultats	192
2.5	Étude portant sur l'évaluation des effets de la sonification du mouvement lors d'une tâche de maintien de posture	193
2.5.1	Contexte et objectifs	193
2.5.2	Protocole	193

2.5.3 Modalités d'analyse	195
2.5.4 Résultats	195
2.5.5 Discussion	198
2.6 Conclusion	199
3. Évaluations thérapeutes	201
3.1 Contexte et objectifs	201
3.2 Méthodologie	202
3.2.1 Participants	202
3.2.2 Déroulement de l'évaluation	202
3.2.3 Résultats préliminaires	203
3.2.4 Discussion	205
DISCUSSION GÉNÉRALE	206
CONCLUSION	210
Bibliographie	212
Annexes	239

Liste des figures

CHAPITRE 1:

Figure 1.1 Typologie des accidents vasculaires cérébraux (reproduit de site canadien coeur et AVC)

Figure 1.2 Vascularisation cérébrale Vue latérale, côté droit (reproduit de Manuel Merck)

Figure 1.3a Lobes cérébraux Vue latérale, hémisphère cérébral gauche (reproduit de site Clinique TCNF)

Figure 1.3b Principales aires cérébrales et organisation corticale Vue latérale, hémisphère cérébral gauche (adaptée de S. Iceta, Issue de Nohales, 2015)

Figure 1.4 Modèle linéaire handicap CIH (reproduit de CIH, INSERM, 1988)

Figure 1.5 Modèle descriptif des interactions entre les composantes de la CIF (reproduit de CIF, OMS, 2001)

CHAPITRE 2

Figure 2.1 Étapes de la sonification du mouvement

CHAPITRE 3

Figure 3.1 Order of the sound conditions

Figure 3.2 Experimental Setup.

Figure 3.3 Normalized displacement over time with the different computed phases

Figure 3.4 No sound vs sound condition, for patients and healthy participants

Figure 3.5 No sound series for patients and healthy subjects

Figure 3.6 Mean for the patients (left) and healthy participants (right), for all the sound and no sound conditions, considering the different arms

Figure 3.7 Mean for the patients and healthy participants, for the categories of sound conditions, considering the different arms

Figure S3.2 Sound spectrogram for each sound condition

Figure S3.4 Plot of the amusia score for the healthy and patient participants, considering different levels of music practice: non-musician (“None”), Amateur and Professional.

Figure S3.5A Boxplots of the normalized total time for each sound condition, reported for the Patients and Healthy participants, considering each arm.

Figure S3.5B Median of the normalized total time for each sound condition, reported for the Patients and Healthy participants, considering each arm

CHAPITRE 4

Figure 4.1 Schéma récapitulatif des étapes de la conception et du développement du dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation en autonomie supervisée de patients présentant des séquelles d'une lésion cérébrale acquise.

Figure 4.2 Coque 1^{ère} version

Figure 4.3 Boîte: 1^{ère} version façade

Figure 4.4 Interface : Page de présentation

Figure 4.5 Interface implémentée dans la boîte

Figure 4.6 Capteur RIoT

Figure 4.7 Coques avant / après

Figure 4.8 Coque vue du dessus

Figure 4.9 Contenu des coques

Figure 4.10 Système de port des capteurs

Figure 4.11 Structure de la boîte

Figure 4.12 Boîte : Façade

Figure 4.13 Boîte vue du dessus : plateformes de chargement

Figure 4.14 Support de l'exercice memory

Figure 4.15 Schéma de l'architecture clients - serveur de l'application CoMo Rééducation

Figure 4.16 Schéma de l'organisation des programmes de l'application CoMo-Rééducation en fonction des profils d'utilisateurs

Figure 4.17 Habillage pages de l'interface

Figure 4.18 Étapes de sonification du mouvement des exercices statiques

Figure 4.19 *Mapping* exercice statique

Figure 4.20 Étapes de sonification du mouvement des exercices dynamiques

Figure 4.21 Principe *mapping* exercice dynamique

Figure 4.22 *Mapping* 1 (symétrique) exercice dynamique

Figure 4.23 *Mapping* 3 (asymétrique) exercice dynamique

Figure 4.24 Étapes de sonification du mouvement des exercices memory

Figure 4.25 Trame de navigation sur l'interface par étape

CHAPITRE 5

Figure 5.1 Suivi au cours du temps de la batterie des capteurs RIoT

Figure 5.2 Mesure de la stabilité des 3 fonctions des capteurs RIoT

Figure 5.3 Détection des maxima et calcul des amplitudes moyennes relatives à la calibration 1 et calibration 2

Figure 5.4 Durées moyennes des cycles et déviations moyennes par rapport au point de départ (1) et au point d'arrivée (2) en fonction des situations sonores

Figure 5.5 Analyse comparative (test Wilcoxon) des amplitudes moyennes d'oscillations et durées moyennes en fonction des modalités d'interactions gestes-sons.

Figure 5.6 Auto-évaluations qualitatives des performances, niveaux de difficulté, et appréciation des retours sonores lors de l'exercice dynamique

Figure 5.7 Médiane et quartiles pour le log des erreurs moyennes pour les différentes conditions

Figure 5.8 Médiane et quartiles pour le log des erreurs moyennes pour les différentes conditions, en groupant les conditions interactive et non-interactive, et en séparant les groupes d'âge

Figure 5.9 Auto-évaluations qualitatives des performances, niveaux de difficulté, et appréciation des retours sonores lors de l'exercice statique

Figure 5.10 Score attribué à l'échelle F-SUS

Figure 5.11 Scores attribués à l'AttrakDiff

Liste des tableaux

CHAPITRE 3

Table 3.I Description of the groups of participants

Table 3.II Sound Feedback Rankings

Table 3.III Experience's Qualifiers Rankings

Table S3.3A Descriptive information of each patient

Table S3.3B Descriptive information of each healthy participants

CHAPITRE 4

Tableau 4.I Tableau récapitulatif Professionnels-experts impliqués dans le processus de conception

CHAPITRE 5

Tableau 5.I Tableau récapitulatif des profils des participants du test fonctionnel

Tableau 5.II Tableau récapitulatif des participants de l'étude *mapping*

Tableau 5.III Tableau récapitulatif rééducateurs volontaires

Liste des abréviations

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styène

AGATHE : Assistance aux Gestes et Applications THÉrapeutiques

ANOVA : ANalysis Of VAriance

ANR : Agence Nationale de la Recherche

AP-HP : Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

ATIAM : Acoustique, Traitement du signal, Informatique, Appliqués à la Musique

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

CIH : Classification Internationale des Handicaps

CIF : Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CER-SU: Comité d'Éthique de la Recherche de Sorbonne Université

CERES: Comité d'évaluation éthique pour la recherche en santé

CoMo : Collective Musical objects

e-santé : santé numérique

F.A.S.T. : Facial, Arm, Speech, Time

F-SUS : System Usability Scale version française

GPS : Global Positioning System (Géo-positionnement par satellite)

GRC-HaMCRé: Groupe de Recherche Clinique Handicap Moteur et Cognitif et Réadaptation

HAS : Haute Autorité de Santé

ICAD : International Community for Auditory Display

IMU : Inertial Measurement Unit

INSEAD : INStitut Européen d'ADMinistration des affaires

IRCAM : Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

IRB: International Review Board

ISIR : Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques

ISMM : Interaction Son Musique Mouvement

ISMES : Interfaces Sensori-Motrices Embarquées pour la Santé

ISO : International Organization of Standardization

KP : knowledge of performance

KR : knowledge of result

LED : Light-Emitting Diode (diode électroluminescente)

LIB : Laboratoire d'Imagerie Biomédicale

m-santé : santé mobile

MBEA : Montreal Battery of Evaluation of Amusia

MDF : Medium Density Fiberboard

MPR : Médecine Physique et Réadaptation

MSD : Manuel Merck de diagnostic et thérapeutique

NIHSS : National Institutes of Health Stroke Scale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PAS : Paired Associative Stimulation (stimulations couplées)

PMSI : Programme de Médicalisation des Systèmes d'Informations

PMSon : Parameter Mapping Sonification

Prado : Programme d'accompagnement du retour à domicile

RAS : Audio-Rhythmic Stimulation

SARS-CoV-2 : Severe Acute Respiratory Syndrome CoronaVirus 2

SCED: Single Case Experimental Design (méthodologie de cas unique)

SD : Secure Digital (support de carte mémoire)

SIS : Stroke Impact Scale

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer français

STMS : Sciences et Technologies de la Musique et du Son

TBI: Traumatic Brain Injury

TC : Traumatisme Crânien

tDCS : transcranial Direct Current Stimulation (stimulation transcrânienne à courant direct)

TIMP : Therapeutical Instrumental Music Performance

TMS : Transcranial Magnetic Stimulation (stimulation magnétique transcrânienne)

TRL : Technology Readiness Level

USB : Universal Serial Bus

UMR STMS : Unité Mixte Recherche Sciences et Technologies de la Musique et du Son

UX : User Experience (expérience utilisateur)

VIH : Virus d'Immunodéficience Humaine

INTRODUCTION

1. Contexte

La première référence incontournable dans la littérature internationale portant sur l'utilisation de la sonification du mouvement dans le contexte de la rééducation du membre supérieur après un accident vasculaire cérébral a été publiée en 2001 (Maulucci, 2001). Depuis cette première publication, mettant en évidence l'intérêt de la présence de retours sonores indexés au geste sur la trajectoire réalisée lors d'une tâche de pointage, des progrès techniques ont permis une amélioration de la précision de la captation du mouvement, de la synthèse sonore et de sa restitution, et plusieurs dispositifs adaptés aux particularités de ce contexte d'usage ont été développés. Des réflexions ont notamment été initiées concernant les caractéristiques des retours sonores utilisés, et le choix des paramètres de mouvement à considérer. Les résultats des études menées avec ces dispositifs suggèrent un bénéfice motivationnel pour les patients (Nikmaram, 2019), enjeu central de la rééducation. En effet, les séquelles sensori-motrices, cognitives et psycho-sociales résiduelles à la suite d'un accident vasculaire cérébral, et plus généralement d'une lésion cérébrale acquise, nécessitent un accompagnement rééducatif au long cours, dont l'efficacité dépend notamment du maintien de la motivation, qui se doit donc d'être préservée et soutenue.

Au regard des prédictions d'évolution croissante du nombre de victimes de lésions cérébrales acquises, les modalités d'accompagnement rééducatif sont susceptibles de connaître des transformations. Pour faire face à l'accroissement des besoins tout en assurant la perpétuation de soins, le développement et l'évaluation de nouvelles technologies sont encouragés. Concernant l'usage de la sonification du mouvement dans le contexte de la rééducation de nombreux questionnements perdurent. Des réflexions analogues à celles menées dans d'autres contextes applicatifs de cette technique sont actuellement au centre des préoccupations. Ainsi, une très récente revue de la littérature (Nown, 2022) a souligné le besoin de comparer différentes modalités d'interactions sonores, et la nécessité de développer des dispositifs adaptés aux profils des utilisateurs.

Ces besoins ont été au cœur de la démarche initiée au cours de ce travail de thèse.

Bénéficiant d'une expertise forgée lors de nombreux projets concernant la captation et l'analyse de gestes, et le développement d'outils interactifs pour des usages principalement artistiques (scéniques et pédagogiques), l'équipe Interaction Son Musique Mouvement (ISMM) du laboratoire de Sciences et Technologies de la Musique et du Son de l'Institut de Recherche et Coordination en Acoustique Musique (STMS-IRCAM) s'est saisie des

problématiques liées à l'apprentissage sensori-moteur à l'occasion de l'établissement d'une collaboration avec les équipes Espaces Acoustiques et Cognitifs et Perception et Design Sonores du laboratoire STMS-IRCAM, et deux autres laboratoires de recherche: l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques et le Laboratoire de Neurophysique et Physiologie dans le cadre du projet Legos bénéficiant d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (Projet Legos¹, 2010-2015).

Enrichie par cette collaboration, l'équipe s'est tournée vers les questionnements spécifiques à l'application des techniques de sonification du mouvement dans le cas de la rééducation après des lésions cérébrales acquises grâce à la mise en place d'une nouvelle collaboration avec l'équipe AGATHE (Assistance aux Gestes et Applications THERapeutiques) de l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques (ISIR), l'équipe Connectivité Neurale et Plasticité du Laboratoire d'Imagerie Biomédicale (LIB), et le service de Médecine Physique et Réadaptation de l'hôpital Pitié-Salpêtrière dans le cadre du projet ISMES (Interfaces Sensori-Motrices embarquées pour la Santé) porté par le Labex SMART (Projet ISMES², 2016-2019). A cette occasion, il m'a été possible de rejoindre le projet, à l'issue des Masters Professionnel et Recherche en Arts-Thérapies spécialisé en Musicothérapie et Santé spécialisé en Recherche Clinique en Rééducation, afin d'assurer la continuité des réflexions issues de la rencontre de domaines distincts. Les travaux initiés au cours de ce projet ont pu être poursuivis grâce à l'obtention d'une bourse doctorale assurant la perpétuation de la collaboration interdisciplinaire santé-ingénierie mise en place.

2. Objectifs et contributions

L'objectif principal de cette thèse, financée par le programme Autonomie de l'Institut Universitaire d'Ingénierie en Santé de Sorbonne Université et le projet Element (ANR Element³, 2018- 2022), était de concevoir un dispositif de sonification du mouvement adapté à un usage en autonomie supervisée s'adressant à des patients adultes présentant des séquelles de lésions cérébrales acquises, et plus particulièrement des troubles moteurs du membre supérieur, pour la poursuite de leur rééducation lors de leur retour à domicile.

Cet objectif supposait au préalable d'identifier les besoins spécifiques liés à ce contexte d'usage et les ressources les plus adaptées pour y répondre.

Ainsi, le travail de thèse s'est décliné à travers 3 objectifs.

¹ Legos: <https://www.ircam.fr/projects/pages/legos>

² ISMES Labex SMART: <http://www.smart-labex.fr/ISMES.html>

³ Element: <https://element-project.ircam.fr/>

Le premier objectif était d'évaluer l'effet de différents types de retours sonores (caractéristiques sonores et modalités d'interactions gestes-sons) sur deux tâches gestuelles : un mouvement d'antépulsion (extension du coude), et un maintien postural, avec des participants de différents profils.

Le deuxième objectif était de définir les critères de conception et de sélectionner les solutions adaptées pour la création d'un dispositif de sonification du mouvement répondant aux caractéristiques et besoins de patients présentant des séquelles motrices au membre supérieur suite à une lésion cérébrale acquise, dans la perspective d'un usage en autonomie supervisée.

Le troisième objectif était d'initier une évaluation du dispositif conçu, afin de disposer d'éléments formels permettant d'envisager une étude clinique à grande échelle.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons réalisé une première étude, à l'aide d'une méthodologie mixte, qualitative et quantitative, visant à évaluer l'effet de différents types de retours sonores lors de l'exécution d'une tâche d'extension du coude au cours d'une séance de sonification du mouvement avec des patients présentant des séquelles motrices aux membres supérieurs après une lésion cérébrale acquise et des participants sans troubles moteurs. Cette étude a fait l'objet de la rédaction d'un article, soumis au *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (chapitre 3).

Par la suite, un processus de co-conception centré utilisateurs a été mis en œuvre permettant la création et la duplication en 10 exemplaires d'un dispositif original, flexible, et peu onéreux s'adressant aux binômes patient-thérapeutes (chapitre 4).

Plusieurs modalités de couplages gestes-sons adaptées à des exercices de rééducation ont ainsi été proposées et ont fait l'objet d'une étude (chapitre 5).

Enfin, une troisième étude portant sur l'évaluation par des thérapeutes du dispositif conçu, a été initiée (chapitre 5).

Les premiers résultats obtenus ouvrent des perspectives pour mener une étude clinique à grande échelle.

La démarche et l'évolution des réflexions au cours de cette thèse sont synthétisées dans le présent manuscrit organisé en 5 chapitres répartis dans 2 sections. La première partie du manuscrit (chapitres 1 et 2) vise à esquisser le panorama actuel des enjeux convoqués par la thématique d'intérêt. La seconde partie (chapitres 3, 4 et 5) est consacrée à la description du processus de conception et des évaluations du dispositif et de son contenu menées au cours du travail de thèse.

PREMIÈRE PARTIE

Notions élémentaires

CHAPITRE 1

Les Lésions Cérébrales Acquises Non Dégénératives de l'adulte :

De l'urgence vitale à la pathologie chronique

L'objectif de ce chapitre est de présenter la diversité des pathologies regroupées sous la terminologie de lésions cérébrales acquises non dégénératives de l'adulte, et les principaux défis de leur prise en soin dans le cadre de la rééducation-réadaptation.

A travers la situation particulière des accidents vasculaires cérébraux, cause principale de lésion cérébrale acquise de l'adulte, la pluralité des troubles et le parcours de soins des patients sont décrits.

L'évocation de notions élémentaires concernant l'évolution des modèles définissant le handicap et la conception de l'autonomie permet d'esquisser certains enjeux implicites du développement de nouvelles modalités d'accompagnement rééducatif et de la conception d'outils technologiques innovants.

1. Généralités: définitions, épidémiologie, étiologie, typologies

1.1 Introduction

Les lésions cérébrales acquises non dégénératives de l'adulte regroupent l'ensemble des atteintes du cerveau survenant en dehors des périodes prénatale, périnatale et pédiatrique. Elles résultent principalement des accidents vasculaires cérébraux (AVC), traumatismes crâniens (TC), tumeurs cérébrales, infections ou encore d'une anoxie cérébrale.

A l'échelle internationale, les lésions cérébrales acquises constituent une cause majeure de perte d'autonomie (Feigin, 2010). La gravité et l'importance des séquelles en résultant varient en fonction de l'étiologie, la localisation, et l'étendue des lésions.

1.2 Les accidents vasculaires cérébraux

Initialement retrouvés dans la littérature médicale sous le terme d'*apoplexie*, suspension brutale des fonctions cérébrales, décrite par Hippocrate comme une douleur soudaine accompagnée d'une perte de la parole et du contrôle sphinctérien, la définition des accidents vasculaires cérébraux s'est précisée au fil de l'évolution de la médecine sans atteindre nécessairement un consensus international à l'heure actuelle concernant l'ensemble des acceptions qu'elle recouvre (Coupland, 2017). En effet, la définition proposée en 1970 par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) repose sur des critères symptomatologiques, les accidents vasculaires cérébraux se définissant à partir de **“signes cliniques à développement rapide d'une perturbation focale (ou globale) de la fonction cérébrale, survenant durant plus de 24 heures ou conduisant au décès, sans cause apparente autre qu'une origine vasculaire”** (Aho, 1980), tandis qu'en 2013 l'Association Américaine des accidents vasculaires cérébraux (American Stroke Association) a choisi d'inclure dans sa définition les cas d'hémorragies silencieuses, donc asymptomatiques. En France, la Haute Autorité de Santé indique qu'il s'agit de “l'arrêt brutal de la circulation sanguine au niveau d'une partie du cerveau”. Dans ce cas, l'absence d'indications temporelles ne permet pas à priori de distinguer les accidents vasculaires cérébraux constitués, des accidents ischémiques transitoires, dont les symptômes sont identiques mais dont la temporalité de survenue est réduite (de quelques minutes à quelques heures). Ceux-ci n'induisent habituellement pas de lésions cérébrales visibles sur les examens radiologiques (scanner et imagerie par résonance magnétique).

Ces choix de définitions hétérogènes impliquent des différences notables dans le référencement et l'analyse épidémiologique de ces pathologies.

Avec une incidence estimée en moyenne à 140 000 nouveaux cas chaque année en France (Pradat-Diehl, 2018), dont la majorité gardent des séquelles définitives, les accidents vasculaires cérébraux représentent la première cause de handicap acquis de l'adulte (de Peretti, 2012), la première cause de décès chez la femme et la troisième chez l'homme (Woimant, 2018).

Si ces phénomènes surviennent dans la majorité des situations chez le sujet âgé (âge moyen estimé à 73 ans), une augmentation significative des cas chez les jeunes adultes a été observée ces dernières années.

On différencie deux types d'accidents vasculaires cérébraux: les ischémies cérébrales (par un mécanisme de thrombose ou d'embolie), représentant environ 80% des cas d'AVC, liées dans la majorité des situations à l'obstruction d'une artère cérébrale et très rarement d'une veine cérébrale, et les hémorragies cérébrales résultant de la rupture d'une artère cérébrale (20% des cas d'AVC).

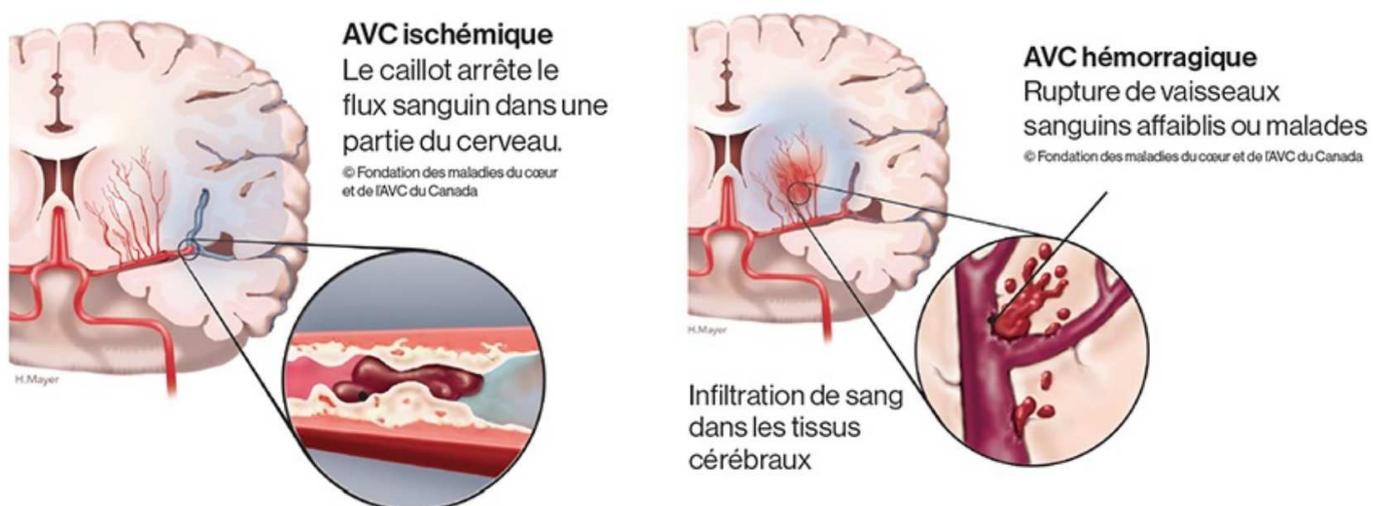


Figure 1.1 Typologie des accidents vasculaires cérébraux
(source: site canadien coeur et AVC⁴)

⁴ Source: [Types AVC](#). Site canadien coeur et avc. Consulté le 25 Juin 2022.

1.3 Les traumatismes crâniens

De manière comparable aux accidents vasculaires cérébraux, la définition des frontières délimitant avec exactitude l'ensemble des situations cliniques rencontrées dans les cas des traumatismes crâniens est complexe. Ainsi, des définitions complémentaires, traduisant une variabilité des points de vue, existent.

Selon une publication récente de Santé Publique France (Santé Publique France, 2019) le traumatisme crânien (traumatisme crânio-cérébral) se définit par "la survenue d'une blessure à la tête suite à un traumatisme fermé ou ouvert, ou suite à un phénomène d'accélération et/ou de décélération, avec:

- o Altération observée ou déclarée de l'état de conscience ou une amnésie due au traumatisme,
- o Et/ou des manifestations neurologiques ou neuropsychologiques (objectivées par examen médical) ou un diagnostic de fracture du crâne ou de lésions intracrâniennes (objectivés par des examens radiologiques ou d'autres procédures de diagnostic neurologique) qui sont consécutifs au traumatisme à la tête,
- o Ou la survenue du décès consécutive à un traumatisme à la tête ou un traumatisme crânien tel qu'inscrit sur le certificat de décès, le rapport d'autopsie ou le dossier médical rempli dans les circonstances du décès."

Les données épidémiologiques disponibles étant partielles (régionales), l'estimation du nombre de cas de traumatismes crâniens en France est plus incertaine que celle des AVC. Néanmoins, leur incidence est considérée comme comparable à celle des accidents vasculaires cérébraux (Bayen, 2012).

L'une des difficultés de recensement des cas est liée à l'hétérogénéité des parcours de prise en charge, variables en fonction de la gravité du traumatisme crânien. Trois classes de gravité sont considérées, en fonction de l'état de conscience de l'individu au moment de survenu du traumatisme, évalué avec l'échelle en 15 points de Glasgow répartis en 3 axes (l'ouverture des yeux, les réponses verbales, les réponses motrices) (Teasdale, 1974): traumatisme crânien léger (score compris entre 13 et 15), traumatisme crânien modéré (score compris entre 9 et 12), et traumatisme crânien grave (score inférieur ou égal à 8). Les traumatismes crâniens légers représentent 80% des situations, tandis que 20% des victimes présentent un traumatisme crânien modéré ou grave. Or, les traumatismes crâniens légers, du fait de symptômes initiaux pouvant être assez réduits, ne font pas systématiquement l'objet d'une consultation médicale et d'un recensement.

Survenant majoritairement lors d'accidents de la voie publique, de chutes, ou d'agressions, le profil des victimes est différent de celui des AVC avec une majorité des cas touchant les jeunes hommes adultes (de moins de 30 ans), ainsi que les jeunes enfants (de 0 à 4 ans) et les personnes âgées de plus de 65 ans.

1.4 Les tumeurs cérébrales

D'après le Manuel Merck de diagnostic et thérapeutique⁵ une tumeur cérébrale est une croissance cellulaire dans le cerveau, qui peut être de nature bénigne (non cancéreuse) ou maligne (cancéreuse).

On distingue les tumeurs primitives, dites essentielles, issues de la croissance anormale des cellules intracrâniennes ou avoisinantes, des tumeurs secondaires, métastatiques, diffusées jusqu'au cerveau depuis une autre région d'origine. Les tumeurs métastatiques sont plus fréquentes que les tumeurs primitives, et malignes.

Parmi les tumeurs primitives, les classifications rapportent plus de 140 sous-types (Bauchet, 2018). Les plus fréquentes sont les glioblastomes (croissance anormale des cellules de soutien des neurones: les cellules gliales, telles que les astrocytes, et les oligodendrocytes). En France métropolitaine, l'incidence brute des tumeurs primitives du système nerveux central (incluant donc les tumeurs cérébrales, celles affectant les nerfs crâniens et paraspinaux, et les tumeurs des méninges) a été estimée en 2018 à 15,55 / 100 000 toutes classes d'âge confondues. Il existe une légère prédominance masculine, sauf dans le cas des méningiomes qui concernent majoritairement les femmes (tumeurs affectant les méninges, membranes enveloppant le système nerveux central) (Loiseau, 2009).

Les séquelles survenant peuvent être liées aux lésions cérébrales directement induites par la tumeur, ou résultant des traitements réalisés (exérèse chirurgicale, radiothérapie,...). Par ailleurs, dans certaines situations, certaines tumeurs cérébrales sont susceptibles de provoquer une hémorragie cérébrale, qui sera elle-même associée à des lésions et séquelles particulières.

⁵ Goldman, S. (2021). Présentation des tumeurs cérébrales. Merck Manuel. [Goldman_Tumeurs_cérébrales_MerckManuel_2021](#). Consulté le 28 Juin 2022.

1.5 Les infections cérébrales

Malgré la présence d'une barrière protectrice très efficace (barrière hémato-encéphalique), des agents pathogènes (virus, bactéries, champignons ou parasites) peuvent dans certaines circonstances venir coloniser le cerveau et provoquer une inflammation nommée encéphalite, ou une méningite dans le cas d'une infection des méninges, des abcès ou kystes (neurocysticercose par exemple dans le cas du ténia), ou encore des encéphalopathies dans le cas de maladie à prion⁶.

Ces infections sont relativement rares mais potentiellement graves (Sarrazin, 2012). L'incidence de ces pathologies est variable en fonction notamment de la zone géographique où se situe l'individu et de l'agent pathogène considérés. Dans le cas des encéphalites infectieuses aiguës non consécutives au virus d'immunodéficience acquise (VIH), l'incidence était évaluée à 1,9 cas pour 100 000 habitants en France en 2007 (Stahl, 2007). Du fait de la récente épidémie de SARS-Cov-2 cette incidence est susceptible d'avoir augmenté depuis 2020 (Uginet, 2021).

Les lésions cérébrales induites peuvent être liées directement à la présence des pathogènes, ou indirectement, suite à l'effraction de la barrière hémato-encéphalique et aux cascades de réactions immunitaires engendrées. Ainsi, les séquelles potentielles seront très variables notamment en fonction du pathogène, et du processus physiopathologique mis en jeu.

1.6 Les anoxies cérébrales

Les hypoxies ou anoxies cérébrales, diminution ou privation de l'apport d'oxygène essentiel au fonctionnement cellulaire cérébral, surviennent généralement lors d'arrêt cardiaque, de défaillance respiratoire, ou d'intoxication gazeuse (monoxyde de carbone) (Billot, 2013).

Selon la cause initiale, la durée et l'intensité de l'évènement, les lésions cérébrales induites sont différentes et l'importance des déficiences difficiles à prédire avec précision (Pesquine, 2004). Néanmoins, les conséquences à long terme sur l'autonomie dans la vie quotidienne sont fréquentes (Pesquine, 2010), et une corrélation positive a été mise en évidence entre la durée du coma, l'amnésie post-traumatique et le fonctionnement dans la vie quotidienne et la qualité de vie 2 à 7 ans après l'évènement (Middelkamp, 2007).

⁶ Greenlee, J.E. (2022). Introduction aux infections cérébrales. Merck Manuel. [Greenlee_Infections_cérébrales_MerckManuel_2022](#). Consulté le 28 Juin 2022.

En France, environ 40 000 victimes d'arrêt cardio-respiratoire sont dénombrées chaque année, avec un taux de survie estimé entre 5% et 10% (Paul, 2019).

1.7 Synthèse

Chacune de ces pathologies nécessite des modalités de diagnostic et prise en charge spécifiques, avec des contraintes notamment liées au risque de létalité et de morbidité, et des particularités concernant la temporalité d'intervention.

La diversité des causes engendre une pluralité de leurs répercussions à court, moyen et long termes.

L'ensemble de ces pathologies auront toutefois en commun d'induire fréquemment des séquelles sévères affectant les sphères motrices, cognitives, et psycho-sociales, nécessitant des soins conséquents et un accompagnement à longue échéance.

Ces troubles principaux seront présentés dans le paragraphe suivant, à travers les spécificités des accidents vasculaires cérébraux, cas les plus fréquents de lésion cérébrale acquise, première cause de dépendance acquise à l'âge adulte.

Ces troubles seront mis en regard des parcours de soins typiques existant actuellement pour la prise en charge et l'accompagnement post-AVC. Malgré la persistance de disparités géographiques, grâce au Plan National d'Actions AVC mené de 2010 à 2014, les parcours de soins dans le cas des accidents vasculaires cérébraux sont plus structurés à l'échelle nationale que ceux des autres situations de lésions cérébrales acquises.

2. Principaux troubles et parcours de soin post-AVC

2.1 Introduction

Les accidents vasculaires cérébraux présentent des particularités temporelles, liés notamment aux processus neurophysiologiques et mécanisme de récupération mis en jeu, permettant de distinguer 3 phases principales (les délais présentés étant considérés à partir du jour de survenu de l'accident vasculaire): la phase aiguë, du 1^{er} au 7^e jour, la phase subaiguë, du 7^e jour au 6^e mois suivant l'accident, puis la phase chronique, après le 6^e mois (Bernhardt, 2017).

Le parcours de soins de chaque patient sera individualisé en fonction de la nature, la localisation, l'étendue et la gravité de la lésion, et de ses caractéristiques personnelles (âge, présence d'aidants dans l'entourage, adaptations possibles du milieu de vie, projet individualisé,...). Les lieux et modalités de prise en charge seront ainsi adaptés à chaque phase en fonction de l'ensemble de ces éléments contextuels.

2.2 Troubles initiaux, diagnostic, prise en charge et orientation des victimes

Les symptômes initiaux se caractérisent par leur brutalité d'apparition. Les signes les plus courants sont des troubles visuels (perte partielle ou complète de la vision), l'engourdissement ou la perte de sensibilité des membres, la faiblesse musculaire ou paralysie des membres, et les troubles du langage (compréhension et/ou élocution). Ces symptômes peuvent être accompagnés ou non de maux de tête. Les troubles initiaux sont résumés par le sigle VITE, traduction du moyen mnémotechnique anglo-saxon FAST, regroupant les principales caractéristiques et incitant à réduire au maximum le délai de réactivité pour faire intervenir des équipes spécialisées (Visage paralysé, Impossibilité à bouger un membre, Trouble de la parole) (Turc, 2018). Des signes de gravité, tels qu'une perte de connaissance, des convulsions ou une détresse respiratoire peuvent survenir dans certains cas.

La sollicitation de services d'urgences spécialisées doit permettre d'intervenir de manière efficace et le plus rapidement possible. Ainsi, face à ce tableau clinique, selon la zone géographique où les victimes se situent au moment de l'événement, une orientation vers une Unité Neuro-Vasculaire de recours ou de proximité, ou, à défaut, un service d'urgences doté d'un plateau de neuro-imagerie et d'outils de télé-médecine doit être organisée. A l'examen clinique (interrogatoire, évaluation des scores aux échelles de référence,

notamment le National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS) sont adossés des examens biologiques et radiologiques (scanner, angioscanner, tomodensitométrie de perfusion, imagerie par résonance magnétique cérébrale) permettant de confirmer et préciser le diagnostic, en distinguant notamment le type d'accident vasculaire en cours (ischémique versus hémorragique), sa localisation et son étendue. Le recueil de ces informations permet ainsi de définir les modalités d'interventions et de prise en charge.

En présence d'un accident ischémique cérébral avec un délai de survenue estimé à moins de 4h30, une thrombolyse, par injection intraveineuse d'un médicament permettant la restauration du flux sanguin, peut être pratiquée (Rosso, 2018). Dans les cas particuliers d'une occlusion artérielle proximale, la thrombolyse doit être suivie d'une thrombectomie, intervention réalisée sous contrôle radioscopique consistant au retrait mécanique du thrombus permettant ainsi la reprise de la circulation cérébrale dans la zone concernée (Mazighi, 2018). Comme dans le cas des thrombolyse, les thrombectomies sont contraintes à des critères de sélection, notamment temporels, pour pouvoir être pratiquées.

Dans le cas des accidents hémorragiques, selon l'identification de la cause de l'hémorragie, un traitement chirurgical peut parfois s'avérer nécessaire (Cébula, 2018). A minima, une surveillance approfondie en unité spécialisée de soins intensifs neurovasculaires, couplée à une action visant à réduire l'effet de traitements antithrombotiques, ont pour objectif de limiter l'expansion de l'hémorragie cérébrale et des lésions induites (Tortuyaux, 2018).

Malgré l'amélioration notable des prises en charge précoces des accidents vasculaires cérébraux, grâce notamment au doublement du nombre d'Unités Neuro-Vasculaires entre 2009 et 2017, et à la publication en 2010 d'une Recommandation de Bonne Pratique par la Haute Autorité de Santé comprenant d'une part l'organisation de campagnes publicitaires destinées au grand public pour la reconnaissance des symptômes d'alerte et d'autre part des protocoles d'applications des thrombolyse, la mortalité des victimes d'AVC au cours de la phase aiguë reste importante. En effet, d'après la base nationale de données issues du Programme de Médicalisation des Systèmes d'Informations (PMSI) 108 515 cas d'accidents vasculaires cérébrales ont fait l'objet d'une hospitalisation en 2013 (Lecoffre, 2017), parmi lesquels 31 346 décès ont été recensés, soit un taux de létalité supérieur à 28,8%.

Lorsque l'état des patients est stabilisé, le transfert vers d'autres services hospitaliers ou structures d'accueil est envisagé. A l'issue de l'hospitalisation en Unité Neuro-Vasculaires ou de soins intensifs, des évaluations sont réalisées afin de déterminer les troubles présentés par les patients et leur sévérité.

2.3 Principaux troubles suite à la phase aiguë, et parcours de soins

Outre l'hémiplégie (trouble moteur) et l'aphasie (trouble du langage), très fréquemment rencontrées dans les suites d'un accident vasculaire cérébral, de nombreux troubles peuvent survenir. Certains sont visibles, d'autres invisibles, certains réversibles ou compensables, d'autres durables. En cas de persistance dans le temps malgré la rééducation, ces déficits résiduels sont considérés comme des séquelles de la lésion.

La nature des troubles dépend du type d'accident vasculaire et de la localisation de la lésion (territoire vasculaire / aires cérébrales et réseaux neuronaux concernés), et la sévérité dépend de l'étendue de la lésion.

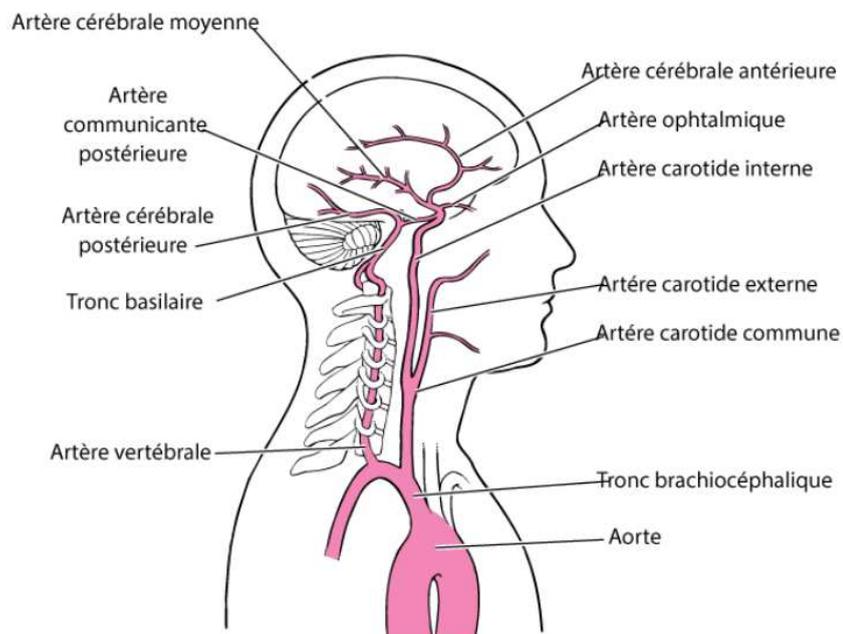


Figure 1.2 Vascularisation cérébrale
Vue latérale, côté droit
(reproduit de Manuel Merck ⁷)

⁷ Source: Manuel Merck.

[Troubles Neurologiques AVC Manuel Merck](#) Consulté le 03 Juillet 2022

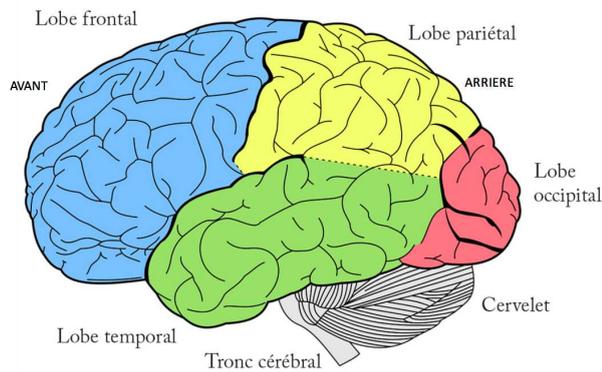


Figure 1.3a Lobes cérébraux
Vue latérale, hémisphère cérébral gauche

Source ⁸

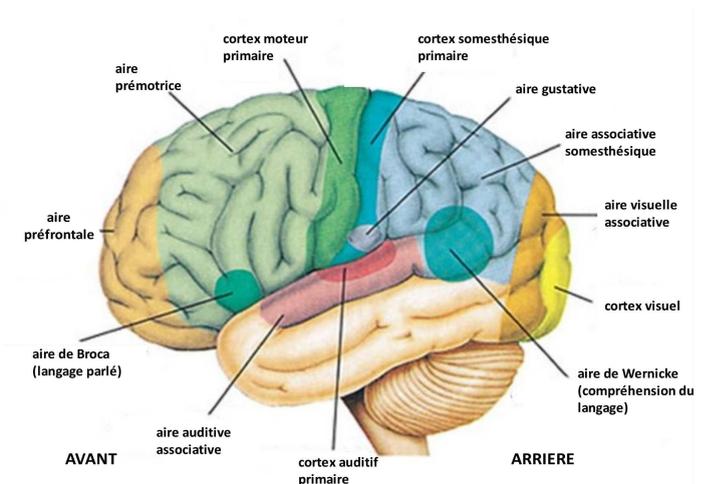


Figure 1.3b Principales aires cérébrales et organisation corticale
Vue latérale, hémisphère cérébral gauche

(Adaptée de S. Iceta, issue de Nohales, 2015)

2.3.1 Troubles physiques

2.3.1.1 Troubles moteurs

Les lésions cérébrales post-AVC induisent des troubles moteurs qui concernent l'hémicorps opposé à celui de la localisation de la lésion du fait de la décussation (croisement) des voies nerveuses au niveau du bulbe rachidien.

Les structures cérébrales impliquées dans la motricité sont nombreuses. Le cortex moteur primaire (commande directe de l'exécution des mouvements), le cortex prémoteur (intégration des informations sensorielles), et l'aire motrice supplémentaire (planification des mouvements complexes et coordination des mouvements bimanuels), agissent en synergie avec les structures sous-corticales (notamment la thalamus et les ganglions de la base, en lien avec les autres aires cérébrales) et le cervelet, afin d'assurer la fonctionnalité de la motricité volontaire. Ainsi, après un AVC, l'atteinte centrale et les déficits de la voie cortico-spinale vont induire des troubles de la fonction motrice.

Les troubles moteurs les plus fréquents concernent la commande motrice: les patients présentent un déficit complet (hémiplégie) ou un déficit partiel de la commande musculaire (hémiparésie) controlatérale à la localisation de la lésion cérébrale (Raghavan, 2015). La sévérité de l'atteinte suit un gradient proximo-distal par

⁸ Source: Clinique TCNF
[Neurologie fonctionnelle](#) Consulté le 03 Juillet 2022

rapport à l'axe du corps (colonne vertébrale), à savoir dans le cas des membres supérieurs, la paralysie est plus importante au niveau des doigts et de la main qu'au niveau du bras et de l'épaule. Le tableau clinique varie en fonction du territoire vasculaire impliqué: en cas de lésion survenant sur le territoire de l'artère cérébrale antérieure les patients présentent principalement une hémiplégie sensitivo-motrice prédominante au membre inférieur, en cas de lésion de l'artère sylvienne ou artère cérébrale moyenne survenant sur le territoire superficiel les patients présentent une hémiplégie et/ou hémiparésie sensori-motrice brachio-faciale, et si celle-ci concerne le territoire profond les patients présentent une hémiplégie ou hémiparésie motrice pure (sans déficit sensitif) et proportionnelle (membres supérieurs et inférieurs) (Morand, 2014).

Par ailleurs, la synchronisation des couplages de contractions des muscles agonistes et relâchement des muscles antagonistes peut être troublée, empêchant la coordination et la réalisation de mouvements fluides. De plus, des mouvements parasites, non contrôlés, peuvent apparaître (syncinésies).

Des troubles de la régulation du tonus musculaire, notamment liés à l'altération du contrôle inhibiteur descendant des réflexes spinaux, engendrent une hypertonie pyramidale (voie dédiée à la motricité) caractérisée par une augmentation du réflexe tonique d'étirement: phénomène de spasticité (HAS, 2012).

L'ensemble de ces troubles conduisent à une perte de fonctionnalité de la marche lorsqu'ils concernent le membre inférieur, et de la **préhension (de l'atteinte de l'objet, à sa manipulation après saisie) concernant le membre supérieur, avec une conséquence sur l'ensemble des tâches bimanuelles. Les troubles moteurs post-AVC sont donc une cause majeure de dépendance, affectant de nombreuses activités de la vie quotidienne. L'hémiparésie du membre supérieur, fréquente, est particulièrement invalidante.**

2.3.1.2 Troubles sensitifs

De manière comparable aux troubles moteurs, les lésions cérébrales post-AVC induisent des troubles sensitifs qui concernent l'hémicorps opposé à celui de la localisation de la lésion.

Les troubles sensitifs sont multiples et concernent la sensation du toucher (trouble de la perception du contact de la peau, perte de l'identification de la localisation et pression exercée), de la température (perte de la distinction du chaud et du froid), de la douleur, et les

troubles de la proprioception (Kessner, 2019). La proprioception permet de disposer à tout moment d'informations sur les positions des segments corporels les uns par rapport aux autres, et dans l'espace (Laskowski, 2000). Ces informations participent à la représentation du corps de l'individu (schéma corporel) et sont indispensables à la **préhension** et au maintien de l'équilibre, à la préparation de l'action et la supervision de son déroulement correct. Les troubles sensitifs ont un impact majeur sur l'autonomie du patient (Klockenbring, 2021).

2.3.1.3 Troubles sensoriels

Des troubles sensoriels visuels (Chokron, 2013), **auditifs** (Silva, 2021), olfactifs (dysosmie, hyposmie, anosmie) (Cecchini, 2012) ou encore gustatifs (dysgueusie, hypogueusie, agueusie) (Moo, 1999) peuvent survenir après un accident vasculaire cérébral. Ces troubles concernent la détection des signaux transmis par les organes sensoriels aux aires corticales dédiées. Si les troubles visuels sont régulièrement décrits, et font l'objet de dépistages, les troubles concernant les autres sens sont plus rares, et ne font pas l'objet d'investigations systématiques. De surcroît, il peut être complexe de distinguer les troubles sensoriels d'origine centrale (détection du signal sensoriel), des troubles perceptifs ou cognitifs liés au traitement des signaux mettant en jeu des réseaux neuronaux (par exemple la négligence spatiale unilatérale, ou l'agnosie auditive) (Platel, 2009). Ces troubles ont des répercussions variables: les troubles visuels peuvent notamment affecter la récupération de la marche et la rééducation du membre supérieur en limitant le recours possible à cette source d'informations à laquelle les patients développent une dépendance particulière (Bonan, 1996).

2.3.1.4 Troubles de l'équilibre et du maintien postural

Les stratégies d'équilibration reposent sur l'intégration centrale des informations proprioceptives, vestibulaires et visuelles (Fourtassi, 2014). En cas de troubles affectant un ou plusieurs de ces systèmes d'informations des troubles de l'équilibre peuvent survenir (Yelnik, 2021a, 2021b). En effet, le phénomène de latéropulsion, inclinaison latérale du corps liée à un référentiel d'alignement vertical erroné du fait des troubles vestibulaires, est fréquemment décrit chez les patients après un AVC. Ce trouble du maintien postural altère l'équilibre (Dai, 2021). De surcroît, les déficits moteurs concomitants ne permettent pas de réajuster correctement et efficacement la posture dans un délai restreint. Ainsi, le risque de chute résultant est important, tout particulièrement au stade précoce de la rééducation

(Yelnik, 2004). Ces troubles ont un impact sur la qualité de vie des patients au quotidien (Park, 2019).

2.3.1.5 Troubles vésico-sphinctériens

Les troubles vésico-sphinctériens, et notamment l'incontinence urinaire, sont très fréquents en phase aiguë post-AVC, mais une résolution spontanée est constatée dans la majorité des cas au cours des premiers mois après l'accident (Caremel, 2012; De Sèze, 2012).

Outre la majoration des risques infectieux qui en découle, du fait de l'altération de l'autonomie et de la qualité de vie des patients (Ruffion, 2007), ainsi que la charge potentielle non négligeable pour les aidants, en cas de persistance des troubles malgré la rééducation, les traitements pharmacologiques et d'éventuels recours chirurgicaux, les troubles vésico-sphinctériens sont susceptibles de retarder le retour à domicile lorsque celui-ci est possible (Delleci, 2015).

2.3.2 Troubles cognitifs

Fréquents et d'intensité variable, les troubles cognitifs peuvent être isolés ou multiples, et associés ou non à des troubles moteurs.

Parmi les patients hospitalisés après un AVC, la prévalence des troubles cognitifs est estimée à 50%, avec une sévérité légère dans $\frac{2}{3}$ des cas et importante dans $\frac{1}{3}$ des cas (Barbay, 2018). Des évaluations neuropsychologiques sont nécessaires pour distinguer la nature des troubles et déterminer leur association avec des troubles de l'humeur (notamment les situations de dépression), du comportement et de la cognition sociale.

2.3.2.1 Troubles de l'attention

En 1890 le psychologue américain William James a proposé de définir l'attention comme « la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles. Focalisation, concentration, conscience font partie de son essence. Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres. » (Ferrel-Chapus, 2010).

La mobilisation attentionnelle est un prérequis à toute activité cognitive volontaire.

A partir des critères d'intensité et de sélectivité proposés par le modèle de Van Zomeren et Brouwer (Van Zomeren, 1994), plusieurs types de processus attentionnels peuvent être distingués: l'alerte (mobilisation rapide des capacités attentionnelles), l'attention soutenue (maintien de l'attention sur une longue durée), l'attention sélective ou focalisée (extraction et

traitement de la source d'information jugée pertinente parmi des sources multiples de distraction, grâce à la filtration), ou encore l'attention divisée ou partagée (capacité à mobiliser des ressources attentionnelles dirigées vers deux objets simultanément) (Masson, 2011). Les ressources attentionnelles mobilisables sont considérées comme limitées. Ainsi, les tâches d'attention divisée sont particulièrement coûteuses. Les performances lors de la réalisation de plusieurs tâches simultanées dépendent notamment du degré d'expertise et du niveau d'interférence entre les tâches (Kahneman, 1973).

Suite à une lésion cérébrale, la limitation des ressources attentionnelles mobilisables conjointe aux phénomènes de fatigabilité, et à la plus grande distractibilité, s'érigent comme des obstacles aux processus attentionnels. Les patients sont donc susceptibles de présenter une augmentation des délais de réponse aux stimulus (détérioration de la vitesse d'activation de l'alerte), une réduction de la durée du maintien de l'attention soutenue, une altération de la focalisation sur une tâche d'attention sélective, et une grande difficulté voire une impossibilité à réaliser conjointement deux tâches simultanément.

Les troubles de l'attention sont à mettre en regard avec les troubles mnésiques et les troubles dyséxécutifs, auxquels ils sont souvent associés. Un déficit attentionnel peut notamment être un frein à l'encodage d'informations pour leur mémorisation, ou à la prise correcte d'informations permettant de réajuster une action (système de supervision attentionnel exécutif).

2.3.2.2 Troubles mnésiques

Les troubles mnésiques retrouvés suite à un AVC concernent essentiellement la mémoire de travail (Lugtmeijer, 2021), permettant de stocker et manipuler à court terme des informations, la mémoire antérograde sémantique et épisodique, dédiée à l'acquisition de nouvelles connaissances et de nouveaux souvenirs après l'accident (Lim, 2009), et la mémoire prospective concernant la mémorisation d'informations en lien avec des projets futurs (prise de rendez-vous par exemple) (Hogan, 2020). A l'inverse, la mémoire procédurale, mémoire implicite non déclarative permettant l'exécution automatique de gestes, semble relativement peu altérée. Les mémoires rétrogrades sémantique (connaissances acquises avant l'accident) et épisodique (souvenirs) semblent également relativement bien préservées.

2.3.2.3 Troubles des fonctions exécutives

Les fonctions exécutives regroupent un ensemble de capacités permettant d'élaborer un projet, de planifier une action, de superviser son déroulement et de se réajuster en fonction de l'évolution du contexte et du degré d'adéquation entre le résultat obtenu et le but recherché, en inhibant des automatismes et en générant des alternatives (flexibilité) (Roussel, 2019).

Le syndrome dysexécutif post-AVC concernerait plus de la moitié des patients, avec un sur-risque dans le cas des hémorragies cérébrales (Roussel, 2016).

Le séquençage des étapes et le contrôle de leur exécution est souvent altéré chez les patients suite à un AVC (Azouvi, 2009). Un manque de flexibilité dans les stratégies adoptées induit des persévérations malgré la non adéquation du résultat obtenu avec la finalité de l'action.

Les troubles dysexécutifs sont susceptibles d'interférer avec toutes les activités de la vie quotidienne (Godefroy, 2017).

2.3.2.4 Troubles praxiques

Non liés à une atteinte sensorimotrice, un trouble de la compréhension ou un déficit intellectuel, les troubles praxiques concernent la reconnaissance et l'imitation de gestes, et l'utilisation d'objets (De Renzi, 1989). Des controverses existent concernant les définitions et classifications des apraxies, du fait notamment du polymorphisme que ces troubles peuvent revêtir et de l'attribution d'une ou plusieurs causalités explicatives, ce qui complexifie leur modélisation (Baumard, 2021). Plusieurs voies pourraient être impliquées dans chacune des situations (imitation de gestes abstraits ou symboliques, utilisation d'objets). Dans le cas de l'utilisation d'objets, 3 types de connaissances pourraient ainsi être impliquées: des connaissances conceptuelles portant sur l'utilisation prototypique d'un objet (exemple: un couteau sert à couper du pain), des connaissances conceptuelles sur l'utilisation pratique (exemple: il faut diriger la lame dentée du couteau vers le pain et réaliser des mouvements oscillants d'avant en arrière), et des connaissances sensorimotrices (engrammes gestuels) portant sur la manipulation effective des objets (Le Gall, 2012).

Les troubles praxiques sont susceptibles de causer des difficultés dans la réalisation des activités de vie quotidienne, telles que l'habillage, les soins d'hygiène, ou encore l'alimentation, et peuvent dans certains cas mettre en danger le patient du fait d'une utilisation inadéquate de certains objets.

2.3.2.5 Troubles visuo-spatiaux

La négligence spatiale unilatérale survient principalement dans le cas d'une lésion hémisphérique droite, plus particulièrement en cas de lésion étendue du lobule pariétal inférieur (Azouvi, 2017). Ce trouble se caractérise par un phénomène d'ignorance ou d'oubli des informations et stimuli situés dans l'espace gauche, ignorance qui peut parfois également concerner la partie gauche du corps du patient. Les risques de collisions ou de chute lors des déplacements sont accrus du fait de la non prise en compte des obstacles et dangers se présentant par la gauche. Ce trouble peut notamment gêner la récupération d'une marche sécurisée, mais également la lecture ou l'écriture. Il induit des prolongements des durées d'hospitalisation et des risques de détérioration de l'état du patient après son retour à domicile (Jehkonen, 2006a).

2.3.2.6 Agnosies et anosognies

Les agnosies sont des troubles rares du traitement perceptif et associatif des sensations élémentaires, liés à des lésions des aires associatives, principalement des cortex pariétal et occipital⁹. Les agnosies se distinguent des troubles sensoriels centraux évoqués précédemment, qui sont quant à eux liés à des atteintes de la réceptivité corticale des aires primaires dédiées à chaque sens. Les agnosies peuvent être isolées (visuelle, auditive, gustative, olfactive, somatosensorielle) ou combinées (visuo-auditive). Ces troubles se caractérisent par l'impossibilité d'identifier et reconnaître un objet (par sa forme, sa sonorité, son goût...).

Pour chaque sens, différents types d'agnosie existent. **Concernant l'agnosie auditive, il est possible de différencier des troubles portant sur les sons verbaux des troubles portant sur les sons musicaux.** La surdité verbale est liée au déficit de traitement cérébral des sons verbaux comme les phonèmes. Le trouble de reconnaissance ne touche alors pas la discrimination des sons de l'environnement (surdité cérébrale ou centrale). La surdité verbale peut être isolée ou associée à un trouble du langage. **Dans le cas particulier d'un trouble concernant les sons musicaux, l'agnosie auditive est appelée amusie** (Vignolo, 2003; S rk mo, 2010; Hirel, 2014). **Elle se définit comme un trouble spécifique de la perception, compréhension et production musicale, respectivement amusie réceptive et amusie expressive** (Nunes-Silva, 2013).

⁹ Huang, J. (2021). Agnosie. Manuel Merck. [Agnosie](#) Consulté le 07 Juillet 2022.

L'anosognosie, retrouvée principalement suite à une lésion du lobe pariétal droit, se distingue des agnosies. Elle concerne l'absence de conscience du patient (ou une conscience partielle) des troubles dont il est atteint (Jehkonen, 2006b).

Ce trouble, pouvant faire obstacle à l'adhésion thérapeutique du patient, est susceptible d'entraver l'accompagnement rééducatif.

2.3.2.7 Troubles du langage

Les troubles du langage peuvent concerner l'oral ou l'écrit (lecture et écriture). Parmi les troubles du langage on distingue notamment les aphasies, les dysarthries, les agraphies et les dysgraphies. Deux grands aspects sont à considérer: la production (fluence) et la compréhension.

Les aphasies surviennent principalement en cas de lésions localisées dans les aires spécialisées des fonctions linguistiques de l'hémisphère dominant (hémisphère gauche pour les droitiers, hémisphère droit pour les gauchers), avec une fréquence plus élevée en fonction de la sévérité de la lésion, l'âge du patient, et une prédominance chez les femmes (Denier, 2018). Parmi les nombreux types d'aphasies existantes, les classifications reposent sur la mise en regard de la localisation de la lésion, mise en évidence à l'imagerie (principalement aire de Broca et aire de Wernicke), et du tableau clinique (fluence, compréhension). Ainsi, par exemple un trouble de la fluence sans trouble de la compréhension oriente vers une aphasie de Broca, à l'inverse un trouble de la compréhension sans altération de la fluence oriente vers une aphasie de Wernicke. Les autres types d'aphasies sont notamment les aphasies anomique, de conduction, transcorticale, globale, ou encore mixtes.

Environ 50% des patients présentent des troubles du langage 18 mois après un AVC, malgré une régression des troubles spontanément et via la rééducation (Laska, 2001). La persistance de ce trouble limite grandement la participation sociale des patients, et altère leur qualité de vie (Lee, 2015).

2.3.3 Troubles psycho-sociaux

Suite à un accident vasculaire cérébral, les patients peuvent présenter des troubles du comportements, tels que des troubles de l'inhibition, par défaut ou par excès (désinhibition versus apathie), des troubles de l'humeur, avec notamment une labilité émotionnelle, parfois une hyper-émotivité et un déficit de contrôle de l'expression émotionnelle, et des crises d'angoisses (Ferro, 2009; Cosin, 2016; Ferro, 2019). Ces troubles peuvent avoir un impact sur la motivation des patients au cours de leur rééducation.

La dépression post-AVC concernerait 30 à 50% des patients (Pinoit, 2006; Daviet, 2002). Les troubles dépressifs peuvent être liés directement aux lésions, du fait d'une vulnérabilité neurobiologique (Spalletta, 2006), ou être la conséquence de la prise de conscience des répercussions des lésions dans la vie quotidienne, et notamment de la perte d'autonomie. Aussi, les troubles dépressifs peuvent apparaître après un délai temporel. S'ils surviennent majoritairement entre 3 et 6 mois après l'accident, un risque élevé persiste pendant 3 ans (Thomas, 2017). Le diagnostic et la surveillance de ces troubles sont primordiaux. En effet, d'une part la dépression est susceptible de limiter la récupération fonctionnelle, de réduire la participation sociale, et d'exacerber la perte d'autonomie (Ayerbe, 2014), d'autre part, le risque de suicide est accru, notamment pour les patients de moins de 50 ans (Teasdale, 2001).

En présence de troubles cognitifs, ou face à une incohérence entre le bilan fonctionnel et les activités effectives réalisées par le patient, un bilan neuropsychologique s'impose afin d'identifier l'éventualité d'un trouble dépressif.

Par ailleurs, des difficultés dans la reconnaissance et l'identification des émotions d'autrui, et des troubles des habiletés pragmatiques de communication (identifier l'ironie, les sous-entendus, s'adapter aux connaissances d'autrui) peuvent exister (Bertrand-Gauvin, 2014). Ces troubles de la cognition sociale sont susceptibles de renforcer encore un peu plus l'isolement des patients et freiner leur réinsertion professionnelle lorsque celle-ci est envisageable.

2.3.4 Orientation des patients

Selon les conclusions des évaluations et les structures d'accueil existantes à proximité du domicile du patient et de ses proches, les patients peuvent être orientés en service de Médecine Physique et Réadaptation, en service de Soins de Suite et Réadaptation spécialisé (affections du système nerveux) ou polyvalent, en service de Soins Longue Durée, dans des établissements médico-sociaux tels que les Maisons d'Accueil Spécialisées, les Foyers d'Accueil Médicalisés ou encore des Établissements d'Hébergement de Personnes Âgées Dépendantes. Dans certains cas, un retour à domicile avec une prise de relais par la médecine de ville peut être organisé.

La Haute Autorité de Santé a réalisé en 2020 une fiche de Recommandations de Bonne Pratique présentant les parcours de soins indiqués en fonction des 4 catégories de situations décrites par la Société Française de Médecine physique et Réadaptation (SOFMER) (HAS, 2020)

L'accompagnement et la prise en charge rééducative dans des services spécialisés et multidisciplinaires, avec des thérapeutes disposant d'une expertise spécifique, améliorent la

récupération fonctionnelle des patients, et ainsi leur indépendance (Ministère de la Santé et des Sports, 2009; Langhorne, 2020).

Des disparités territoriales et des inégalités sociales liées notamment à l'âge et la condition économique des individus existent, avec des conséquences importantes sur le devenir fonctionnel, et donc la qualité de vie au quotidien des patients (Broussy, 2019a, 2019b; Allain, 2022).

3. Principes et méthodes principales de rééducation

3.1 Bases physiopathologiques de la récupération spontanée: pénombre, diaschisis et plasticité cérébrale

Lors de la survenue d'un accident vasculaire cérébral, en périphérie du site lésionnel se trouve une zone dite de pénombre (Donnan, 2007). Les tissus péri-lésionnels sont hypoexcitables, du fait d'un environnement riche en neurotransmetteurs inhibiteurs. Si la prise en charge en urgence permet de restaurer la perfusion sanguine dans la zone de pénombre avant sa nécrose, le tissu pourra être préservé et ses fonctions restaurées après un délai de quelques jours.

De manière comparable, le diaschisis correspond à une zone corticale à distance de la lésion mais fonctionnant en réseau avec le site lésionnel. Cette zone sera également temporairement dysfonctionnelle à la suite de l'accident.

Après l'AVC, une phase de récupération spontanée a lieu grâce à la levée de la pénombre, et la régression du diaschisis, via la réduction progressive de l'inhibition.

Ce phénomène de restitution est parallèle à la plasticité cérébrale, qui est majorée de manière transitoire après un AVC. Cette phase a lieu principalement dans les premiers mois après l'accident (Béjot, 2011), et dépend notamment des stimulations et de la richesse de l'environnement (Quintaine, 2018)

La plasticité cérébrale correspond à la capacité de remodelage des réseaux neuronaux au cours du temps, en fonction du contexte environnemental et des expériences de l'individu. Différents types de plasticité existent, variables en fonction du contexte. Indispensable à la maturation cérébrale pendant l'enfance (plasticité développementale), ce processus assure l'apprentissage, et permettrait également de limiter la perte fonctionnelle induite par une lésion cérébrale. Ainsi, après un AVC, plusieurs mécanismes pourraient intervenir dans la récupération fonctionnelle, notamment le remodelage anatomique et fonctionnel des réseaux neuronaux, tels que la synaptogenèse et l'optimisation de l'efficacité synaptique. Grâce à une réorganisation corticale, des zones adjacentes à la lésion sont susceptibles d'être recrutées et d'assurer les fonctions supportées auparavant par la zone lésée, via une substitution (Ward, 2011; Favre, 2014).

3.2 Récupération induite: principes et techniques de rééducation-réadaptation

La rééducation est susceptible de stimuler et guider la neuroplasticité pour favoriser la récupération fonctionnelle après un AVC (Johansson, 2011; Maier, 2019).

Néanmoins, des interrogations subsistent à l'heure actuelle concernant la temporalité précise (choix du moment de début et de fin de la prise en charge), l'intensité (Cooke, 2010), et particulièrement les méthodes et techniques à privilégier. En effet, si l'efficacité de la rééducation a fait ses preuves, les méta-analyses de la littérature ne permettent pas d'identifier la plus-value notable d'une technique particulière (HAS, 2012; Pollock, 2014).

A ce jour, quelques principes régissent la rééducation-réadaptation: l'initiation précoce de la rééducation dans les premiers jours suivants l'accident (Coleman, 2017), une intensité graduelle (en moyenne 3h par jour à raison de 5 jours par semaine pendant la phase subaiguë, avec un niveau de difficulté progressif), la répétition des exercices, et la continuité de l'accompagnement dans le temps.

Concernant plus particulièrement la prise en charge rééducative du membre supérieur hémiparétique, plusieurs techniques de rééducation, conventionnelles et innovantes, existent: la mobilisation passive, le renforcement musculaire, les étirements, l'entraînement sur une tâche orientée vers un but (task oriented/goal oriented) (Rensink, 2009; Thant, 2019), la thérapie par contrainte induite (Peurala, 2012), la thérapie miroir (Ramachandran, 2009; Thieme, 2018), la thérapie par observation de l'action et l'imagerie motrice (Ertelt, 2007; Kim, 2015), le recours aux feedback et retours sensoriels (neurofeedback et biofeedback Van Vliet, DR, 2006, Subramanian, NRR, 2010), l'utilisation d'outils robotiques et d'exosquelettes (Taveggia, 2016; Daunoraviciene, 2018), ou encore la thérapie virtuelle et les "jeux sérieux" (serious games) (Laver, 2017).

Ces méthodes peuvent être complétées par des techniques de stimulations cérébrales non invasives (Brihmat, 2019), telles que la stimulation magnétique transcrânienne (TMS), l'électrostimulation (tDCS, stimulation transcrânienne à courant direct), ou la stimulation associée couplée (PAS), dans le but de favoriser la plasticité cérébrale (Su, 2020). La thérapie cellulaire est également une voie prometteuse faisant actuellement l'objet d'investigations (Detante, 2014).

Ainsi, la prise en charge en rééducation-réadaptation peut améliorer la récupération du déficit moteur du membre supérieur (Oujamaa, 2009).

Néanmoins, des déficits peuvent persister au-delà de la phase subaiguë, malgré un suivi rééducatif intense. Le déficit moteur séquellaire est considéré comme stable et chronique à partir du 6e mois (Langhorne, 2011).

Selon les situations, un retour à domicile peut être organisé en prévoyant notamment des aménagements du domicile, sinon, une institutionnalisation peut-être envisagée.

3.3 Spécificités de la phase chronique et du retour à domicile

Lorsque celui-ci est possible, le retour au domicile après l'hospitalisation est un moment clé, générateur d'émotions contrastées pour les patients et leur famille (Morin, 2009). En effet, l'enthousiasme de retrouver les repères du domicile et de la vie précédent l'accident peut être amoindri par l'inquiétude de l'inadaptation et la prise de conscience des déficits résiduels altérant l'autonomie (Chazot-Balcon, 2019; Gustafsson, 2013; Connolly, 2018). Cette période d'incertitude, bien qu'anticipée lors de la préparation de la sortie d'hospitalisation, nécessite une adaptation importante pour le patient et ses proches, et les risques de détérioration fonctionnelle et d'isolement social, avec un impact important sur la qualité de vie, ne sont pas négligeables.

Depuis 2017, un programme d'accompagnement du retour à domicile (Prado) après une hospitalisation pour un accident vasculaire cérébral peut être proposé. Ce service, en cours de déploiement sur le territoire, doit notamment pallier à l'insuffisance de recours aux soins de ville après un AVC.

Parallèlement à ces constats, l'intérêt de la **poursuite de la rééducation en phase chronique** a longtemps été questionnée, notamment du fait de la moindre plasticité cérébrale 6 mois après l'accident, bien que des équipes spécialisées aient développé des méthodes et outils spécifiques (Bourgeois, 2010; Gracies, 2016; Bonnyaud, 2017).

Se saisissant des enjeux de ce questionnement, la Haute Autorité de Santé a très récemment publié une Recommandation de Bonne Pratique dont les conclusions valident la nécessité de **“proposer un programme de rééducation adapté et suivi, aussi bien pour le membre inférieur que pour le membre supérieur, aux personnes présentant des séquelles d'une paralysie initiale au-delà de six mois après un accident vasculaire cérébral”** (HAS, 2022).

Concernant les méthodes de rééducation de la fonction motrice préconisées, des recommandations de grade B (présomption scientifique) ont été attribuées à l'utilisation des biofeedback externes et à la réalité virtuelle, incitant donc à développer les dispositifs permettant d'y recourir.

Dans le cas de la phase chronique, les objectifs principaux seront donc notamment la lutte contre la détérioration de l'état des patients, tant d'un point de vue fonctionnel que psychique, le maintien des acquis obtenus lors de la phase subaiguë de rééducation intensive, et la mise en place de stratégie d'adaptation compensatoire, afin de limiter leur dépendance dans les activités de vie quotidienne.

Chez les patients en âge de travailler se pose également la question de la réinsertion professionnelle. Les critères pris en considération n'étant pas homogènes, l'estimation de la fréquence de reprise du travail est très variable dans la littérature: de 11% à 85% selon une étude française de 2006 (Schnitzler, 2006), environ 25% selon une étude suisse datant de 2011 (Annoni, 2011), de 41% à 6 mois post-AVC et de 66% entre 2 ans et 4 ans après l'AVC selon une étude canadienne (Edwards, 2017). Parmi les freins à la réinsertion professionnelle, l'accessibilité au lieu d'exercice professionnelle, et les troubles cognitifs semblent prépondérants, mais peuvent dans certains cas être palliés grâce à l'aménagement du poste et du temps de travail.

4. Auto-rééducation et Télé-Rééducation: l'ère de l'e-Santé

4.1 Contexte et définitions

Du fait de l'incidence croissante des lésions cérébrales acquises dans la population et de la réduction du taux de létalité grâce à l'amélioration de la prise en charge en phase aiguë, une augmentation importante du nombre de victimes concernées par des séquelles au long cours est à prévoir dans les prochaines années (Wafa, 2020). Aussi, l'accroissement de la nécessité de recourir à la rééducation, conjointe aux contraintes d'équilibre budgétaire imposant des limitations du nombre de places hospitalières et du nombre de thérapeutes, auront pour conséquence un temps réduit pour les soins dédié à chaque patient. Cette projection concernant l'évolution prévisible des contraintes exercées sur la qualité des soins requiert de développer des compléments et alternatives aux prises en charge habituelles, avec le souci de préserver voire d'améliorer l'accompagnement de chaque patient, et l'ambition de réduire les inégalités d'accès décrites actuellement.

Le développement depuis les années 1990 des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans le champ de la santé (e-santé ou santé numérique) a ouvert de nouvelles perspectives (Dupagne, 2011).

La e-santé est définie comme "un ensemble d'outils communicants qui renforcent la possibilité pour le patient d'accéder à des soins de qualité et d'être un acteur éclairé de la gestion de sa santé ; [l'e-santé] améliore conjointement l'accès des soignants et l'accès des patients à une information fiable et modifie les équilibres entre soignants et soignés" (Eysenbach, 2001). Source potentielle de renforcement de la maîtrise de sa santé (empowerment), l'e-santé, à l'origine du développement de la télémédecine et de nombreux outils mobiles (m-santé), suscite l'innovation tout en soulevant des enjeux sur les ajustements à trouver dans cette mise en question de l'équilibre relationnel

soignés-soignants, entre l'ancien modèle décrit comme paternaliste et les risques potentiels de glissement des responsabilités, ainsi que sur la gestion et la sécurité des données de santé (connaissances et données personnelles) (Perroy, 2016).

Suite à une lésion cérébrale acquise, les patients peuvent être encouragés à compléter ou prolonger les temps de rééducation en présence des thérapeutes en réalisant des exercices de rééducation en autonomie en dehors des temps institutionnels dédiés, afin de maintenir ou renforcer leurs acquisitions. L'auto-rééducation consiste au choix et à la prescription par les thérapeutes d'un ensemble d'exercices quotidiens réalisés et répétés par les patients en autonomie à leur domicile (Ghorbel, 2020). Les exercices peuvent être supervisés par les thérapeutes lors de bilans réguliers ou à distance via des dispositifs de télé-rééducation. La télé-rééducation est définie comme l'ensemble des services de rééducation-réadaptation proposés via des technologies de l'information et de la communication (Brennan, 2010). A ce jour, les préconisations concernant leur utilisation ne sont pas uniformes en fonction des lieux d'accompagnement et de l'expertise des thérapeutes.

La poursuite de la rééducation en phase chronique et les modalités de télé-rééducation posent conjointement la question de l'observance thérapeutique, de l'adhésion et de la motivation des patients.

En effet, l'un des grands défis de la rééducation-réadaptation, tout particulièrement dans le cas des pathologies conduisant à des séquelles au long cours, et donc à une chronicisation de la situation, est de susciter et maintenir dans le temps la motivation des patients dans l'objectif, si ce n'est d'améliorer la récupération fonctionnelle, tout du moins, de lutter contre les complications induites par une potentielle détérioration.

De nombreuses théories existent pour définir la motivation qui désigne "le processus psychologique responsable du déclenchement, du maintien, de l'entretien ou de la cessation d'une conduite" (Encyclopédie Universalis). En fonction de la source de motivation, et de la situation et intention de l'individu, plusieurs types de motivation peuvent être distingués (Ryan, 2000), regroupés selon deux grandes catégories: la motivation intrinsèque (initiée par l'individu) et la motivation extrinsèque (initiée par un élément extérieur).

Les lésions cérébrales sont susceptibles d'affecter directement les processus motivationnels, qui peuvent également être fragilisés par la prise de conscience des séquelles et le processus de deuil auquel le patient sera confronté. L'émergence et le maintien de la motivation nécessite donc la création d'un environnement et contexte propices, possiblement médié par l'accompagnement proposé par les thérapeutes parallèlement à l'identification et la formulation d'un projet personnalisé.

Si l'observance thérapeutique concerne l'adéquation entre la prescription du thérapeute et le comportement du patient, l'adhésion thérapeutique suppose quant à elle l'implication du patient dans les choix de modalités thérapeutiques mises en œuvre, fruit d'une alliance organisée autour d'un projet partagé, et se distingue ainsi d'une situation de compliance associée à la connotation de soumission (Lamouroux, 2005). L'adhésion thérapeutique, produit et ressource de la motivation, semble donc une voie préparatoire s'inscrivant dans la perspective de l'autonomie des patients.

Dans le cas de dispositifs d'auto-rééducation et de télé-rééducation, l'absence de présence physique du thérapeute, tiers soutenant la réalisation des exercices, reformule dans des conditions nouvelles la question de l'observance, de l'adhérence thérapeutique, de la compliance et de la motivation des patients.

Avec l'avènement de la santé numérique, plusieurs dispositifs font actuellement l'objet de développement et de validation, néanmoins, peu sont utilisés de manière effective en pratique courante en rééducation.

4.2 Enjeux

Le recours aux dispositifs d'auto-rééducation et de télé-rééducation amène de nombreux questionnements. Au-delà du défi technologique qu'ils peuvent représenter, et du potentiel impact écologique à considérer mettant en question leur viabilité à long terme, l'évaluation des réels bénéfices, tant d'un point de vue fonctionnel qu'humain, et l'estimation du coût effectif est sujet à discussion.

Ainsi, la revue Cochrane publiée en 2020 a pour objet l'évaluation des publications visant à comparer les résultats obtenus via la rééducation en présence d'un thérapeute à ceux obtenus via des dispositifs de télé-rééducation. Considérant l'hétérogénéité des contextes étudiés (phase de la rééducation, troubles concernés, outils et modalités utilisés, critères de jugement) et les risques de biais méthodologiques, les auteurs ont conclu, avec un niveau de preuve faible à intermédiaire, à un degré d'efficacité similaire entre les pratiques en présentiel et celles reposant sur la télé-rééducation. Ils soulignent toutefois l'importance d'estimer le coût exact de ces nouvelles méthodes, et la nécessité de mener des études de méthodologie mixtes évaluant également leur acceptabilité (Laver, 2020).

Concernant l'observance, une récente revue de la littérature (revue de la portée), rapporte que parmi 70 études portant sur des programmes de rééducation à domicile après un AVC examinées, 12 études sur 36 recensées pour le membre supérieurs ont obtenus des mesures de l'adhérence élevées (supérieures à 75%) (Donoso Brown, 2019).

4.3 Synthèse

Les préconisations de la Haute Autorité de Santé soulignant l'intérêt de la poursuite de la rééducation en phase chronique (3.3) mises en regard avec l'impossibilité de faire face aux besoins rééducatifs futurs (4.1) et à la possible absence de perte de chance en terme de récupération fonctionnelle via le recours à la télé-rééducation (4.2) constituent un ensemble d'arguments en faveur de la création de dispositifs d'auto-rééducation et de télé-rééducation. Le développement d'outils numériques et de dispositifs technologiques est donc encouragé pour soutenir la rééducation en phase subaiguë, et la prolonger en phase chronique.

Néanmoins, des précautions sont nécessaires afin d'une part de s'assurer de leur bienfait, et d'autre part d'en limiter de possibles répercussions délétères pour les patients vulnérables. Entre autonomie et isolement des patients, entre ingérence et abandon, des ajustements doivent être définis.

La notion d'autonomie est au centre des réflexions sous-tendant les enjeux esquissés. Ces réflexions doivent notamment porter sur le modèle social dans lequel ces innovations potentielles s'inscrivent.

5. Handicap, Classifications, Autonomie

5.1 Le handicap: évolution des définitions et modèles

Issu de la terminologie anglo-saxonne “hand in cap” utilisée au 16ème siècle dans le cadre de jeux puis dans le domaine du sport, et plus précisément des courses hippiques (Crété, 2007), l’usage du terme handicap s’est transformé progressivement, pour finalement désigner les individus “invalides” ou présentant une “infirmité” (Hamonet, 2022).

Intrinsèquement liée au progrès de la médecine, et aux modèles d’organisation de la société orientés par des décisions politiques, la définition du handicap a connu une évolution importante au 20e siècle. Cette évolution a été conjointe à l’élaboration de classifications internationales permettant d’identifier et reconnaître les maladies et leurs conséquences.

Ainsi, en 1980, en complément de la Classification Internationale des Maladies, l’Organisation Mondiale de la Santé a publié la Classification Internationale des Déficiences, Incapacités et Handicaps (désignée Classification Internationale des Handicaps en France, CIH) (Chapireau, 2001). Cette classification est conçue sur un modèle linéaire de causalité: le handicap est la conséquence d’une maladie ou d’un trouble causant des déficiences et incapacités à l’origine d’un désavantage. L’intérêt de cette classification est notamment de proposer des définitions de la maladie (processus causal interne et imperceptible transformant le corps), de la déficience (anomalie structurelle ou fonctionnelle du corps à l’origine d’une limitation, manifestation clinique de la maladie), de l’incapacité (altération de la capacité d’action ou du comportement, restriction d’activités) et du handicap (limitation dans la réalisation du rôle social de l’individu) et de permettre une reconnaissance internationale des potentielles répercussions sociales du handicap via la notion de désavantage social (altération du processus de socialisation, conséquences sociales de l’incapacité) (INSERM, 1988).

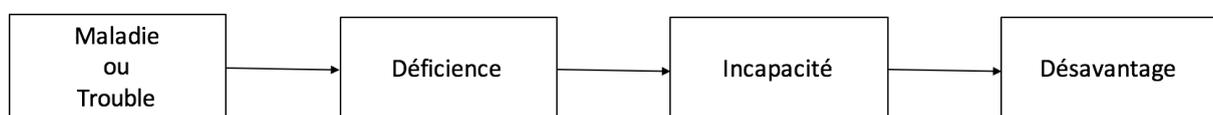


Figure 1.4 Modèle linéaire handicap CIH (reproduit de INSERM, 1988 p26)

Néanmoins, dans cette perspective, le handicap est considéré comme un état de fait, immuable, plutôt qu’une situation susceptible d’évoluer en fonction du contexte. Par ailleurs, cette inadéquation ou discordance entre l’individu et son milieu repose sur la comparaison de l’état de handicap avec l’état de santé supposant comme référentiel normatif des performances moyennes attendues d’un individu en bonne santé (Winance, 2008).

En 2001, l'OMS a donc adopté une nouvelle classification: la Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF).

5.2 La Classification Internationale du Fonctionnement

Souhaitant rendre compte de la notion de construction sociale du handicap, vécu comme situationnelle plutôt qu'état immuable, une nouvelle classification a été proposée pour se distinguer du modèle précédent, dit bio-médical, considéré comme normatif et causal.

La nouvelle classification proposée se veut neutre et universelle, en décrivant le fonctionnement et les composantes intervenant dans la santé, plutôt que les difficultés et conséquences de la maladie comme précédemment.

Ainsi, le modèle biopsychosocial proposé n'est plus linéaire et figé, mais la représentation d'une situation multifactorielle et modifiable, et inclut les notions de participation et de facteurs environnementaux.

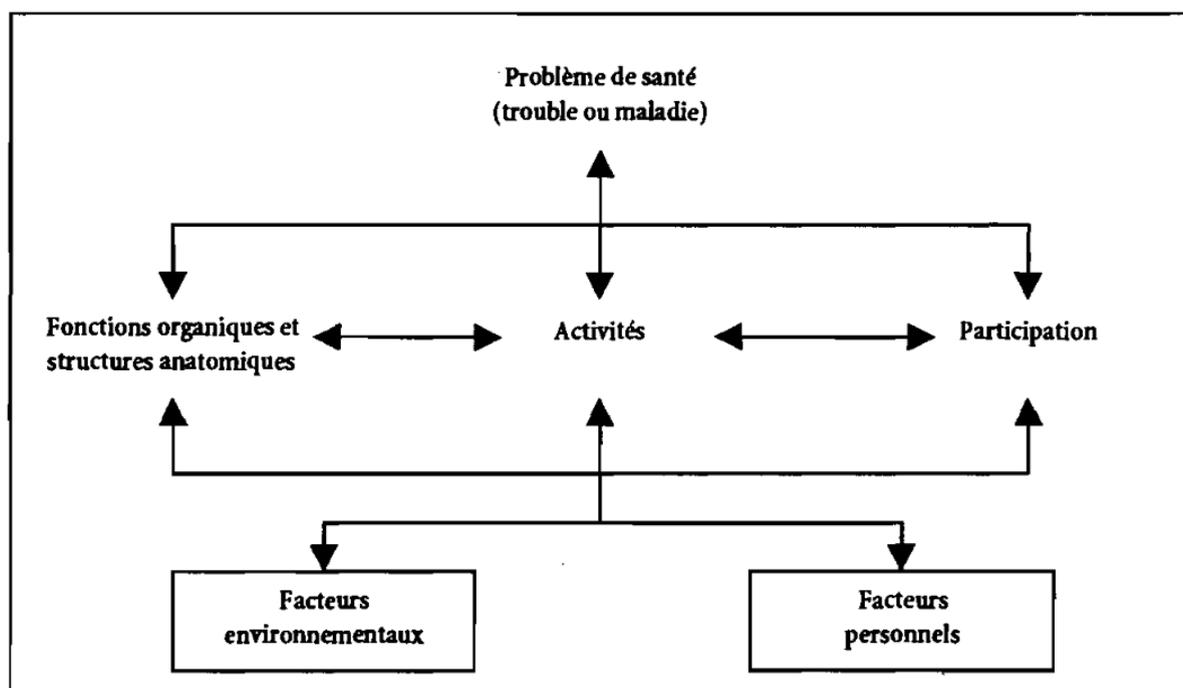


Figure 1.5 Modèle descriptif des interactions entre les composantes de la CIF (reproduit de OMS, 2001)

Dans ce modèle, l'activité désigne l'exécution d'une tâche par une personne, et la participation désigne l'implication de la personne dans une situation de vie réelle.

Ainsi, les limitations d'activités et les restrictions de participation sociale considérées à un moment donné et susceptibles d'évoluer, résultent de l'interaction entre l'ensemble des

composantes, sur lesquelles il sera dans une certaine mesure possible d'agir pour rendre une tâche réalisable ou l'adapter en conséquence, et que la personne puisse s'impliquer dans la situation selon son choix.

La CIF repose sur la distinction de deux notions: la capacité et la performance.

La capacité est définie comme l'aptitude d'un individu à effectuer une tâche ou mener une action, soit l'étendue des possibilités, tandis que la performance décrit ce que cet individu réalise dans son environnement ordinaire. La différence entre la capacité et la performance permet donc de refléter l'impact de l'environnement sur les activités et la participation d'un individu (OMS, 2001).

Ces notions remplacent celle de désavantage social présente dans la CIH. Ce changement est représentatif du choix de ne plus situer l'individu par rapport à une norme sociale.

De surcroît, il met en exergue les possibilités d'actions sur les facteurs environnementaux.

Avec l'évolution du modèle, le handicap n'est donc plus un désavantage social conséquence d'une maladie, le handicap, situationnel, est la conséquence d'un processus d'exclusion sociale, résultant notamment de l'inadaptation d'un environnement (Winance, 2008).

5.3 L'enjeu de l'autonomie

L'évolution des modèles de conception du handicap traduit une évolution des représentations du rapport bidirectionnel entre l'individu et la société-environnement. Néanmoins, si ce changement révèle une modification de la représentation de l'objet normatif (porté initialement sur l'individu dont la maladie engendre un désavantage par rapport à la norme sociale, puis sur l'environnement dont l'inadaptation est un obstacle à la participation sociale d'un individu), la situation visée reste identique: l'autonomie. Aussi, le référentiel normatif pré-supposé, et inchangé, est celui de l'autonomie des individus.

L'autonomie peut être définie comme "la capacité du sujet à décider pour lui-même des règles auxquelles il obéit, et à agir en conséquence." (Winance, 2007).

La notion d'autonomie est couramment utilisée en opposition à une situation de dépendance. Néanmoins, elle pourrait s'en distinguer sans s'y opposer en la considérant comme la "capacité d'une personne à gérer elle-même ses dépendances" (Rialle, 2015). Ainsi, cette distinction s'opérerait essentiellement dans le registre de l'action, et un individu pourrait être autonome et indépendant (décider seul et agir seul), autonome et dépendant (s'il peut décider seul mais ne peut pas agir seul), non autonome et indépendant (ne pas

décider seul, mais agir seul), non autonome et dépendant (ne pas décider seul et ne pas agir seul).

Pour d'autres auteurs, plutôt que du point de vue de l'action, la distinction entre autonomie, indépendance et dépendance, serait liée à la dimension relationnelle et à la notion d'altérité (Vauchez, 2015). Dans ce cas, la situation d'autonomie correspondrait non pas à l'absence totale de relations subordonnées, mais plutôt à l'accès à une multiplicité de relations bidirectionnelles (tant par leur nombre que leur qualité) avec la possibilité de transformer ces liens, tandis que la dépendance se caractériserait par une relation unidirectionnelle et figée.

Quelque soit la définition choisie de l'autonomie, le fait qu'elle soit la finalité implicite des dispositifs créés suppose une injonction à laquelle le thérapeute-prescripteur et le patient-utilisateur doivent se plier.

Cette injonction implicite, assimilée, intégrée par chacun, pourrait dans une certaine mesure traduire un rejet de la situation de dépendance, et plutôt qu'un moteur motivationnel, générer de l'anxiété voire une désespérance, faisant obstacle au processus de deuil et à l'acceptation.

La chercheuse Myriam Winance évoque à ce sujet la violence potentielle de cet impératif d'autonomie, pouvant conduire à "des impasses pour les personnes" (Winance, 2007).

Pour répondre à ce risque, Vincent Rialle propose de replacer la relation d'aide au centre des processus de conception des nouvelles technologies, en éclairant les démarches d'une réflexion éthique préalable (Rialle, 2015).

Le développement de dispositifs d'auto-rééducation et de télé-rééducation convoquent implicitement ces enjeux, dont la partie émergée pourra se cristalliser autour de la question de l'adhésion thérapeutique. L'observance des exercices prescrits, tant souhaitée tout particulièrement dans le cas de la validation de nouveaux dispositifs technologiques, ne devant se muer en un impératif de compliance pour répondre à une exigence d'autonomie.

CHAPITRE 2

La Sonification du Mouvement : Principe et Usages

L'objectif de ce chapitre est de mettre en lumière les spécificités de la sonification du mouvement, s'inscrivant dans le champ des Auditory Display, et les réflexions actuelles concernant son utilisation dans un cadre rééducatif.

Après une brève description du principe sur lequel cette technique repose, les enjeux liés aux modalités d'interactions gestes-sons et contextes d'usages sont présentés.

1. *Auditory Display*¹⁰: origine, taxonomie et définitions

1.1 Les prémices de la sonification: rendre audible l'invisible

Les premières apparitions d'outils de transformation de données sources en sons ont émergées dans des situations où l'accès à l'information par une autre modalité, notamment visuelle, n'était pas aisée, ou lorsque les spécificités du traitement auditif, particulièrement performant pour la distinction et l'analyse de changements temporels ou fréquentiels, apportaient une plus-value (Bregman, 1990; Moore, 1997).

L'un des précurseurs les plus anciens concerne le développement de l'instrument désormais emblématique de la panoplie du médecin pour l'auscultation des patients: le stéthoscope (Dubus, 2013). En 1819, le Docteur René Laënnec a présenté ses recherches menées sur des instruments acoustiques permettant d'explorer les maladies des viscères, offrant ainsi la possibilité d'identifier avec précision des pathologies en s'appuyant sur des informations auditives (Laënnec, 1819).

Si dans ce cas, l'outil développé est un simple amplificateur sonore n'ayant pas pour objet la conversion de la nature du signal, se distinguant donc des systèmes de sonification, le principe de recourir à des signaux auditifs pour décrypter une information a été initiateur des recherches pour convertir des données, inaccessibles ou invisibles, en sons.

S'appuyant sur les avantages présentés par la transmission d'informations auditives, de nombreux appareils et outils de mesure ont été développés, le plus souvent sous la forme d'avertisseurs sonores, tels que le compteur Geiger mesurant les radiations ionisantes.

Avec la mise en évidence des spécificités du traitement et de l'analyse des informations auditives, des techniques spécifiques de conversion d'une information source en information sonore ont progressivement été développées et un champ de recherches dédiées a été initié.

1.2 La famille des *Auditory Display*

En 1992, une communauté consacrée aux réflexions menées concernant les systèmes et usages d'avertisseurs sonores a été constituée: l'ICAD (the International Community for Auditory Display).

Les *Auditory Display* ("affichages auditifs") ont été définis comme l'ensemble des utilisations des sons pour communiquer des informations (Walker, 2011).

Ils regroupent une variété de systèmes et méthodes tels que la sonification, l'audification et les interfaces auditives.

¹⁰ Le terme *Auditory Display* ne disposant pas d'équivalent officiel dans la langue française, il sera donc conservé dans sa formulation originale.

Différentes taxonomies complémentaires des *Auditory Display* existent, selon le critère de classification choisi (fonctions du retour sonore, techniques utilisées). Parmi les fonctions principales décrites il est possible de distinguer notamment les signaux d'alerte sonore ou notification d'état, des signaux de suivi de progression d'une tâche.

L'audification est la transposition directe dans le domaine audible de données de nature différentes, tels que des données physiques (par exemple des données sismiques), des données physiologiques (fréquence cardiaque, activité cérébrale) ou encore des données statistiques (Dombois, 2011). Modalité alternative à la visualisation de données, le recours à des retours sonores permet de représenter les données, et ainsi éventuellement de détecter des redondances et anomalies, notamment dans le cadre de l'analyse d'échantillons de taille importante. Dans ces situations, le retour sonore est utilisé pour son avantage de traitement par rapport à la modalité visuelle (coût attentionnel limité, capacité de traitement simultané de plusieurs sources et performance de discrimination temporelle d'informations perçues) (Dyer, 2015; Rammsayer, 2015), et peu d'attention est accordé à sa dimension esthétique.

Parmi les systèmes de signalisation auditive d'évènements (alarmes, notifications), 3 catégories sont distinguées selon la nature du retour sonore: *auditory icons* (icônes sonores), *earcons*, et *spearcons* (Brazil, 2011; McGookin, 2011; Parseihian, 2013).

Les *auditory icons* correspondent à la transposition dans le domaine auditif des pictogrammes du domaine visuel. Ainsi, ils reposent sur l'usage d'éléments sonores concrets du quotidien en dehors de leur contexte habituel. Le bruit caractéristique de froissement de papier pour symboliser l'action de vider la corbeille sur une interface est un exemple typique de cette famille de signaux auditifs.

A l'inverse, les *earcons* sont des retours sonores abstraits, prenant souvent la forme d'une très courte mélodie (motif mélodico-rythmique), associés à la survenue d'un événement. Ces avertisseurs sont couramment utilisés pour caractériser l'identité sonore d'une marque, tel que le motif emblématique de la Société Nationale des Chemins de Fer français (SNCF), permettant conjointement de reconnaître l'entreprise et de signaler aux usagers la diffusion d'informations.

Les *spearcons* sont quant à eux issus de la déformation du langage verbal. Des phrases synthétiques décrivant une information sont accélérées. L'accélération rend la compréhension des paroles impossible et crée un retour sonore unique et identifiable, qui va caractériser l'information décrite et pourra s'y substituer pour un utilisateur entraîné.

La sonification a initialement été définie comme “l’utilisation de l’audio non verbal pour transmettre une information. Plus précisément, la sonification est la transformation de relations de données en relations perçues dans un signal acoustique dans le but de faciliter la communication ou l’interprétation” (Kramer, 1999). Cette modalité présente des spécificités permettant de la distinguer des autres types de signaux auditifs. A la définition initiale de la sonification s’est progressivement ajoutée la notion de relations et d’interactions entre les données sources et les retours sonores. Dans ce contexte, la sonification interactive a été définie en 2004 par Hermann et Hunt comme “la discipline de l’exploration des données manipulant de manière interactive la transformation des données en son” (Hermann, 2004; Hunt, 2004).

Parmi les multiples situations de sonification interactives, la sonification du mouvement humain est l’objet de très nombreuses recherches, aux modalités et applications variées.

2. Sonification du mouvement

2.1 Spécificités

La sonification du mouvement, à l’intersection de la musique, des sciences du mouvement, des sciences cognitives, et des interactions humains-machines, regroupe l’ensemble des dispositifs technologiques assurant une traduction en temps réel des paramètres du mouvement en paramètres sonores, et plus généralement la production de sons ou de musique à partir du mouvement humain (Bevilacqua, 2016).

En 2005, Effenberg avait défini la sonification du mouvement comme un “concept de *mapping*¹¹ des paramètres de mouvement en son créant de nouveaux flux perceptifs congruents avec l’évolution dans le temps des paramètres de mouvement cinématiques ou dynamiques” (Effenberg, 2005).

La sonification du mouvement peut être utilisée dans deux situations distinctes: le retour sonore signale l’accomplissement de l’action (*knowledge of result, KR*), ou accompagne l’exécution du mouvement tout au long de son déroulement (*knowledge of performance, KP*). Si la première situation (*knowledge of result*) peut également être obtenue avec d’autres systèmes que la sonification, tels que l’utilisation d’instruments de musique dans le cadre de la musicothérapie neurologique avec la technique *TIMP* (*Therapeutical*

¹¹ La notion de *mapping* correspond ici aux relations entre l’information d’entrée (dans ce cas les paramètres du mouvement) et l’information de sortie (dans ce cas les caractéristiques des retours sonores).

Instrumental Music Performance) (Mertel, 2016; Baker, 2006) ou encore dans une variété de contextes retrouvés dans la littérature sous la terminologie *Music-Supported Therapy* (Zhang, 2016), la deuxième situation (*knowledge of performance*) est spécifique aux dispositifs de sonification. Cette spécificité constitue une réelle plus-value pour l'utilisateur qui dispose ainsi en temps réel d'une source d'information complémentaire à celles mobilisées habituellement lors de l'exécution d'un mouvement (proprioception, vision, système de supervision du contrôle exécutif).

2.2 Principe

De manière comparable aux autres *Auditory Display*, les systèmes de sonification du mouvement reposent sur la combinaison de plusieurs outils permettant la collecte des données sources, leur traitement et analyse, puis leur conversion en sons via la synthèse sonore, et enfin la restitution sonore (Kramer, 1994).

Concernant la **collecte des données sources**, à savoir **les mouvements ou les gestes** dans le cas particulier de la sonification du mouvement, parmi les systèmes de captures on retrouve dans la littérature principalement le recours à des centrales inertielles, ou à des systèmes de capture du mouvement via des caméras optiques avec marqueurs (de type Optitrack, Vicon, ou Qualisys) ou sans marqueurs (de type Kinect ou Leap Motion) (Bevilacqua, 2016).

Les données recueillies peuvent être transmises par voie filaire (Maulucci, 2001), ou par des protocoles de communications sans fil (Bluetooth ou Wi-Fi) (Scholz, 2016).

Le traitement, l'analyse et la conversion en son reposent sur des logiciels, tels que Pure Data (Brock, 2012), CSound (Schmitz, 2014), Max (Raglio, 2021), ou encore le logiciel FAUST (Kantan, 2021). Plusieurs modalités de **synthèse sonore** existent, tels que la synthèse additive (par superposition de sinusoïdes permettant d'enrichir un son pur avec des harmoniques afin de lui donner un timbre particulier et reconnaissable), la synthèse soustractive (via le recours à des filtres), la synthèse à partir d'échantillons extraits par exemple d'une base de données (synthèse granulaire et synthèse concaténative), ou encore la synthèse à partir de modèles physiques (Cook, 2011; Conan, 2014).

La **restitution sonore** peut ensuite être assurée soit via un système de haut-parleur, soit via un casque ou des écouteurs.

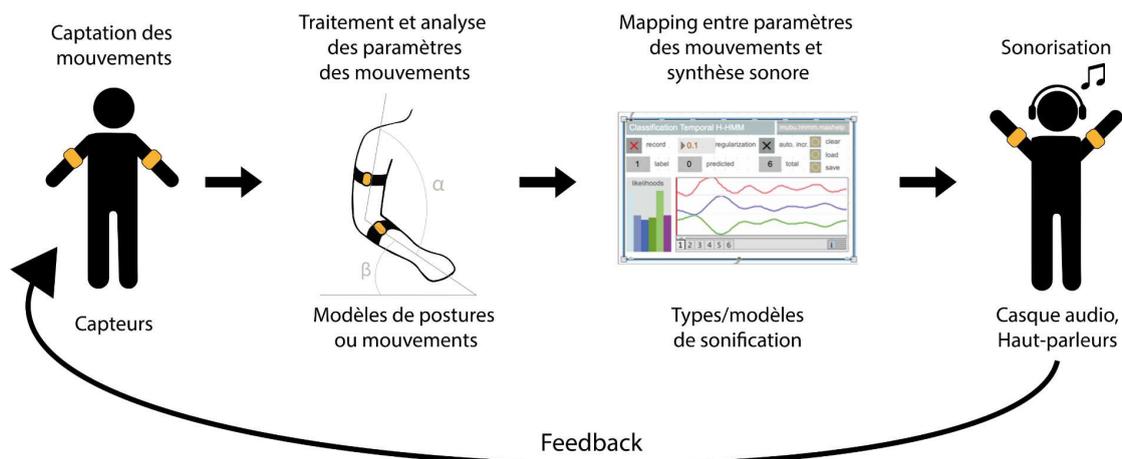


Figure 2.1 Étapes de la sonification du mouvement

2.3 Modalités d'interactions gestes-sons

Les associations et relations entre les données gestuelles d'entrées et les retours sonores résultants sont désignées dans la littérature par le terme *mapping* (Hunt, 2002; Verfaillie, 2006).

Les réflexions portant sur les *mapping* sont actuellement au cœur des investigations portant sur les systèmes de sonification. Différentes classifications existent pour distinguer la nature de ces associations, pouvant notamment varier selon le type de sonification et le contexte d'usage.

Dans le Manuel de Sonification datant de 2011 deux grandes modalités sont présentées: les ***mapping par association de paramètres*** (*Parameter Mapping Sonification, PMSon*) et les ***mapping reposant sur des modèles dynamiques*** (*Model-Based Sonification*) (Grond, 2011; Hermann, 2011).

Dans le premier cas, chaque paramètre caractéristique d'un mouvement, tel que l'amplitude, la vitesse ou la fluidité du mouvement, peut être associé à un paramètre sonore, tel que la hauteur (fréquence) d'un son, son volume (intensité), ou son timbre. Les variations d'un paramètre de mouvement induisant une variation d'un paramètre sonore résultant.

Dans le second cas, l'association n'est pas aussi directe que dans le premier cas, 6 sous-étapes sont identifiées dans le processus, la réponse acoustique résultante étant le fruit de l'évolution temporelle du modèle, qui prend notamment en compte les caractéristiques de l'installation et de l'auditeur.

A partir d'une réflexion menée sur l'écoute, plus particulièrement sur le concept de cognition musicale incarnée, dans le contexte particulier de création d'instruments musicaux

numériques, Baptiste Caramiaux a distingué 3 stratégies de *mapping* en regard de 3 modalités d'écoute: un *mapping* instantané, un *mapping* temporel, et un *mapping* métaphorique (Caramiaux, 2014). Le *mapping* instantané est une traduction des grandeurs caractérisant le geste, le *mapping* temporel est une traduction des profils temporels et séquences d'événements gestuels, et les *mapping* métaphoriques reposent sur des relations métaphoriques entre les gestes et les sons plutôt qu'une congruence des paramètres respectifs de temporalité ou de grandeur.

En 2013, une revue systématique de la littérature portant sur l'analyse de 179 publications a permis le recensement de 33 dimensions physiques regroupées en 5 catégories, dont 7 concernent spécifiquement les mouvements, et 30 dimensions audios regroupées en 11 catégories (dont 6 catégories combinées) (Dubus, 2013). Parmi les publications étudiées, les variations de hauteur sonore (*pitch*) représentent la catégorie majoritairement utilisée dans l'ensemble des contextes de sonification, dont la sonification du mouvement.

Les auteurs soulignent la nécessité d'une évaluation de l'efficacité respective de chaque modalité de *mapping* en fonction des contextes d'usage, et proposent à partir de l'analyse plus approfondie de 60 projets, une typologie des sonifications à partir d'une approche basée sur les distinctions de *mapping* gestes-sons et une réflexion autour de l'évolution des définitions de la sonification. Ainsi, les modalités de *mapping* gestes-sons pourraient être un nouveau critère de classification et définition des dispositifs de sonification existants.

L'intérêt grandissant pour les modalités de *mapping* dans le cas de la sonification du mouvement a permis de confirmer la nécessité d'évaluer leurs effets respectifs, en considérant notamment les contextes d'usages.

2.4 Usages

2.4.1 Pratiques artistiques

Le principe et les techniques de sonification ont été utilisées dans le cadre d'installations artistiques (Sinclair, 2012; Sinclair, 2013; Abenavoli, 2017) et en composition musicale pour générer des oeuvres à partir de phénomènes physiques, tels que l'évolution de la température lors du processus de décomposition dans un composteur (Parker, 2016), ou biologiques, tels que la sonification de la traduction du génome en protéines (Dunn, 1999). Les spécificités apportées par la sonification du mouvement ont également été une source d'inspiration pour des artistes de différents domaines, pour des performances audio-visuelles, et plus particulièrement en danse (Giomi, 2018, 2020a, 2020b, 2021; Brown,

2019; Clay, 2012). Des réflexions analogues à celles portant sur les *mapping* ont ainsi été menées concernant les caractéristiques sonores permettant de symboliser des caractéristiques des gestes dansés (Frid, 2019; Landry, 2020).

En dehors de créations scéniques, des dispositifs de sonification du mouvement ont aussi été utilisés dans un cadre pédagogique pour favoriser l'apprentissage d'une chorégraphie, corriger ou améliorer la réalisation de certains mouvements dansés (Grosshauser, 2011; Françoise, 2014). Des systèmes de sonification du mouvement ont également été développés pour une application en pédagogie musicale (Ferguson, 2006; Larkin, 2008; Grosshauser, 2009).

2.4.2 Pratiques sportives

La sonification du mouvement a été utilisée dans de multiples applications sportives, notamment le cyclisme (Schaffert, 2017), la natation (Hermann, 2012; Schaffert, 2019a), l'aviron (Schaffert, 2015), la course à pied (Lorenzoni, 2018) ou encore le ski (Hasegawa, 2012) et le tai-chi (Fan, 2014).

Les résultats d'une expérience de séquençage d'un mouvement de natation (crawl) et d'association de chaque phase à un son via un *mapping* de type *PMSon*, pour laquelle la sonification a été jugée aidante par les utilisateurs mais insatisfaisante du point de vue de l'esthétique du retour sonore, ont conduit l'équipe de recherche à collaborer avec des musiciens (Seibert, 2013). L'enregistrement d'improvisations musicales a ainsi permis la création d'une séquence musicale, qui a été accélérée pour être synchronisée avec les phases des mouvements du crawl. La séquence musicale de quelques secondes était diffusée de manière répétée lors de la nage. Cette sonification musicale considérée comme motivante, a suscité des appréciations contrastées parmi les utilisateurs, certains relevant des imprécisions dans l'association avec les mouvements. Le rapport à la répétition de la séquence sonore a été variable selon les participants: des participants ont considéré cette répétition monotone, tandis que d'autres participants ont apprécié son adéquation avec la tâche à réaliser, elle-même répétitive, et l'ont donc estimé soutenante.

Ces résultats illustrent la complexité des choix d'orientations pour la conception de dispositifs de sonification du mouvement.

Cette notion d'équilibre à définir entre la fonctionnalité et l'esthétique lors du processus de conception des *mapping* est évoquée dans d'autres situations d'applications sportives, tel que l'aviron (Dubus, 2012). A partir de la description des différents systèmes existants, une récente synthèse traite la problématique de la conception et du développement de systèmes de sonification du mouvement, à travers le cas particulier d'un usage par des athlètes (Schaffert, 2022).

De récentes revues de la littérature mettent en évidence que le recours à la sonification du mouvement permet l'amélioration des performances des athlètes (Van Rheden, 2020), et favorise l'acquisition de nouvelles compétences pour des pratiquants non experts (Schaffert, 2019b).

Ces constats sont en adéquation avec les résultats obtenus dans le cadre d'études fondamentales sur l'apprentissage moteur.

2.4.3 Recherches fondamentales

S'inscrivant dans la continuité des bases conceptuelles d'affordances gestuelles des instruments et sons musicaux (*gestural affordances of musical sound*) et de cognition musicale incarnée (*embodied music cognition*) établies dans les ouvrages collectifs sous la direction de Godøy et Leman (Leman, 2007; Godøy, 2010), des études de recherches fondamentales sur la sonification du mouvement ont portées sur le contrôle et l'apprentissage moteur (Effenberg, 2011; Bevilacqua, 2016; Effenberg, 2016; Boyer, 2020) et sur la modulation de la perception corporelle (Tajadura-Jimenez, 2019; Newbold, 2020; Ley-Flores, 2021; Ley-Flores, 2022).

Des résultats encourageants ont ainsi été mis en évidence, avec notamment, au-delà d'un simple ajustement rythmique automatique, une amélioration de l'exécution motrice en présence des retours sonores. Néanmoins, l'attribution précise des effets observés à certaines caractéristiques de la sonification reste complexe et incertaine.

Ainsi, la nécessité d'étudier différentes stratégies de mapping évoquée précédemment, est également retrouvée dans la littérature portant sur l'apprentissage moteur, avec dans ce cas pour objectif une meilleure compréhension des processus mis en jeu lors de la sonification du mouvement (Dyer, 2015). Certaines spécificités du recours à des retours sonores par rapport à des retours sensoriels d'une autre nature, notamment visuels, ont été suggérées: l'hypothèse de l'effet de guidance décrite dans le cas des modalités visuelles, sous forme d'une dépendance développée lors de l'apprentissage d'une tâche vis à vis du retour visuel au risque d'une détérioration de la performance lors du retrait du retour visuel, ne semble pas s'appliquer de manière identique lors de l'utilisation de retours via la modalité auditive (Dyer, 2017). Ainsi, des connaissances établies concernant les mécanismes intervenant dans le traitement de retours sensoriels visuels dans un contexte d'apprentissage moteur ne semblent pas directement transposables à la situation particulière de la sonification du mouvement.

2.4.4 Santé et Rééducation

L'une des premières applications des *Auditory Displays* dans le champs de la santé, en tant que systèmes alternatifs à la visualisation pour représenter des données distribuées dans l'espace, a concerné le développement de dispositifs de soutien à la navigation pour des personnes présentant des déficiences visuelles, depuis de simples avertisseurs sonores d'obstacles à des dispositifs de sonification élaborés (Edwards, 2011; Shoval, 1998; Parseihian, 2013). Les différents travaux réalisés ont mené à la comparaison des stratégies de sonification dans ce contexte d'usage particulier, confirmant que le comportement et les performances des utilisateurs étaient dépendants de la stratégie de sonification employée et de la caractéristique sonore choisie, en faveur des variations de hauteur sonore (*pitch*) et de tempo, plutôt que des variations de timbre ou d'intensité sonore (Parseihian, 2016).

Concernant plus spécifiquement la rééducation motrice, de nombreuses techniques reposant sur l'usage de sons et de la musique existent et doivent être distinguées.

Évoqués précédemment (1.2 du présent chapitre) les systèmes de conversion d'une donnée physiologique, telle que la contraction musculaire, en son, sont regroupés sous la terminologie de rétroaction biologique (*biofeedback*, *neurofeedback*). L'usage de ces systèmes dans différents contextes de rééducation est fréquent depuis les années 1970, notamment en rééducation motrice (Fernando, 1978; Höner, 2011).

Une autre approche est proposée avec les stimulations auditives rythmiques (*Rhythmic Auditory Stimulation*, *Rhythmic Auditory Cueing*). Ces stimulus auditifs visent à cadencer la réalisation d'un mouvement, le plus souvent la marche, et reposent pour cela sur l'usage d'un retour sonore ou musical au tempo marqué et immuable. Cette technique, utilisée en musicothérapie neurologique (Thaut, 2016), se distingue de la sonification du mouvement. Dans ce cas, aucun système de captation du mouvement associé à un système de conversion en temps réel des données collectées en son ou musique n'est utilisé. Par conséquent, il n'y a pas d'interactions et d'évolutions conjointes entre le mouvement et le retour sonore, le tempo du stimulus sonore est indépendant du mouvement réalisé, le participant doit adapter son tempo d'exécution du mouvement à celui du retour sonore. De nombreuses études ont été menées avec cette technique, plus particulièrement dans le cas de la rééducation de la marche de patients atteints d'une maladie de Parkinson (Hausdorff, 2007; Arias, 2010; Thaut, 2018) ou présentant des séquelles après un accident vasculaire cérébral (Cha, 2014; Yoo, 2016; Mainka, 2018; Gonzalez-Hoelling, 2021). Deux revues systématiques de la littérature et méta-analyses ont été publiées concernant respectivement la rééducation de la marche et l'équilibre postural dans le cas de la maladie de Parkinson (Ghai, 2018a) et dans le cas de séquelles post-AVC (Ghai, 2019). Les résultats dans le

premier cas sont variables selon le paramètre d'intérêt étudié, avec une amélioration de la vitesse de marche mais un effet négatif sur la cadence. En revanche, les bénéfices observés avec cette technique au cours de l'accompagnement rééducatif des patients présentant des séquelles post-AVC incitent les auteurs à recommander son usage.

Des dispositifs de sonification du mouvement ont également été développés pour la rééducation de la marche dans le cas de la maladie de Parkinson (Schedel, 2016; Gorgas, 2017). Les résultats des études pilotes sont encourageants.

Par ailleurs, des études ont été menées concernant l'usage de la sonification dans les troubles de l'écriture, en premier lieu comme moyen d'identification et d'évaluation de la dysgraphie chez des enfants (Danna, 2015), puis pour la rééducation de l'écriture des personnes atteintes de la maladie de Parkinson (Véron-Delor, 2020).

Dans le contexte des lésions cérébrales acquises, et plus particulièrement de l'accompagnement après un accident vasculaire cérébral, la majorité des dispositifs de sonification du mouvement ont été développés pour la rééducation des membres supérieurs, avec deux applications principales: l'extension du bras pour atteindre des objets (Maulucci, 2001; Scholz, 2015, 2016; Chen, 2015; Schmitz, 2018; Douglass-Kirk, 2022) et la dextérité manuelle pour la préhension-manipulation d'objets (Friedman, 2011, 2014; Zondervan, 2016; Colombo, 2019; Raglio, 2021).

Dans ce dernier cas, deux dispositifs principaux ont été conçus: *SonicHand* et *MusicGlove*. L'étude clinique à grande échelle menée avec des patients en phase sub-aiguë post-AVC avec le dispositif *SonicHand* a permis la mise en évidence d'une amélioration significative des scores obtenus aux évaluations fonctionnelles des patients bénéficiant du dispositif de sonification comparativement aux patients du groupe de rééducation conventionnelle (Raglio, 2021). Le dispositif *MusicGlove*, actuellement commercialisé, a fait l'objet d'investigations auprès de patients en phase chronique post-AVC, poursuivant leur rééducation à domicile (Friedman 2014; Zondervan, 2016). Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence d'amélioration significative aux évaluations fonctionnelles de dextérité lors de l'utilisation du dispositif comparativement à la rééducation conventionnelle.

Concernant la **sonification des mouvements d'extension du bras**, la première étude réalisée en 2001 concernait les patients en phase chronique post-AVC (Maulucci, 2001). Dans ce cas, les chercheurs avaient choisi de **sonifier les erreurs de trajectoire dans une tâche de pointage d'une cible**, à l'aide d'un avertisseur sonore signalant l'éloignement de la trajectoire idéale. Le geste était suivi en continu, en cas d'erreur (sortie de la zone) un retour sonore dont la fréquence (hauteur) était indexée à l'écart de la trajectoire était émis. Cette étude a permis la mise en évidence d'une modification des trajectoires dans les deux groupes de patients (par entraînement dans le silence, et entraînement avec un retour

sonore), mais une amélioration de la trajectoire spécifique au groupe de patients bénéficiant de la sonification.

En 2015, une autre démarche de **sonification de suivi de trajectoire jusqu'à une cible** a été proposée dans une étude portant sur des séries de cas afin de comparer la sonification continue (*KP*) à une sonification ponctuelle du résultat (*KR*) (Chen, 2015). Le retour sonore continu était dit "plaisant" (consonant) lorsque la trajectoire était correctement suivie, et "déplaisant" (dissonant) lorsque la trajectoire était déviée. Le retour sonore ponctuel (*KR*) consistait à un retour rythmique lorsque la cible était atteinte. Chaque participant réalisait la tâche dans 3 conditions: sans sonification, avec la sonification ponctuelle (*KR*), avec la sonification continue (*KP*). Les observations réalisées sur ce faible échantillon de patients suggèrent un intérêt des situations avec sonification comparativement à celle sans sonification, et des effets différents selon la modalité de sonification, avec une augmentation de l'amplitude d'extension du coude lors de la sonification continue (*KP*) pour certains participants, et un gain de vitesse lors de la sonification ponctuelle (*KR*).

Un dispositif de sonification original et ludique a fait l'objet d'une étude clinique en 2016 avec des patients présentant des séquelles modérées de la motricité des membres supérieurs en phase subaiguë post-AVC (Scholz, 2016). Les patients du groupe bénéficiant des séances de sonification du mouvement devaient apprendre à **reproduire des mélodies de chansons connues en déplaçant leur bras dans un espace 3D** délimité, dans lequel chaque axe était associé à un paramètre, respectivement la hauteur du son selon l'axe vertical, l'intensité sonore selon le plan sagittal (antépulsion du bras), et la brillance du son selon le plan transverse (déplacement latéral du bras en abduction). La fluidité des mouvements des patients du groupe bénéficiant des séances de sonification était améliorée, et les auteurs ont mis en évidence une diminution des douleurs articulaires chez ces patients, ainsi qu'une amélioration des scores à l'échelle de mesure de l'impact de l'accident vasculaire cérébral (*Stroke Impact Scale, SIS*). Néanmoins, les scores obtenus aux évaluations fonctionnelles n'étaient pas significativement différents de ceux des patients bénéficiant de la rééducation conventionnelle.

Traduisant le souhait d'orienter les dispositifs de sonification vers des dimensions sonores plus esthétiques, l'étude la plus récente portant sur la sonification du mouvement d'extension du bras dans un contexte de rééducation des membres supérieurs de patients présentant des séquelles motrices en phase chronique repose sur la diffusion d'extraits musicaux choisis individuellement par les patients. En cas de mouvements jugés anormaux (avec un seuil pouvant être défini par le thérapeute) la diffusion de l'extrait musical s'interrompt. Les résultats obtenus, très encourageants, mettent en évidence une réduction des mouvements anormaux en présence de la sonification (Douglass-Kirk, 2022).

La variabilité des résultats obtenus avec les différents dispositifs de sonification du mouvement pour la rééducation motrice des membres supérieurs après un accident vasculaire cérébral est à considérer au regard de l'hétérogénéité des situations d'applications, de la pluralité des caractéristiques des retours sonores utilisés, et des choix de conception des modalités d'interaction. En 2019, une revue de la littérature avait notamment décrit les limites des dispositifs de sonification du mouvement pour la rééducation du point de vue des bénéfices fonctionnels, en suggérant que ces dispositifs, susceptibles de soutenir la motivation des patients, pourraient revêtir un intérêt particulier dans le cas d'un usage à domicile complémentaire à la rééducation (Nikmaram, 2019). Confirmant une synthèse datant de 2013 (Avanzini, 2013), et de manière identique aux autres domaines d'applications de la sonification du mouvement, deux revues de littératures ont souligné la nécessité d'étudier et comparer les effets de différents *mapping* dans le contexte de la rééducation afin de proposer des recommandations pour la conception de futurs dispositifs (Ghai, 2018b) notamment dans le cas de dispositifs pouvant être utilisés à domicile (Nown, 2022).

Si un nombre croissant de dispositifs technologiques font l'objet d'investigations pour une application dans un contexte de poursuite de la rééducation motrice des membres supérieurs post-AVC à domicile, la très grande majorité concerne des systèmes de réalité virtuelle et des "jeux sérieux" (*serious game*) (Dodakian, 2017; Gauthier, 2017; Chen, 2019, 2020; Wilson, 2021), ou éventuellement des systèmes couplant des modalités sensorielles (Chen, 2011). Parmi les récents dispositifs de sonification du mouvement développés, à notre connaissance, à ce jour, seul le dispositif *MusicGlove*, s'adressant aux troubles de la préhension, a fait l'objet d'une publication d'une étude clinique menée dans le contexte d'une utilisation à domicile. Ainsi, il apparaît nécessaire d'envisager le développement et l'évaluation de dispositifs de sonification du mouvement dans le cas particulier de la rééducation de l'hémiplégie après un accident vasculaire cérébral, et plus généralement des troubles moteurs des membres supérieurs après une lésion cérébrale acquise sans reprise de la préhension, adaptés à une utilisation au domicile en autonomie supervisée.

SYNTHÈSE et OBJECTIFS EXPÉRIMENTAUX

Au regard des connaissances actuelles, la poursuite de l'accompagnement rééducatif en phase chronique après une lésion cérébrale acquise est encouragée, notamment dans le cas de séquelles motrices au membre supérieur.

L'intérêt potentiel de l'usage de dispositifs s'appuyant sur des retours sensoriels (*feedback*) est suggéré. Ainsi, le développement de dispositifs de sonification du mouvement adaptés à ce contexte d'usage est susceptible de répondre à ce besoin.

L'augmentation prévisible de la nécessité de recours à la rééducation, conjointe au souhait de favoriser une plus grande implication et autonomie (*empowerment*) des patients vis-à-vis de leurs soins, supposent de développer de nouvelles modalités d'accompagnement. L'avènement récent de la santé numérique s'inscrit dans cette perspective.

Dans le cas de la sonification du mouvement pour la rééducation du membre supérieur après une lésion cérébrale acquise, si de récentes publications mettent en lumière l'intérêt de dispositifs consacrés à la préhension, avec un potentiel usage en autonomie, il n'existe pas à ce jour de dispositifs dédiés à des exercices de rééducation du membre supérieur n'impliquant pas la préhension et adaptés à un contexte d'usage en autonomie.

Par ailleurs, des questions fondamentales portant sur les choix d'orientation de la conception des dispositifs de sonification du mouvement, tout particulièrement concernant les modalités d'interactions gestes-sons à privilégier, requièrent des investigations.

Mutualisant les enjeux actuels respectifs de la rééducation et de la recherche fondamentale portant sur la sonification du mouvement, l'objectif principal de ce travail de thèse était de créer un dispositif de sonification du mouvement adapté à la poursuite en autonomie supervisée de la rééducation du membre supérieur de patients présentant des séquelles motrices suite à une lésion cérébrale acquise.

Dans cette perspective, il était conjointement nécessaire de réaliser des études évaluant l'effet de différentes caractéristiques sonores et modalités d'interactions gestes-sons et de définir des critères de conception d'un dispositif adapté au contexte d'usage visé.

Ainsi, dans l'objectif de comparer l'effet de plusieurs conditions sonores sur la temporalité d'exécution de mouvement d'extension du coude et le vécu de participants aux profils variés (patients présentant des troubles moteurs du membre supérieur suite à une lésion cérébrale

acquise, et participants sans troubles moteurs) une étude reposant sur une méthodologie mixte a été menée.

Grâce au processus de co-conception centré utilisateurs impliquant des experts de plusieurs domaines plusieurs modalités d'interaction gestes-sons adaptés à différents exercices de rééducation ont été conçus. Dans l'objectif de déterminer l'effet des modalités d'interactions gestes-sons sur la temporalité d'exécution des mouvements d'extension du coude une étude comparative a été menée avec des participants ne présentant pas de troubles moteurs. Par ailleurs, une étude comparant plusieurs conditions sonores (absence de son, diffusion d'un extrait musical, sonification du mouvement) a été menée avec les mêmes participants concernant un exercice de maintien de posture (bras tendu devant soi parallèle au sol).

Enfin, dans l'objectif d'évaluer l'utilisabilité du dispositif créé, une étude a été initiée avec des rééducateurs.

DEUXIÈME PARTIE

Expérimentations

CHAPITRE 3

Effect of sonification types in upper-limb movement: a quantitative and qualitative study in hemiparetic and healthy subjects

Article soumis le 09 Septembre 2022
Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation

Ce chapitre présente la première étude menée dans le cadre de ce travail de thèse, portant sur l'évaluation des effets de la présence de retours sonores interactifs sur des gestes répétés d'extension-retrait du coude et sur le vécu de participants adultes de profils différents.

1. Introduction

Afin d'évaluer l'effet de la présence de différents types de retours sonores interactifs dans le cas d'une tâche de répétition de mouvement d'extension-retrait du coude (antépulsion) sur la temporalité des gestes et le vécu de participants, nous avons réalisé une étude avec 15 patients adultes présentant des séquelles motrices du membre supérieur consécutives d'une lésion cérébrale acquise et de 15 participants adultes ne présentant pas de troubles moteurs.

Un protocole constitué de 3 étapes a permis de recueillir des données quantitatives (données de mouvements) et qualitatives (vécu des participants).

En premier lieu, les participants ont réalisé des entretiens visant à déterminer leurs habitudes d'écoute et éventuelles pratiques musicales, puis un bilan d'amusie, à l'aide de la batterie d'évaluation de l'amusie de Montréal (MBEA, Peretz, 2003).

Lors d'une séance ultérieure, les participants ont réalisé la tâche de répétition d'extension-retrait du coude dans 2 conditions sonores: sans retour sonore ou avec des retours sonores interactifs. A cette occasion, 5 types de retours sonores interactifs ont été proposés, regroupés en 3 catégories: des retours sonores "directs" correspondant à l'évolution d'un paramètre sonore isolé (hauteur ou tempo) en fonction de l'extension du coude, des retours sonores "musicaux" (discontinu ou continu), et un paysage sonore de nature. Des fichiers audios sont joints en guise d'illustration.

Enfin, les ressentis des participants étaient recueillis, à l'aide d'un entretien semi-directif, au cours duquel les participants précisaient notamment leurs préférences.

L'originalité de cette étude tient à la mise en perspective des données quantitatives et qualitatives recueillies, à la diversité des retours sonores proposés, et à l'analyse de l'effet des conditions sonores sur la temporalité des gestes répétés réalisés avec les bras parétiques et non parétiques des patients, et les bras dominants et non dominants des participants ne présentant pas de troubles moteurs.

Effect of sonification types in upper-limb movement: a quantitative and qualitative study in hemiparetic and healthy participants

Iseline Peyre^{1,2,3}, Agnès Roby-Brami², Maël Segalen^{1,2}, Alain Giron³, Baptiste Caramiaux²,
Véronique Marchand-Pauvert³, Pascale Pradat-Diehl^{3,4,5}, Frédéric Bevilacqua¹

¹UMR STMS Ircam/CNRS/Sorbonne Université, Paris, France

²ISIR Sorbonne Université/CNRS UMR 7222/Inserm U1150, Paris, France

³Sorbonne Université, Inserm, CNRS, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, LIB, F-75006 Paris, France

⁴AP-HP, Hôpital Pitié-Salpêtrière, Maladies du Système Nerveux, F-75013, France

⁵Sorbonne Université, GRC HaMCRé, F-75013 Paris, France

Corresponding author: Frédéric Bevilacqua, frederic.bevilacqua@ircam.fr

Abstract

Background: Movement sonification, the use of real-time auditory feedback linked to movement parameters, have been proposed to support rehabilitation. Nevertheless, if promising results have been reported, the effect of the type of sound used has not been studied systematically, and mechanisms involved during movement execution with sonification remain poorly understood. The aim of this study was to investigate in a single session the effect of different types of sonification both quantitatively and qualitatively on patients with acquired brain lesions and healthy participants. This experiment should be considered as a first step before establishing a longitudinal clinical rehabilitation study.

Methods: An experimental setup enabling arm sonification was developed using three different categories of sonification (direct sound modulation, musical interaction, and soundscape). Simple moving forward movements performed while sliding on a table with both arms were investigated with all participants. Quantitative analysis on the movement timing were performed, and different comparisons were processed (sound / no sound, affected arm / less affected arm, category and type of sonification). Qualitative analysis of semi-structured interviews were also conducted, as well as neuropsychological evaluation of music perception .

Results: For both the patient and healthy groups (15 participants each), average duration for performing the arm movement is significantly longer with sonification compared to the no-sound condition ($p < 10^{-3}$). Differences were also observed between the sound categories in the case of the paretic arms of patients and the dominant arms of healthy participants ($p < 0.05$). Qualitative analysis of semi-structured interviews revealed the motivational and affective aspects of each type of sonification. Most participants of both groups preferred to complete the task with sound, and more precisely with one that uses sound of nature environment (soundscape).

Conclusion: Overall, our results confirm that the sonification has an effect on the temporal execution of the movement during a single-session. This effect is variable among participants, which requires further studies to better understand. Globally, sonification is welcomed by the participants, and we found convergent and differentiated appreciations of the different sonification types. This enables us to provide researchers with recommendations for clinical studies for personalized music-guided rehabilitation.

Keywords: movement sonification; upper limb; hemiparesis; mixed methodology ;
rehabilitation

Background

Acquired brain lesions in adults, following stroke, head injury, or brain tumor, are major causes of acquired disability worldwide (Pollock, 2014 Chan, 2013). These lesions induce multiple sensory, motor, and cognitive disorders. Among these disorders, motor impairments could affect 40% of patients after stroke (Lecoffre, 2017). Upper limb hemiparesis, characterized by impaired motor control and muscle weakness, greatly reduces autonomy in daily living activities, and thus, the long-term quality of life of patients (Cerniauskaite, 2012).

In order to promote recovery, which is related to the substitution mechanism based on neuroplasticity, functional rehabilitation is essential (Yelnik, 2008). The effects of listening and playing music on brain plasticity have been highlighted in several publications (Münste, 2002 Gaser, 2003 Wan, 2010 Altenmüller, 2015), especially in patients with stroke induced (Altenmüller, 2009 Rojo, 2011 Amengual, 2013) and traumatic brain lesions (Siponkoski, 2020 Martinez-Molina, 2021). Also, the use of music is being studied in a wide range of rehabilitation settings (Sihvonen, 2017 Moundjian, 2016), both for language, such as dyslexia (Flaugnacco, 2015), and aphasia (Raglio, 2016), as well as for motor skills in Parkinson's disease (De Dreu, 2012 Pereira, 2019), or acquired brain lesions (Zhang, 2016 Ghai, 2019). Among the various methodologies developed, it is necessary to distinguish audio-rhythmic stimulation (RAS), exercises with musical instruments (music-supported therapy), and movement sonification devices.

Movement sonification is based on the real-time translation of motion parameters into sound parameters (Effenberg, 2005 Hermann, 2011). Innovative devices have been developed in the last few years to meet the needs of different contexts. While several movement-sound interactive systems were initially designed and developed in the field of artistic creation, their potential interest on sensorimotor learning has been highlighted in several studies (Bevilacqua, 2016 Effenberg, 2016). In the context of rehabilitation, the motion capture systems on which they are based can notably be used as a measurement tool (Cho, 2018 Sethi, 2019 Berner, 2020).

Movement sonification devices have many advantages: access to a continuous 3D auditory information, fast adaptation of sound feedback to the movements performed, flexibility of use by participants with various profiles thanks to possible adaptation according to individual abilities. Thus, these devices present a real added value in comparison with other sound/musical methods and tools, and offer perspectives in adequacy with the needs described in the rehabilitation framework. Moreover, compared to other feedback modalities

such as visual feedback, the use of the auditory modality does not constrain the user's posture. In this case, the dependence to the external feedback, called the guidance effect, might be less important with auditory compared to visual feedback since sonification could encourage to focus attention on intrinsic proprioceptive information (Dyer, 2015).

Their potential interest as a rehabilitation support tool is therefore currently under investigation (Schaffert, 2019 Mezzarobba, 2020 Veron-Delor, 2019 Ghai, 2018). Concerning more specifically rehabilitation after acquired brain lesions, in a pilot study with 7 patients with post-stroke motor sequelae (mild to moderate hemiparesis), Schmitz (Schmitz, 2014) had highlighted an encouraging evolution of the global dexterity scores (Box and Block Test) specifically for the 4 patients who benefited from the movement sonification system during the 20 minutes exercise sessions performed during 5 consecutive days. In a large-scale study of 65 sub-acute stroke patients, Raglio (Raglio, 2021) found similar benefits of two weeks of sonification-assisted rehabilitation on global dexterity scores (Box and Block Test, and Fugl Meyer Upper Extremity Scale) and pain scores (Numerical Pain Rating Scale). In both situations, standard motor rehabilitation exercises were sonified. In 2015, Scholz's team proposed an innovative device where users learn to move in a virtual space associated with a musical scale, with the aim of playing melodies (Scholz, 2015). In this case, a decrease in pain scores was reported, as well as a trend towards improvement in the Stroke Impact Scale functional hand assessment scores. Nevertheless, the comparative study of 25 patients with moderate upper limb motor deficits following stroke did not show any improvement in scores on the other functional assessments performed (Action Research Arm Test, Box and Block Test, Nine Hole Peg Test). In a pilot study, Robertson suggested that in the presence of audio feedback different results could be obtained depending on the hemispheric location of the brain lesion, and more precisely a deterioration in kinematic performances in the presence of audio feedback in the case of left hemispheric brain lesions) (Robertson, 2009).

Thus, although encouraging results have been obtained and repeated in different settings, contrasting effects have been demonstrated, sometimes with limited functional benefits (Nikmaram, 2019). One reason for these divergent effects could be related to the choice of sound design. Initially, the choice made was to sonify errors, for example, a sound emitted when the participant doesn't follow the predicted trajectory model (Maulucci, 2001). One trend in sound designs for motor learning or rehabilitation is to seek to avoid negative reinforcement (Bevilacqua, 2016). The quality of the sound rendering has not always been a central concern, yet the choices of sound design and mapping could be fundamental to ensure the adequacy between the sound and the gesture to be performed, and thus, the

effect of sonification on the movement control and learning (Avanzini, 2013 Dyer, 2015). Questions about sound design and coupling modalities require further investigations (Kantan, 2021). In particular, these investigations must be considered with regard to the tasks to be performed, the user profiles they address, and individual singularities. The need to consider multiple sonification modalities and to evaluate their effects was notably highlighted in two recent literature reviews (Ghai, 2018 Nown, 2022). Indeed, if the issues of sound design of sonification devices have been exposed, more particularly in the context of motor learning, to date there are few specific recommendations to guide the choices to be made. Moreover, the mechanisms underlying the effects of sonification remain insufficiently documented.

Therefore, it appears important to closely examine the effects of different sound feedbacks and different coupling modalities, considering a given motor task and diversified participant profiles. In this perspective, the objectives of the present study were to evaluate different modalities of gesture-sound interactions, categories and types of sound feedback, with adult patients with hemiparesis following an acquired brain lesion and healthy participants.

In contrast to some sonification devices developed in the context of post-stroke rehabilitation that concern prehension (Raglio, 2021 Friedman, 2014), we focus here on a simple gross motor task. Precisely, this task consists in sliding the arm on a table. Such a forward arm extension corresponds to an earlier rehabilitation recovery stage, and concerns a larger number of patients.

Precisely, we aimed at jointly evaluating the sonification effect on performing movements analyzed quantitatively, and qualitatively considering the user experience. Importantly, our task was focused on the effects of the presence of sound feedback during a single session of movement sonification, and does not constitute in itself a rehabilitation protocol. On the contrary to typical rehabilitation assessments where the motor task must be performed as quickly as possible (i.e. scores in assessments typically indexed on the number of objects moved (Desrosiers, 1994 Croarkin, 2004), or the number of repetitions of a movement or targets reached), we rather chose to give no instruction concerning the speed of execution of the task. Our goal in this study was indeed to evaluate the spontaneous effects of the sound feedback on the temporality of execution of the movement.

Method

Participants

All participants met the following inclusion criteria (Supplementary Materials S3.3): age between 18-80 years old, ability to understand the consent form and simple instructions, ability to answer questions during semi-structured interviews, and consent to participate. Participants were included in the patients group if they were hospitalized in rehabilitation department of Pitie-Salpetriere Hospital and had upper-limb hemiparesis after acquired brain lesion with sufficient recovery to initiate an elbow extension and complete the motor task (stretch their elbow while sliding on a board), and if they did not have any other neurological disease. Participants were included in the healthy subjects group if they had no acquired brain lesions or other neurological pathology, and no upper-limb deficits of any origin. Participants of both groups were not included in case of musicogenic epilepsy, heart pacemaker, or hearing deficits requiring hearing aids.

Protocol

The experimental design consisted in three steps:

1. An interview of each participant was carried out to evaluate their musical experience (vocal and/or instrumental education and practice), listening habits and possible hearing deficits. Three levels of musical expertise were distinguished: no musical practice, amateur experience or practice corresponding to a minimum of two years of regular vocal/instrumental training, and professional experience or practice. After the interview, their musical perception was assessed with the Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA) (Peretz, 2003). The participants' scores were compared to the norm established during the validation of the tool (Peretz, 2003) in order to identify possible deviations from the norm in each group (Chi-square test). At last, their manual dominance was assessed with the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971).
2. The session of sonification of the elbow extension task was carried out. The participants were instructed to extend the arm repetitively (stopped by the experimenter after around ten repetitions), sliding on the table with a fabric to minimize friction, following a straight trajectory. The instruction did not impose any

particular timing to perform the movement: the participants were explicitly asked to perform the movement at the speed of their choice. This allowed us to compare average movement durations according to the participant profiles, while keeping the sound conditions order identical for all participants. During the session, participants used each arm alternatively, less-affected then affected for patients, and dominant then non-dominant for healthy subjects, with three different categories of sonification (direct sound modulation, musical interaction, and soundscape, described in detail in section below: Experimental Setup) and no-sound condition. The order of presentation of the sound conditions starting on purpose from simple sound modulations, shown in Figure 3.1, was identical for all participants, as we were aiming primarily to provide a comparable experience among participants. We included a no-sound condition at the beginning, the end, and between the three sonification categories, in order to assess the stability of the no sound-condition and any after-effect of each sound type on the no-sound conditions. This should allow us to ensure that the no-sound condition can be used as a participant-dependant control condition. In order for the system to adapt to the motor skills of each participant, a calibration was performed at the very beginning of the task (see section Experimental setup).

3. After the session of sonification a semi-structured interview of the subject experience was recorded with a dictaphone (Guide of semi-structured interview, on Supplementary Materials S3.1). We also asked participants to sort by order of preference the sound conditions, and to choose in order 5 qualifying terms to describe their feeling in a 18 qualifier list, based on a balanced valence/arousal diagram.

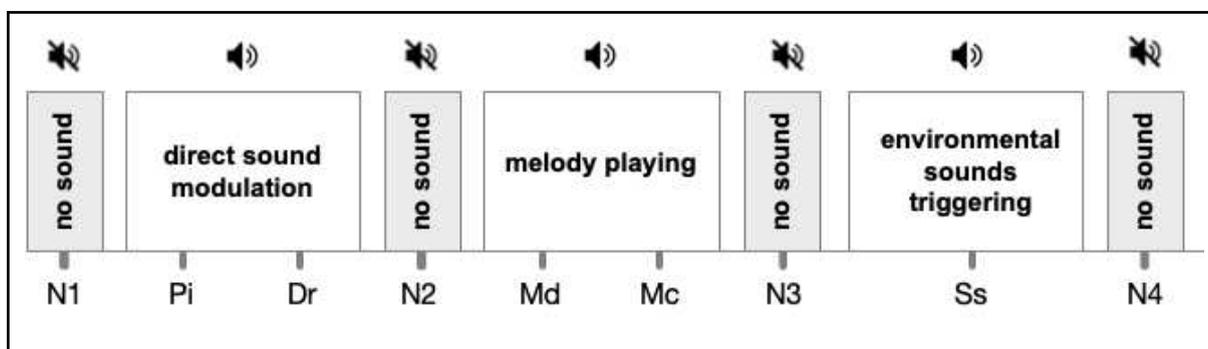


Figure 3.1 Order of the sound conditions, with the “no sound” condition intertwined

Experimental setup

A specific system was built in order to provide sonification in response to the arm movement of the participant. Three wireless motion sensors, containing each an Inertial Measurement Units (IMU) were attached to both arms, as depicted in Figure 3.2. Each IMU embeds 3D accelerometers, 3D gyroscope and 3D magnetometers, and transmits the data sampled at 200 Hz in real-time through WiFi. Those data enable the computation of the orientation of the IMU units (i.e. the Euler angles). These angles are used to compute a normalized displacement parameter after performing a calibration consisting in recording the IMUs data at the start and stop positions (indicated in Figure 3.2A). This displacement parameter is used as the input parameter in the sonification system (described in Section Sonification strategies). The calibration procedure was performed at the beginning of each participant's session, which allows adapting the sonification to each participant's motor capabilities, since the actual displacement can be different for each one.

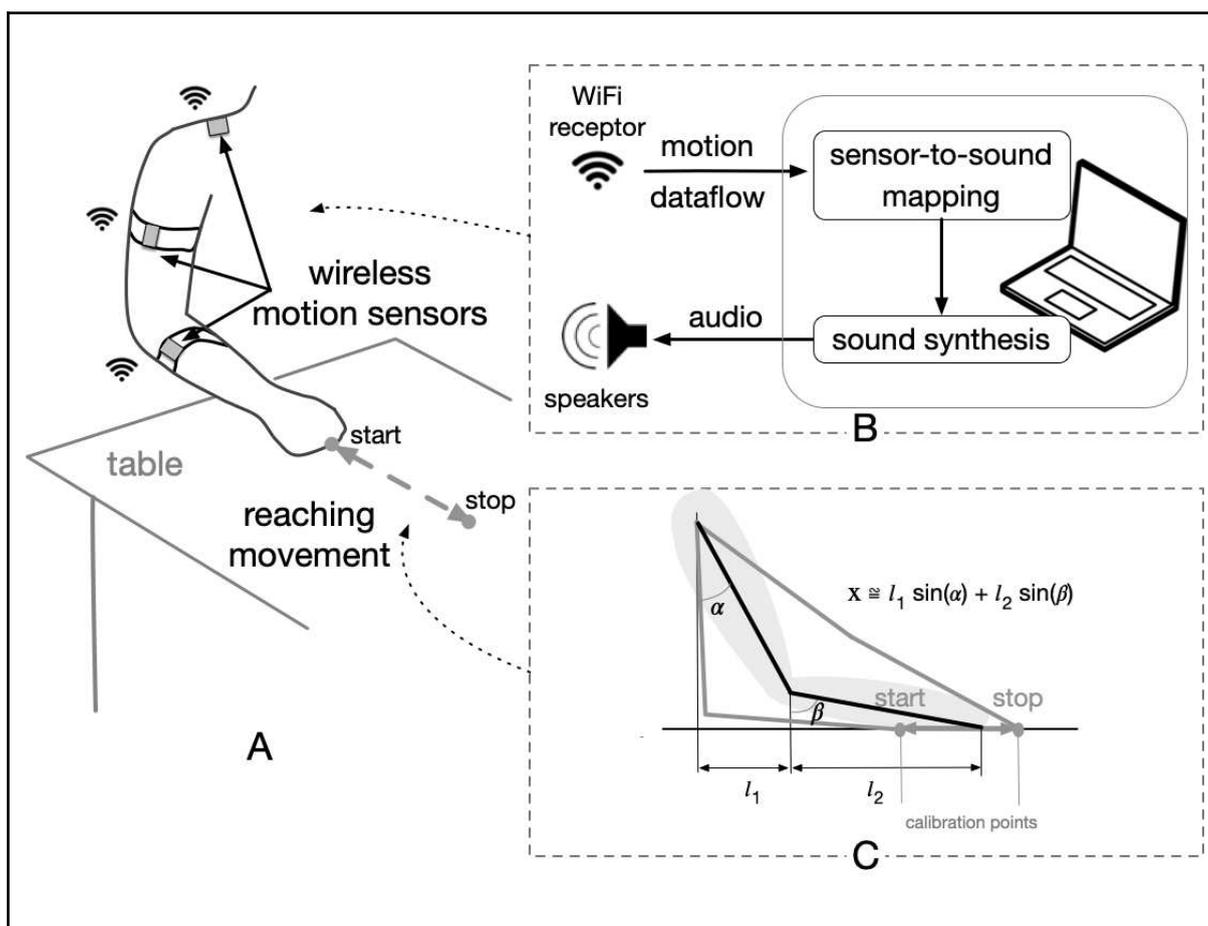


Figure 3.2 Experimental Setup.

A: Placement of the motion sensors (IMU).

B: Schematic of the dataflow process and auditory output.

C: Basic description of the computation of the displacement using the two calibration points indicated as *start* and *stop* (median plane).

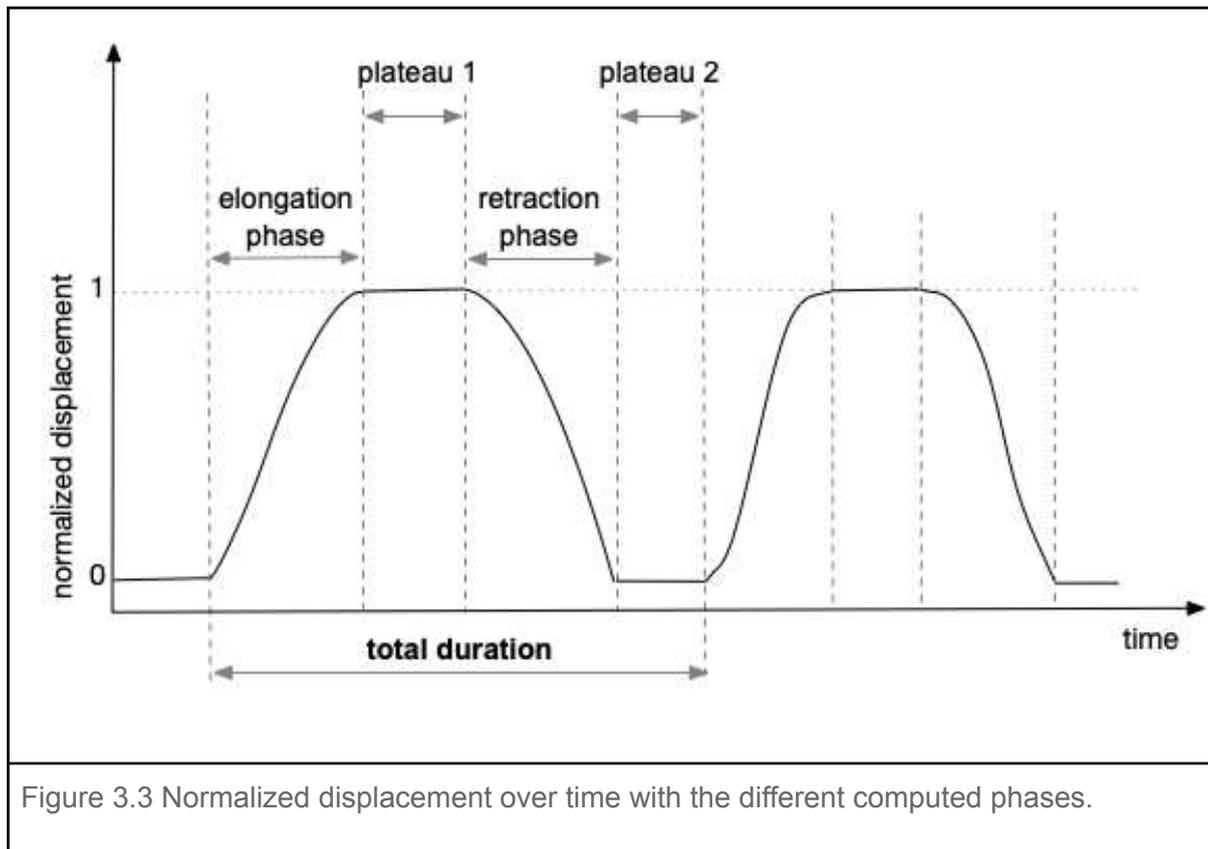
The laptop computer, connected to a soundcard and speakers, operates the sonification using a program written with Max7 (Cycling'74) and the extension MuBu for Max (Schnell, 2009). This library allows for performing data signal processing, and controlled sound synthesis. The software is also used to record all the IMUs data to the computer, along with the sounds. The audio rendering system was composed of one stereo speaker in front and two additional mono speakers in the back of the participant in order to create an immersive sound environment.

The displacement data, along with the raw IMUs data and audio output were recorded during all movement cycles, and saved in the computer. Video recordings were also performed during all the experiments, allowing the verification of the data collected with the IMUs.

A data analysis script (Matlab, R2018a, Mathworks USA) was developed allowing for data visualization, and semi-automatic segmentation of the displacement data in 4 different phases for each cycle (see Figure 3.3):

- the "elongation phase" of the upper-limb (extension of the elbow),
- the "plateau-1": phase of maintenance in a position of maximum upper-limb elongation,
- the "retraction phase", return to the initial position,
- the "plateau-2" phase in the initial retracted position, elbow bent, before initiating a new extension-flexion cycle.

This led us to compute 5 different time duration: extension duration, plateau-1 duration, return duration, plateau-2 duration, and total duration time (sum of the 4 previous ones).



Sonification design

We decided to implement 5 different types of sound, classified in 3 different sonification categories, in order to evaluate how different sounds and musical interactions could influence the movement timing and how they were perceived by the users in this context.

Audios and sound spectrograms are presented in Supplementary Materials S3.2.

1. Direct sound modulation

This category of sonification has been largely implemented in sonification systems and reported in the literature (Dubus, 2013 Nown, 2022) .

Pitch (Pi): direct relationship between the reaching distance and the pitch. In order to avoid the annoyance of a pure tone, we use granular synthesis in order to vary the pitch of a sample sound that contains a rich spectrum (from 92-500 Hz). The farther the reaching point, the higher the pitch. The range of variation of the fundamental frequency is from 92 to 122 Hz, with a strong harmonic varying from 279 to 376 Hz.

Drum (Dr): direct relationship between the reaching distance and the tempo of a regular beat pulsation. We used a drum sound, with a regular rhythmic pattern (such as 4 eighth notes). The farther the reaching point, the faster the tempo. The range of variation is from 3.2 to 16 Hz beats. At the fast tempo, the drum sounds like a drum roll.

2. Melody Playing

Sonification implying music can potentially be motivating for the participant as shown previously (Ghai, 2018). In this paradigm, the user can play a melody by moving the arm. All the notes are programmed, so the task consists in activating the progression of the melody. Two distinct cases were implemented:

Music / Discrete (Md): a full forward arm movement triggers a “discrete melody”, following a tonal harmonic progression (based on Concerto No. 5 in F Minor, BWV 1056). The movement triggers a different part of the melody at each outward and backward movements (four notes per outward or backward). This sonification was previously used in a music education scenario (Guedy, 2013).

Music / Continuous (Mc): a full arm movement enables one to continuously “play” a complete musical phrase, using the so-called gesture follower technique, which has been used in music pedagogy (Bevilacqua, 2007 and Bevilacqua, 2010). In this system, a time progression index of the gesture is estimated by comparing the performed gesture with a displacement profile recorded previously. Then, this estimated time progression index is used to trigger notes of the melody. The piece was a record of the Prelude in C Major by J.S. Bach interpreted by Glenn Gould.

3. Environmental sounds Triggering

This sonification category is based on everyday listening, invoking recognizable sound environment (Lemaitre, 2018). In this paradigm, the reaching movement is divided in three different zones, each one being associated with a specific environmental sound, called ‘soundscapes’.

Soundscape (Ss): The reaching movement is divided in three equal parts. Each one triggers, respectively, sounds of wind, river and birds.

Data Analysis

Movement Analysis

The statistical analyses were performed with JMP software® (SAS Inc., Cary, NC, USA). All tests were 2-sided. A p-value ≤ 0.05 was considered statistically significant.

A first step consisted in testing the homogeneity of the “no sound” conditions using analysis of variance (ANOVA) on repeated measures (or Friedman non parametric test on ranks when underlying assumptions were not verified), to evaluate any order effect in the no-sound sequences. Differences between these sequences being non significant, data were normalized by dividing duration values by the average of the no sound values in order to take into account inter-individual variability.

Then, for each participant (patient or healthy participants) and arm considered, Student paired t test (or Wilcoxon signed-rank test) and Anova on repeated measures (or Friedman test) were performed on normalized data taking into account sound context. This was followed, when needed, by post-hoc Tukey HSD analysis (or Durbin-conover test). When parametric tests were applied we made sure that the underlying assumptions (normality, homoscedasticity or sphericity for repeated measures) were valid.

Participant’s experience Analysis

In order to obtain the average preference of sound and qualifying terms used by the participants, we associated 1 to 5 points (5 being the preferred) to each sound or qualifying term for each individual ranking order. We then calculated the average points for each sound or terms.

The audio recording of each semi-structured interview has been transcribed verbatim. Three experimenters (IP, BC, FB) carried out the thematic analysis of the transcribed interviews (Braun, 2006). Each experimenter read the transcription and generated individual codings from the participant’s interviews. The experimenters then gathered the codes and kept the common codes or the ones that may not be common to the three experimenters, but that reached a consensus after discussions. From the selected codes, we defined thematic axes, and we kept a list of illustrative quotations for each axis. For each result we distinguish particularities of each group of participants (designed as “P” concerning patients, and “H” concerning healthy participants).

Results

Participants Description

Two groups of subjects participated and followed the protocol entirely: 15 patients with motor deficit (hemiparesia) resulting from acquired brain lesions, and 15 healthy participants were included.

Descriptive information about gender, age, musical background, MBEA scores, and side of hemiparesia are reported in Table 3.1. More details about each participant are reported on Supplementary Materials S3.3 (Descriptive data of participant's profiles).

Statuts	Patients	Healthy
Gender (M/F)	6M/9F	6M/9F
Age (mean; range)	45 years; 20-70	42 years; 21-71
Musical Background (None/Amateur/Pro)	8N/6A/1P	7N/6A/2P
MBEA (norms/falls)	10N/5F	15N/0F
Dominant Side (R/L)	15R/0L	15R/0L
Hemiparesis (R/L)	6R/9L	/

Table 3.1 Description of the groups of participants

All participants were right-handed, and gender repartition, age and musical background are similar between groups. Comparative analysis of MBEA scores revealed lower scores in patients groups than in healthy ones (Supplementary Materials S3.4). This difference is at the limit of significance (test χ^2 $p=0.05$).

Movement data results

Individual data

Data without normalization of the averages of the total durations performed by each individual with no sound (N1, N2, N3 and N4) and with sonification (Pi, Dr, Md, Mc, Ss), are presented in Figure 3.4, considering the subject group (patient and healthy participants) and the arm (paretic side vs. less affected, and dominant vs. non-dominant).

In Figure 3.4, it appears that the average duration of a complete cycle varies across participants. This result must be considered in regards to the fact that we did not give any timing constraint on the movement performance. We also observe that there are more variations in the sound condition compared to the no sound conditions. More precisely, as shown in Figure 3.5, the four “no sound” conditions were compared for all participants, and no significant difference was found. Therefore, this stability confirmed that the “no sound” condition can be used for normalizing each participant's sound conditions measurement. The results are described in the next section.

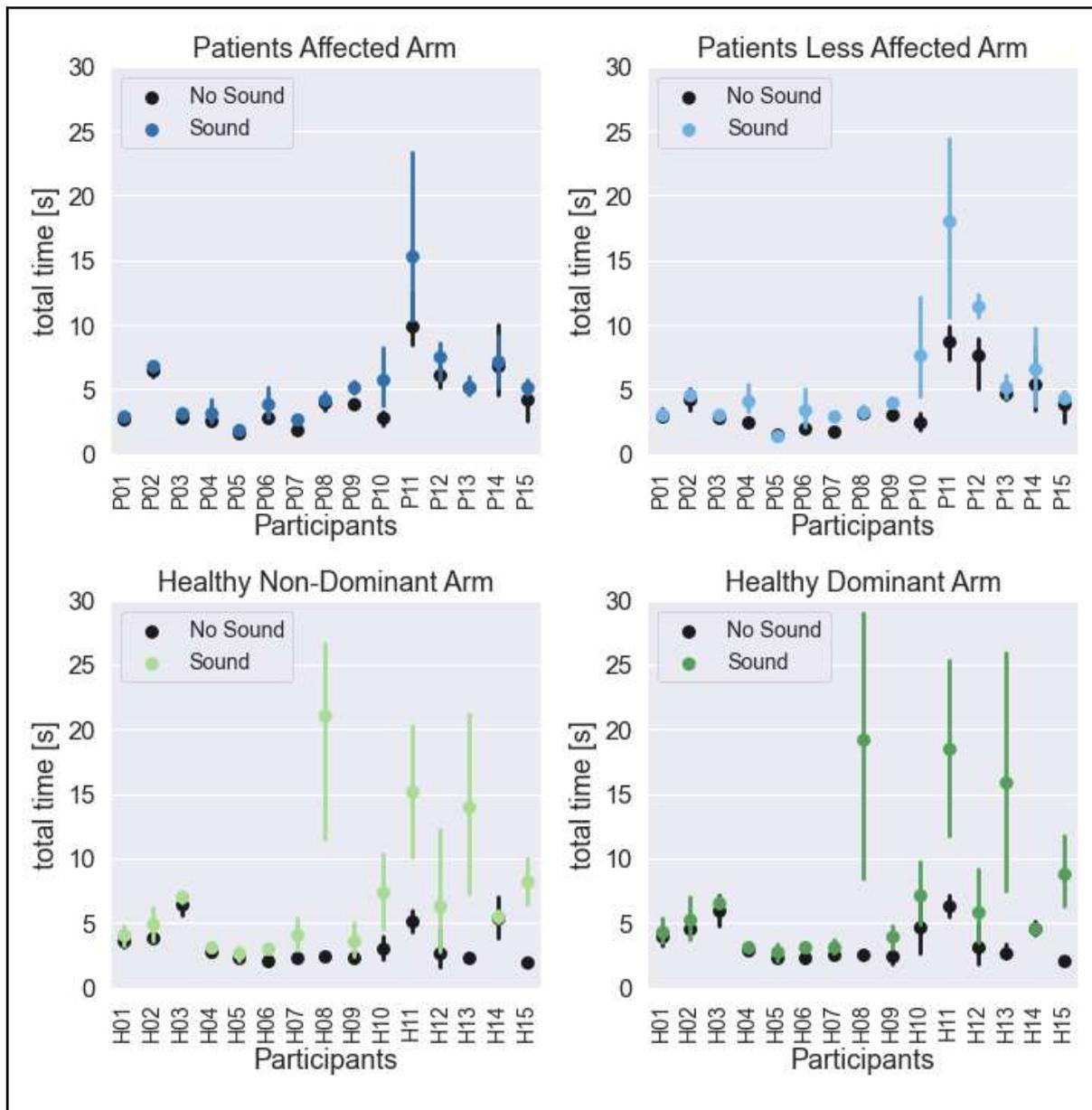


Figure 3.4 No sound vs sound condition, for patients and healthy participants.

The error bars correspond to the 95% confidence intervals.

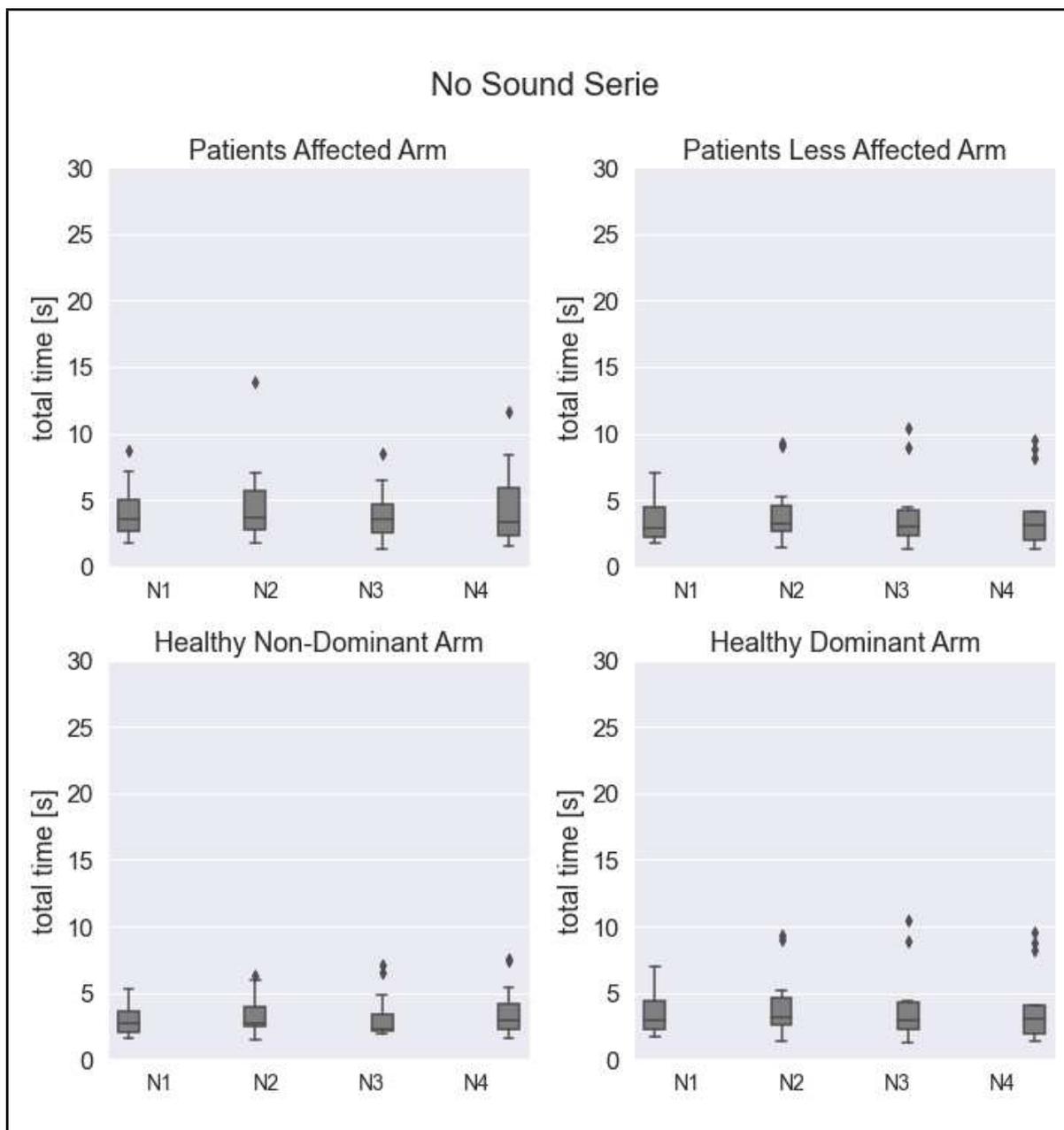


Figure 3.5 “No sound” series for patients and healthy subjects.

The y-axis range [0-30] has been chosen to be identical to figure 4 to facilitate the comparison. The box of the boxplots represents the limit of the 25th percentile and 75th percentile, the median being indicated inside.

Comparison between the sound and no sound conditions

The comparative analysis of the average of total cycle durations with no sound compared to sonification shows a significant difference for each situation considered ($p < 10^{-3}$ for both arms

in patients and healthy participants) (Figure 3.6). Specifically, the total average duration increased with sonification compared to cases without sound feedback.

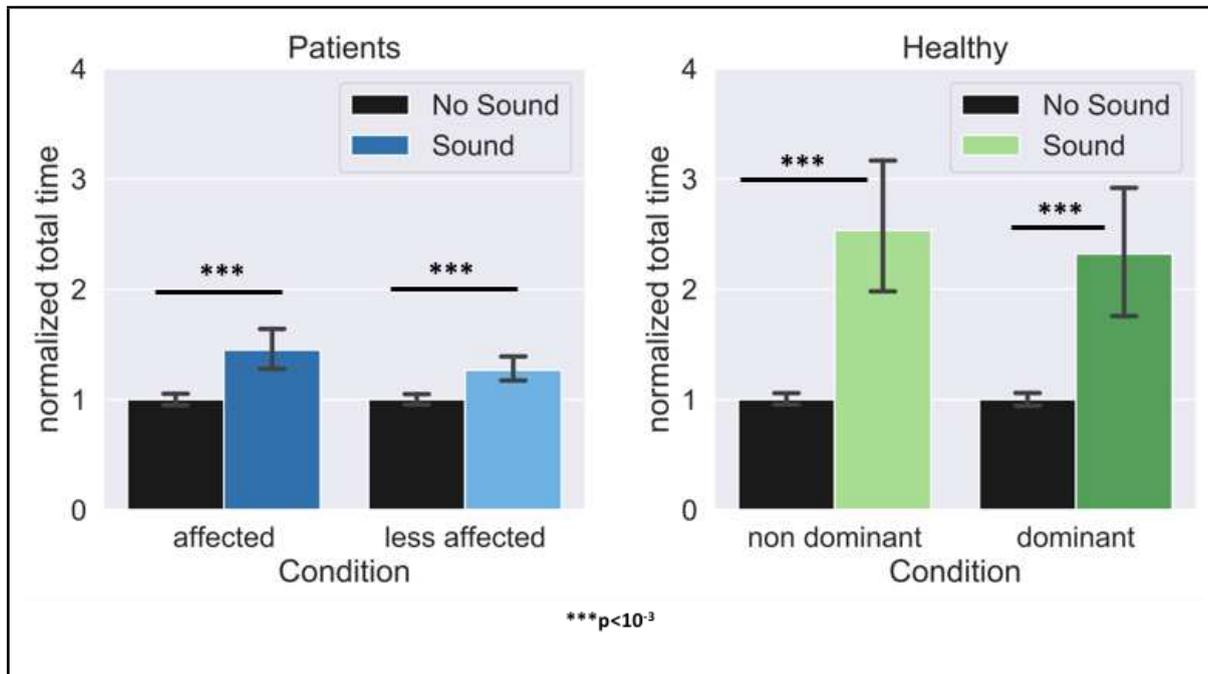


Figure 3.6 Mean for the patients (left) and healthy participants (right), for all the sound and no sound conditions, considering the different arms (affected / less affected for the patients, and non-dominant / dominant for the healthy participants).

The error bars correspond to the 95% confidence intervals.

If we consider in more details the duration of the different phases constituting the extension-flexion cycles of the elbow, we observe significant differences in the average duration of plateau-1 (phase of maximum elongation), retraction phase, and plateau-2 (phase of minimum elongation between two extension phases), when comparing sonification to no sound conditions for both groups. Plateau-1 and the return phase were longer whatever the arm considered both in patients and healthy participants ($p < 10^{-3}$). Thus, participants remained in maximal extension for a longer time with sonification compared to no sound condition and returned to the starting point slower in the presence of sonification compared to the no sound condition. The average duration of plateau-2 were also longer both in patients for paretic and less-affected arm ($p < 0.03$ and $p < 10^{-3}$, respectively) and in healthy participants for non dominant and dominant arm ($p < 0.005$ and $p < 0.02$, respectively).

Concerning the extension phase, significant differences between the sonification and no sound conditions were observed in the healthy participants for both arms and in patients for the less affected arm ($p < 10^{-3}$).

Comparison between each sound condition

The comparative analysis of the average of total cycle durations according to the sound feedback categories (Anova on repeated measures) shows significant differences between sonifications categories, in the case of the paretic arms of patients and the dominant arms of healthy participants ($p < 0.05$) (Figure 3.7). These significant differences are not found in the other situations (less affected arms of patients and non-dominant arms of controls).

The comparative analysis of each type of sound (Friedman's test) revealed no significant differences. However, there are interestingly several tendencies worth noting on descriptive analysis of repeated measures for each sound condition (Supplementary Materials S3.5) in regards to the qualitative analysis presented in the next section. Similar profiles seem to appear regarding the two groups, whatever the arm considered (S3.5B). The median durations with discrete melodies are always lower. We could also notice that there is a comparable inversion between Pitch and Drum between arms inside a group. Otherwise, results concerning Soundscape are different regarding the subject group.

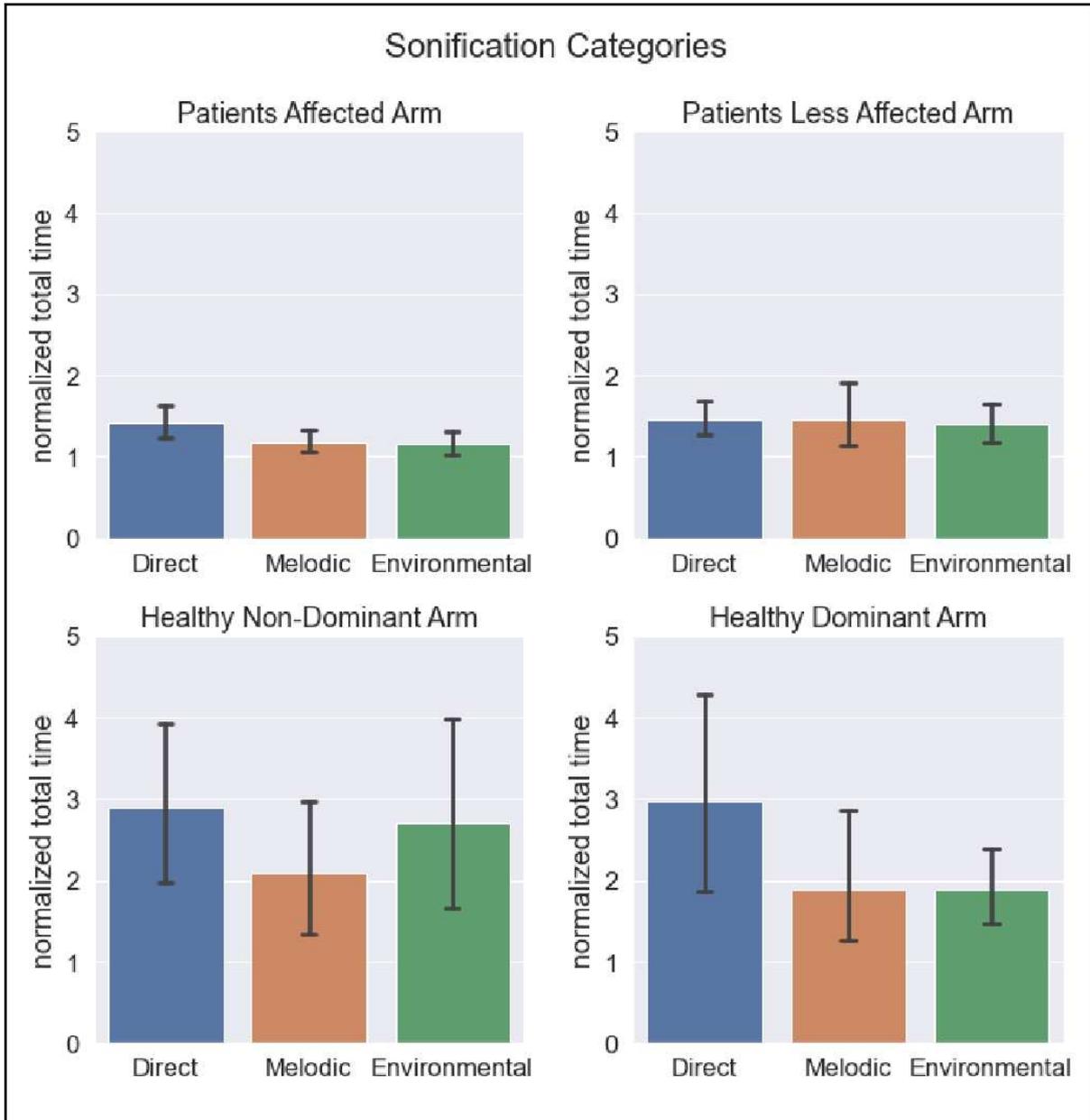


Figure 3.7 Mean for the patients and healthy participants, for the categories of sound conditions, considering the different arms (affected / less affected for the patients, and non-dominant / dominant for the healthy participants).

The error bars correspond to the 95% confidence intervals.

Results concerning the participant’s experience

Sound preferences and Experience qualifiers

We report the individual rankings, rated from 1 to 5 points, according to the hierarchical preference of the sound feedback and the qualifying terms respectively.

We found that the most appreciated sound feedback by both groups of participants is the soundscape, followed by the continuous music. The order of preferences for the others' sound feedback is different regarding the participants' group, as summarized in Table 3.II.

Among the 18 qualifiers list, *playful* is the first shared term for both groups of participants to qualify their experience. Three qualifiers are common for both groups: *amusing*, *stimulating* and *intuitive*. On the patient group the qualifier *surprising* is present in the top 5, while the qualifier *captivating* is more frequently on the healthy group of participants (Table 3.III).

Patients	Healthy
Soundscape	Soundscape
Continuous Music	Continuous Music
Discrete Music	Pitch
Pitch / Drum	Discrete Music
	Drum

Table 3.II Sound Feedback Rankings

Patients	Healthy
Playful	Playful
Surprising	Amusing
Stimulating	Captivating
Intuitive	Stimulating / Intuitive
Amusing	

Table 3.III Experience’s Qualifiers Rankings

Thematic analysis based on semi-directive interviews

The thematic analysis revealed common themes across subject groups, as well as specific themes to each subject group. First, two common themes were identified: 1) the perception of the gesture-sound interaction, and 2) the role of emotions, mental imagery and attentional processes. Secondly, we found that a specific theme for the healthy group was related to an analytical approach of the sonification system and of the gesture-sound interaction which do not appear for the patient group. Thirdly, for the patient group, we identified a specific theme related to the applicability of the sonification system in the context of rehabilitation and its potential future uses.

1. Common theme to the patient and healthy group: the perception of the gesture-sound interaction

As part of this first theme about the perception of gesture-sound interaction, we identified three sub-themes which correspond to participant's feelings using the system, the identification of cueing role, and the assignment of roles during the interaction as leader or follower.

Reported feelings using the system:

First, the majority of participants reported feeling a difference in the sound context when performing the task (24/30; 14 Patients - 10 Healthy), and they preferred performing the gestures in the presence of sonification (29/30; 14P-15H). Some participants spontaneously stated that the task was more enjoyable, funnier, more engaging, and more interesting with any type of sonification. Among the six participants who did not report perceiving any difference related to sound context, two indicated that they consciously tried not paying attention to the sound interaction, in order to move their arm independently of the sound context. These two cases represent idiosyncratic appropriation of the instruction compared to the other participants. A third participant mentioned a notable distinction between perception and volition (P04): "The impressions were not different but the intentions could be". This participant reported a deeper involvement in the task performance in the presence of the sonification: "[...] The movement is more voluntary when it produces a sound".

Second, the task performance was not considered to be more difficult with sonification than without in the majority of cases (22/30; 11P-11H). Thirteen participants (7P-6H) even reported that it was easier to perform the forearm extension task with sonification. Nevertheless, six participants (2P-4H) reported the experience being occasionally more difficult with some specific couplings, which they justify with two different reasons: a mismatch between the sound type and the gesture to be performed (Md), and when a specific movement quality was required for the sound production (Mc). Concerning the first aspect, several participants underlined that the jerky sound of the discontinuous melody was not matching with the representation of a regular gesture to be carried out. That induced a desire to adapt the gesture in relation to the produced sound, which implied then to perform it in a jerky way. Concerning the second aspect, the participants specified that Mc generates an expectation for the quality of the music produced. In turn, this would require a finer motor control (H01): "Since it's music, I want it to sound like something fluid that one could listen to".

These remarks highlight on the one hand that the sounds convey a representation of the gesture to be carried out, which can trigger a motor mental imagery associated with the perception of certain sounds, and on the other hand the need of an adequacy between the gesture and the sound. Therefore, this implies that 1) the interaction design should ensure fluidity in the gesture-sound coupling, 2) the choice of the type of sound feedback can therefore either favorably reinforce the feeling of interaction or conversely create a feeling of inadequacy.

The notion of cues:

Looking more specifically at the interaction between movement parameters and sound coupling, the participants spontaneously mentioned a notion of “cues”, as guides for the movement. This appeared recurrently while mentioning various movement characteristics: amplitude, fluidity, regularity and reproducibility. For example, about amplitude, a healthy participant said: "The sound helped me to know that I had arrived at the end of the movement" (H03), and concerning fluidity a patient commented: "If I had a fluid movement the sound was fluid, if I had a defect in my movement I heard it immediately, not only I felt it, or perhaps I did not feel it too much, but I heard it in any case " (P03).

Among the characteristics mentioned above, temporal aspects were very predominant. Several types of the sonifications effects were mentioned with respect to the temporal characteristics of movement and sound, such as a modulation of the feeling of time (P07): "I had the impression that when I perform a movement with the sound I took more time, I went less quickly to do it", the temporal reference mark (P09): "With music we have a reference point, we keep the same cruising pace", or the more conscious search for an adaptation to the representation conveyed by the sound, in order to obtain a certain sound quality (H08): "When there was no sound I always performed at the same speed, when there was sound I varied the speeds a little because I wanted it to fit with the sound". H04: "In general, if you want the sound to be harmonious, you have to make a special rhythm".

Modalities of interaction:

The participants reported different perceived interaction modalities. For a minority of participants the interaction modality was unidirectional: four of them felt that the sounds led the movement (4 participants, 3P-1H), and four other participants felt that the gesture controlled the sounds (or vice versa that the sounds followed the gestures 3P-1H). Other participants (4 patients) expressed having experienced a feedback loop. According to them, the gestures triggered the sounds which in turn provided them with feedback on the

gestures, allowing them to adapt to the perceived sound/music. Finally, for the majority of the participants, the experience of the interaction varied and evolved during the experiment (18 participants; 5P-13H) according to 3 main parameters: the type of sound feedback (1P-6H), the arm performing the task (3P), and the evolution of their understanding of the functioning of the system during the experiment (3H).

Regarding the categories, types of sound feedback, and the proposed couplings, participants unanimously expressed that the gestures controlled the sounds for the simple couplings (Pitch and Drum) while the gestures adapted to the sounds for the musical couplings, especially the continuous melody (Mc).

Regarding the way the arm performing the task affects the experience of the interaction, patients specified that, for the paretic arm, the gesture controlled the sound, whereas, with the less affected arm, the sound controlled the gesture, or that the gesture adapted to the sounds.

Finally, regarding the evolution during the experiment of the interaction understanding, participants expressed that they followed the sound at first, and that later they voluntarily controlled their gesture in order to modulate the sound. H13: "At the beginning I had the impression that I was trying to follow the sound...well to make a gesture following the rhythm, and then I understood that I could control the sound myself with the gesture". H07: "At first I didn't realize that the way I was moving my arm was influencing the sound [...] by the time I realized that the movement could influence the sound, then it started to become a lot of fun".

All of these findings suggest that the nature of the sound feedback and the coupling modalities had an influence on the perception of the interaction and on the participants' experience. H06: "The coupling between the sound and the movement changes the experience of the movement, and so even if you're trying to do the same movement, even if it's exactly the same movement, the way you experience it is different, the involvement of the person in the task is really changed."

2. Common to the patient and healthy group: Emotional mobilization, mental imagery and attentional process

This second theme was commonly found by both the patient and healthy groups, and we identified three sub-themes which correspond to participant's emotional mobilization, mental imagery and attentional process.

Emotions

Generally, experiencing the sonification device aroused many emotions. For each participant, these emotions could be contrasted, depending on the protocol stages and the sound couplings. Globally, we can highlight four main affective states expressed by the participants: playfulness, curiosity, frustration and relaxation. The notion of playfulness is predominant in the spontaneous comments of the participants (8P-9H), who repeatedly mentioned the playful dimension of the study and the use of the device. Many also mentioned curiosity and the notion of discovery linked to the exploratory dimension, and their surprise concerning the device. This surprise was often at the origin of the playfulness mentioned above. P07: "I was surprised by the sounds I was making when I was doing the acceleration and deceleration movements. It surprised me, and I liked it, I found it very playful". In other cases, the curiosity was formalized by expecting something from the device. Frustration could also emerge in reaction to the restrictive framework of the instruction: H08: "The fact that I could only do one movement of extension of the arm is a little frustrating because I would have done other movements [...] me in any case I wanted to adapt my movements to the sounds". Finally, the notion of relaxation was expressed many times by the participants, more particularly regarding two couplings : the 'continuous melody' and the 'soundscape', implying in some cases body feeling and the task performance. P09: "With the music it softens, it soothes, it's like we were being massaged, as if we were being put in a second state to be willing. At one point there was music with the sea, the wind, it relaxes you, when you are obliged to make a movement and you can't do it, it relaxes you".

Mental imagery

In addition to the motor imagery mentioned previously (section 1. Perception of the gesture-sound interaction), suggesting that a sound can induce a gesture representation to be associated with (case of the discontinuous melody inducing the desire to perform a jerky movement), the sound couplings used in the device also allowed the participants to recall and evoke certain autobiographical memories, withdrawing them from reality.

Thus, many participants associated the gesture-sound couplings with different mental imagery. The 'pitch' was associated with images of a vinyl record, a soft car engine, an ocean or even described as celestial. The 'drum' has been associated with muffled hammering or African drums. The 'discontinuous melody' has been the object of less and contrasted associations (mandolin, stalactic in a cave), although images of bouncing movements have been widely mentioned. The 'continuous melody', which original musical piece was sometimes recognized and named, was associated with the idea of spring, and

'dream-space'. This sonic coupling, in some cases, created the illusion of being a musician (H13): 'I caught myself for thirty seconds as if I were Mozart, so I was very pleased with myself'. Finally, the 'soundscape', a metaphorical space by design, was the most prolific in terms of images, very often associated with the idea of escaping. H09: "There were images that appeared, [...] I imagined a kind of walk in a forest, we walk next to the river, then we arrive in a meadow, where there were birds... we imagine the scenery that goes with it".

The stimulation of mental imagery is linked to the participants' preferences: the more the person appreciates the coupling, the more his or her mental imagery is triggered and stimulated. P08: "Every time there was music, I imagined a scene or a moment that I experienced. Especially on the music that I liked in fact".

These data support the hypothesis that the choice of sound feedback used for sonification is not neutral: in addition to its adequacy with a gesture, its emotional connotation is crucial. Thus, a further study addressing the mechanism of synchronization of the sonification emotional aspects with the user emotional state seems essential for future development of sonification devices.

Attentional modulation

Evocating the feeling of escape, as well as various emotions, led several participants to report having felt a modulation of their attention during the task, and this depending on the sound context. However, differences across groups should be highlighted.

In the control group, the majority of participants mentioned that their attention was mainly focused on the sounds (10H) H01: "When there was a sound I was thinking less about the movement, I was thinking less about reaching out, I was focusing on the sound". For the other five participants in this group, they could either focus their attention simultaneously or alternately on the sound and the gestures. One participant specified the effects of the feedback loop on their attention and evoked the notion of embodiment: "The attention is not on the movement itself, but on the movement in the context of the effects it has on the music, so I think it changes a lot our way of thinking about the body during the movement".

Within the group of patients, the comments were more contrasted: 4 expressed that their attention was rather focused on the sounds, 4 rather on the gestures, while the others mentioned that the focus of the attention varied, either according to their appreciation of the coupling, or according to the arm performing the task. Indeed, as the gesture could be difficult to perform with their paretic arm, the attention could then shift to the gesture, while

being supported by the sound: P06: "[affected side] we are very preoccupied by the very basic movement we have to do. The extension is difficult so we focus on the movement. When I liked the sounds, the attention was directed to the sounds".

Theme specific to the healthy participants group: Analysis of the sonification system

The wording used by the participants of the healthy group during the interview, concerning reasoning and understanding, reveals an analytic approach of the device. This is to be put in regards with its discovery and first use. H15: "With music I was trying to understand the relationship between my movement and the music".

This analytical step could relate to the device itself, but also to perception or behavioral levels: H02: "Each time I asked myself what part of the movement triggered or had an influence. Do we aim for regularity or do we analyze irregularity? Do we follow the movement or do we provoke it? [...] The questions I asked myself the most were what actually affects what? At times I tried to let myself be carried along... Where do I stand between the gesture and the sound? It's hard to be right in the middle actually, there's always a moment where the willingness is exercised, either the willingness to follow or the willingness to move."

Furthermore, several participants mentioned that the search for understanding of the gesture-sound interaction, aroused their curiosity and was a driving force behind their interest in it: H11: "I had a certain feeling when I found it logical. From the moment I couldn't find the logic, it was more complicated for me."

Thus, part of the interest shown by these participants towards the device is attributable to the search for understanding how it functions. This suggests that, in order to maintain an appeal for the device, particularly by generating sustained curiosity, evolving modalities should be necessary to maintain a continuous high interest.

Theme specific to the group of patient participants: Applicability of the sonification system

In the patient group, the device generated a lot of enthusiasm about its potential use as a complementary rehabilitation tool. Fourteen patients stated that they thought it could be interesting to use it in occupational therapy sessions during hospitalization and to develop an easy-to-use device for self-rehabilitation when returning home.

The only participant who expressed limitations about the device's use specified that music listening was a special time for him. He did not necessarily wish to associate it with his rehabilitation exercises. Moreover, two participants mentioned that the benefit of using the device had to be demonstrated beforehand.

Two other participants also specified that its use should be dedicated for specific time periods, guaranteeing a minimal prior recovery in order to be of interest. Thus, without being necessarily of an immediate benefit, the patients seem to enthusiastically embrace it as an accompanying tool for exercises repetition during the forearm extension recovery. Both uses in rehabilitation sessions at the hospitals and in the context of self-rehabilitation at home were considered.

Discussion

Temporality: with sound versus without sound feedback

In the present study, our objective was not to obtain a velocity gain or an improvement in the trajectory during the execution of the gesture, as usually expected in rehabilitation evaluations. Our goal was to evaluate the spontaneous effect of sonification on temporal parameters and sensation, without giving any temporal constraints to the participants, as stated in the instruction that we provided where the gesture timing was left free. Thus, whatever the sound condition (with or without sound), the participants were not asked to move as fast as possible, as there was no imposed tempo to follow. However, in the presence of sound feedback, an implicit timing could be suggested in some cases by the sound feedback. For example, in the case of the continuous musical sound feedback (Mc), although the speed remained free, the implicit tempo of the piece could suggest a movement speed.

The results we obtained suggest that, whatever the status of the participants (patients with sequelae of an acquired brain injury, or healthy participants) and the arm considered (paretic vs. less affected or dominant vs. non-dominant), the presence of a sound feedback has an effect on the participant's feeling during the experience and on the gesture performance timing of the extension-retraction of the elbow on a table. It appears that the significant fall in average amusia scores in patients does not prevent the sonification effects on the gesture timing, as also found in the healthy participants.

For all the situations considered, the quantitative results highlight a significant global slowing down of the movement in the presence of sound feedback, with in particular a longer duration of maintenance in maximum extension and minimal extension, and a slowing down of the return phase in all the situations considered. The observation of a longer duration of maximum extension in the presence of sound feedback is encouraging as to the possibility of using it in a rehabilitative context, in order to prolong the duration of a posture maintenance during stretching exercises, with the aim of promoting a progressive gain in the amplitude of movement.

Moreover, a significant increase in the duration of phase 1 (elbow extension), was also observed for the healthy participants, for both arms, and for the less affected arm of patients. Different mechanisms that could shed light on the reasons for the differences in temporality of movement in the presence of sound feedback can be considered, regarding the participants' comments and the literature.

A first hypothesis would be that the induced attentional load may have contributed to the slowing down of the movement in the presence of sound feedback. However, this hypothesis does not seem to be in agreement with the analysis of the qualitative results and the literature. Indeed, the participants indicated that the sound feedback worked as cues, allowing them to pace the movement, and this even when no tempo or intrinsic rhythmic element was present in the sound feedback (cases of the pitch and the soundscape). In this regard, Sihvonen (Sihvonen, 2017) suggests that in the presence of sound feedback participants make inferences about the timing of sound events, consequently influencing the temporality of movement completion. The repetition of a movement at a regular and constant tempo with audio feedback would thus be likely to induce its automation, and the attentional system could be less solicited thanks to this temporal cueing function. Further, research on attentional processes mobilized during motor learning has shown that external focus induces a more automatic control, less costly, and therefore beneficial for the realization of the movement (Ferrel-Chapus, 2010). From this perspective, assuming that sound feedback are sources of external focus and implicit learning, their use should therefore allow to limit attentional load, provided that the design is adapted (Dyer, 2015). Also, the observed slowing of movement would therefore not be attributable to an attentional overhead. Nevertheless, in the case of our experiment, as this was the first use of a motion sonification device for all participants (both healthy and patients), it cannot be totally excluded that other processes were involved. In particular, it is more usual for novices to adopt a strategy of attentional focus on internal parameters and explicit learning (Ferrel-Chapus, 2010). Although the intrinsic principle of sonification devices is conducive to external focus and

implicit learning (Dyer, 2015), the attentional processes mobilized during the use of sonification devices remain insufficiently known to date. In particular, it would be necessary to study the strategies used according to the users' experience in order to determine in which cases sound feedback can be considered as distractors (Parmentier, 2014 Liu, 2022), sources of external focus, or even sources of internal focus if we consider that an optimized mapping could be likely to favor attention to proprioception. In the case of rehabilitation, it is commonly accepted that it is important to limit attentional distractors and that dual-task situations can be too costly and diminish motor performance in the case of gait (Montero, 2012). However, decentering participants' attention during the execution of a motor task can, under certain conditions, also improve its completion (Kim, 2019). In this perspective, investigations centered on the mobilization of the attention aroused by sonification in the case of rehabilitation should be carried out. On this topic, the comments of the participants in our study suggest differences in strategies between individuals. Some participants mentioned focusing on the sound source, others focusing on the movement, or an oscillation in the source of attentional focus, navigating between internal (movement) and external focus (sound), depending in particular on the sound feedback used, or even in some cases a joint attention to the different sources.

A complementary approach corresponds to considering sound feedback as information contributing to internal models of movement control. Based on work on motor control and learning, Effenberg (Effenberg, 2005 and Effenberg, 2011) proposed to consider motion sonification from the perspective of multisensory integration theory. Under a reserve of few conditions (design adequacy and sound mapping) the effects of motion sonification would not be solely related to rhythmic adaptation. Building on the work of Rauschecker (Rauschecker, 2011) Effenberg (Effenberg, 2016) and Schmitz (Schmitz, 2018) clarified that, in a manner comparable to the processing of visual information, two dissociated pathways for the processing of auditory perceptual information should be considered: the conscious ventral pathway ("what") and the unconscious dorsal pathway ("where"). According to these authors, the dorsal pathway, which is unconscious and particularly important for motor control, could be brought into play during the sonification of the movement according to the design and the sound mapping. Thus, the auditory information related to the movement transmitted during the sonification would contribute to the improvement of the sensorimotor representations, and to the internal models, by being processed at a non conscious level.

In the case of our study, the participants reported that, beyond an impression of modulation of the movement speed, the sound feedback exerted a more global influence on their volition, their intention and their implication in the movement. We could therefore suppose

that a conscious processing also took place during the task performance, along with a modulation of the sense of agency. Beyond an effect on the physiological parameters of the movement, the movement sonification was shown to possibly modify the participants' body perception and representation (Tajadura, 2016). By extension, movement sonification could therefore modify their relationship to their movement by diverting them from a functional goal to an aesthetic one (Vickers, 2017). In our study, the task at hand does not involve a functional goal as in the case of pointing or grasping an object. The presence of a sound feedback thus provides the participant with a goal for the task, allowing the transition from a simple repetition task to a goal-oriented task, we can refer to a "sound-oriented" goal (Bevilacqua, 2016). The presence of a sound feedback thus modifies the intentionality of the gesture. Moreover, the interactive process influences the participants' perception of their movement control, and allows them to playfully experiment situations, alternating between sensations of producing or following sounds. In this perspective, this modulation of the sense of agency in the presence of sound feedback, especially reinforced during the first use of a sonification device, could also explain the global slowing down of the movement.

In order to shed light on the processes (neurophysiological, perceptual, attentional and cognitive) involved in the execution of simple gestures with a movement sonification device, further studies are necessary.

Specificity of the sound feedback

The comparative analysis of the temporal movement data reveals significant differences according to the category of sound considered in the cases of paretic arms of patients and dominant arms of healthy participants. No significant differences were found in the other cases, and concerning comparative analysis of each type of sound condition. However, similarities of distribution profiles encourage deepening investigations, considering our small sample size (15 participants in each group) induced a low statistical power. Also, it would be necessary to randomize the order of presentation of sound feedback to further describe a possible differentiating effect of each sound. In addition, very contrasting feelings according to the types of sound feedback were expressed in the participants' interviews and also support the interest to investigate further the effect of each sound feedback on movement timing.

The temporal dimension of a sound feedback could indeed influence the movement performance differently. In this study, Drum displays explicit timing information (direct

variation of a pulse according to the extension of the elbow) while discrete and continuous music (Md, Mc) displays implicit timing information. By implicit timing information, we refer to cases where the participants try to adapt their movement to render the musical extract as they anticipate, using prior knowledge. The intrinsic temporal and aesthetic sonification characteristics seems to influence the movement performance timing and feeling, which was previously reported in the literature (Dyer, 2015).

In the case of the continuous melody, some participants indicated they found the task more difficult considering it seems to call for a higher sound quality (as if they were playing an instrument), thus pushing towards finer motor control. However, this involvement of finer motor control did not induce any specific movement slowing down. Moreover, in spite of this greater apparent difficulty, this sound feedback was particularly appreciated by the participants. Thus, it seems that a higher musical quality was perceived as a motivational added value, even if it imposes larger constraints on the movement performance.

These observations furthermore support the hypothesis that the movement slowing down observed beforehand in the presence of sound feedback cannot be explained only by greater mobilization of attention, or a greater complexity of the gesture with certain sound feedbacks. The characteristics of the sound feedback also carry on certain specific information or agentivity, and they are likely to mobilize different processes from implicit to conscious control of the movement. The participants' statements about the transient illusion of being a musician with continuous melody feedback support the hypothesis of a modulation of the sense of agency during the sonification tasks, depending on the nature and characteristics of the sound feedback.

Furthermore, the participants' interviews also pointed towards the notion of affordance. In the case of sounds, affordance can be defined as the opportunities for actions elicited by a sound (Dyer, 2017), in other words, the sound characteristics eliciting a representation of an associated movement (Caramiaux, 2014). In our case, the discontinuous sound feedback (Md) was indeed associated with the desire to perform bouncing motions, rather than a continuous sliding motion. These remarks underline the intrinsic link between representations of movements associated with sound feedback and the necessity to take them into consideration during the sound design for a correct adequacy between the characteristics of the proposed sound and the motor task to be performed. It is very interesting to note that, beyond the category of sound feedback, the specific characteristics of each sound feedback are likely to influence the participants' feelings and emotional states.

Precisely, within the "musical" class, the specificities of each sound feedback induce different feelings and a notable preference.

These observations are in line with the literature (Dyer, 2015 Roddy, 2020) and therefore support the hypothesis that the nature of the sound feedback used, its characteristics, the sound design, and the coupling modalities, influence the movement timing and participant's experiencing. Moreover, we can hypothesize that the temporal modulations of the elbow extension gesture, found in the participants' experience, could be put into perspective with the intentionality mentioned by the participants, suggesting the interest that experimentation with the agency induced by sonification could have for engagement in the task to be performed. Finally, the trends we observed on the temporal execution of movements and differences in feeling's participants in this study centered on spontaneous effects of the sonification during a single session, suggest that, in the case of a long-term use, the impact on participant's motivation would be important to consider, particularly in a rehabilitation perspective.

Conclusion, limitations and perspectives

In conclusion, the sonification has a significant effect on the temporal execution of the movement during a single-session, even if individual temporal variations were found. This effect was established for all participants, both healthy participants and patients with upper-limb hemiparesia after acquired brain lesion, despite diminished amusia average scores. Moreover, qualitative analysis pointed out that performing the task with sonification changes participants' feelings, notably concerning intentionality, volition and motivation during movement.

Specificities and intrinsic characteristics of each type of sound feedback and gesture-sound coupling could be likely to influence the effect of sonification on the temporality of the gesture and its experience. The majority of participants have a preference for the soundscape and musical feedback, under reserve of congruence with the gesture to perform. Special attention must be paid to the potential difficulty induced and the emotions likely to be felt.

Beyond the limits present in this study (limited sample, single session without follow-up over several sessions, no randomization of the order of presentation of sound feedback, focus on the temporal criterion in the analysis of movement data) methodological questions arise

concerning the evaluation of the effects of movement sonification in the context of rehabilitation.

Our qualitative results suggest that it would be interesting to investigate attentional processes mobilized according to sonification modalities with multiple motor tasks and various participants profiles, and the possible evolution of the attentional cost according to the training.

This study calls for further investigations. A first question concerns the most efficient use of sonification, whether an immediate and spontaneous effect on movement performance with sound is finally preferable to the results of progressive learning with long-term training. Second, it remains to better establish relevant parameters or criteria (physiological, functional, attentional, motivational) for the evaluation of the effectiveness of a movement sonification system. Third, it seems important to evaluate any potential unconscious effect of the sonification of movement on voluntary motor skills.

Abbreviations

MBEA: Montreal Battery of Evaluation of Amusia; IMU: Inertial Measurement Unit; N: No Sound; Pi: Pitch; Dr: Drum; Md: Music discrete ; Mc: Music continuous; Ss: Soundscape; P: Patients; H: Healthy participants; ANOVA: Analysis of Variance

Declarations

Ethics approval and consent to participate

Ethical approval for the study was obtained from the appropriate ethic committee prior to the beginning of the study (CERES: 2016-55, University of Paris-Descartes IRB: 20165500001072). All participants signed an informed consent.

Consent for publication :

All the authors approved the publication of the article.

Availability of data and materials

The data sets and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Funding

This study was supported by Institut Universitaire d'Ingénierie en Santé (I. Peyre's PhD scholarship from IUIS, Sorbonne Université), the Labex-SMART (ANR-11-IDEX-0004-02) and from the Element project (ANR-18-CE33-0002).

Authors' contributions

IP, ARB, MS, VMP and FB conceptualized the study and developed the protocol. IP and PP-D have selected the patients and healthy participants, and performed the experiments. IP, ARB, FB, BC and AG analyzed the data and wrote the draft of the manuscript. AG performed the statistics. All authors participated in finalizing the manuscript.

Acknowledgments

The authors wish to express their gratitude to all the participants and to the staff of the department of rehabilitation of the Pitié-Salpêtrière Hospital, especially to the occupational therapist team.

References

1. Altenmüller E, Marco-Pallares J, Münte TF, Schneider S. Neural Reorganization Underlies Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2009;1169(1):395-405.
2. Altenmüller E, Schlaug G. Apollo's gift. In: *Progress in Brain Research*. Elsevier. 2015;237-52. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079612314000302>
3. Amengual JL, Rojo N, Veciana de las Heras M, Marco-Pallarés J, Grau-Sánchez J, Schneider S, et al. Sensorimotor Plasticity after Music-Supported Therapy in Chronic Stroke Patients Revealed by Transcranial Magnetic Stimulation. Balasubramaniam R, éditeur. *PLoS ONE*. 2013;8(4):e61883.
4. Avanzini F, Spagnol S, Rodà A, De Götzen A. Designing Interactive Sound for Motor Rehabilitation Tasks. *Sonic Interaction Design Book Chapter*. 2013.
5. Berner K, Cockcroft J, Morris LD, Louw Q. Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2020;24(4):251-60.
6. Bevilacqua F, Guédy F, Schnell N, Fléty E, Leroy N. Wireless sensor interface and gesture-follower for music pedagogy. *Proceedings of the 7th International Conference on New Interfaces for Musical Expression - NIME '07*, 124. 2007. <https://doi.org/10.1145/1279740.1279762>
7. Bevilacqua F, Zamborlin B, Sypniewski A, Schnell N, Guédy F, Rasamimanana N. Continuous Realtime Gesture Following and Recognition. In: Kopp S, Wachsmuth I, éditeurs. *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction [Internet]*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2010;73-84. (Hutchison D, Kanade T, Kittler J, Kleinberg JM, Mattern F, Mitchell JC, et al. *Lecture Notes in Computer Science*; vol. 5934). http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12553-9_7
8. Bevilacqua F, Boyer EO, Françoise J, Houix O, Susini P, Roby-Brami A, et al. Sensori-Motor Learning with Movement Sonification: Perspectives from Recent Interdisciplinary Studies. *Front Neurosci*. 2016. <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fnins.2016.00385/abstract>
9. Braun V, Clarke V. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*. 2006;3(2):77-101.
10. Caramiaux B, Françoise J, Schnell N, Bevilacqua F. Mapping Through Listening. *Computer Music Journal*. 2014;38:3, pp. 34–48, doi:10.1162/COMJ a 00255

11. Cerniauskaite M, Quintas R, Koutsogeorgou E, Meucci P, Sattin D, Leonardi M, et al. Quality-of-Life and Disability in Patients with Stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. 2012;91(13):S39-47.
12. Chan V, Zagorski B, Parsons D, Colantonio A. Older adults with acquired brain injury: a population based study. *BMC Geriatr*. 2013;13(1):97.
13. Cho YS, Jang SH, Cho JS, Kim MJ, Lee HD, Lee SY, et al. Evaluation of Validity and Reliability of Inertial Measurement Unit-Based Gait Analysis Systems. *Ann Rehabil Med*. 2018;42(6):872-83.
14. Croarkin E, Danoff J, Barnes C. Evidence-Based Rating of Upper-Extremity Motor Function Tests Used for People Following a Stroke. *Physical Therapy*. 2004;84(1):62-74.
15. de Dreu MJ, van der Wilk ASD, Poppe E, Kwakkel G, van Wegen EEH. Rehabilitation, exercise therapy and music in patients with Parkinson's disease: a meta-analysis of the effects of music-based movement therapy on walking ability, balance and quality of life. *Parkinsonism & Related Disorders*. 2012;18:S114-9.
16. Desrosiers J, Bravo G, Hébert R, Dutil É, Mercier L. Validation of the Box and Block Test as a measure of dexterity of elderly people: Reliability, validity, and norms studies. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1994;75(7):751-5.
17. Dubus G, Bresin R. A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *PLOS One*. 2013.
18. Dyer JF, Stapleton P, W. M. Rodger M. Sonification as Concurrent Augmented Feedback for Motor Skill Learning and the Importance of Mapping Design. *TOPSYJ*. 2015;8(1):192-202.
19. Dyer JF. Human movement sonification for motor skill learning [PhD Thesis]. Queen's University Belfast. Faculty of Engineering and Physical Sciences. 2017.
20. Effenberg AO. Movement Sonification: Effects on Perception and Action. *IEEE Multimedia*. 2005;12(2):53-9.
21. Effenberg AO, Fehse U, Weber A. Movement Sonification: Audiovisual benefits on motor learning. *BIO Web of Conferences*. 2011;1:00022.
22. Effenberg AO, Fehse U, Schmitz G, Krueger B, Mechling H. Movement Sonification: Effects on Motor Learning beyond Rhythmic Adjustments. *Front Neurosci* [Internet]. 2016;10. <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fnins.2016.00219/abstract>
23. Ferrel-Chapus C, Tahej PK. Processus attentionnels et apprentissage moteur. *Sciences&Motricité*. 2010;71:71-83.
24. Flaunacco E, Lopez L, Terribili C, Montico M, Zoia S, Schön D. Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. Amitay S, éditeur. *PLoS ONE*. 2015;10(9):e0138715.

25. Friedman N, Chan V, Reinkensmeyer AN, Beroukhim A, Zambrano GJ, Bachman M, et al. Retraining and assessing hand movement after stroke using the MusicGlove: comparison with conventional hand therapy and isometric grip training. *J NeuroEngineering Rehabil.* 2014;11(1):76.
26. Gaser C, Schlaug G. Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians. *J Neurosci.* 2003;23(27):9240-5.
27. Ghai S. Effects of Real-Time (Sonification) and Rhythmic Auditory Stimuli on Recovering Arm Function Post Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Neurol.* 2018;9:488.
28. Ghai S, Ghai I. Effects of (music-based) rhythmic auditory cueing training on gait and posture post-stroke: A systematic review & dose-response meta-analysis. *Sci Rep.* 2019;9(1):2183.
29. Guédy F, Bevilacqua F, Fober D, Robert L. Etudier et jouer une œuvre musicale en manipulant des objets. *Journées d'Informatique Musicale.* 2013.
30. Hermann T, Hunt A, Neuhoff JG. *The Sonification Handbook.* Logos Verlag. Berlin. 2011.
31. Kantan PR, Spaich EG, Dahl S. A Metaphor-Based Technical Framework for Musical Sonification in Movement Rehabilitation. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021)* [Internet]. Virtual Conference: International Community for Auditory Display. 2021;176-83.
<http://hdl.handle.net/1853/66350>
32. Kim SA, Ryu YU, Shin HK. The effects of different attentional focus on poststroke gait. *J Exerc Rehabil.* 2019;15(4):592-6.
33. Lecoffre C, de Peretti C, Gabet A, Grimaud O, Woimant F, Giroud M, et al. National Trends in Patients Hospitalized for Stroke and Stroke Mortality in France, 2008 to 2014. *Stroke.* 2017;48(11):2939-45.
34. Lemaitre G, Grimault N, Suied C. Acoustics and Psychoacoustics of Sound Scenes and Events. *Computational Analysis of Sound Scenes and Events.* Book Chapter. 2018.
35. Liu W, Magalhaes MA, Mackay WE, Beaudouin-Lafon M, Bevilacqua F. Motor Variability in Complex Gesture Learning: Effects of Movement Sonification and Musical Background. *ACM Trans Appl Percept.* 2022;19(1):1-21.
36. Martínez-Molina N, Siponkoski ST, Kuusela L, Laitinen S, Holma M, Ahlfors M, et al. Resting-State Network Plasticity Induced by Music Therapy after Traumatic Brain Injury. Garraghty PE, éditeur. *Neural Plasticity.* 2021;2021:1-18.
37. Maulucci RA, Eckhouse RH. Retraining reaching in chronic stroke with real-time auditory feedback. *NRE.* 2001;16(3):171-82.

38. Mezzarobba S, Grassi M, Pellegrini L, Catalan M, Krüger B, Stragapede L, et al. Action observation improves sit-to-walk in patients with Parkinson's disease and freezing of gait. Biomechanical analysis of performance. *Parkinsonism & Related Disorders*. 2020;80:133-7.
39. Montero-Odasso M, Verghese J, Beauchet O, Hausdorff JM. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. *J Am Geriatr Soc*. 2012;60(11):2127-36. doi: 10.1111/j.1532-5415.2012.04209.x. PMID: 23110433; PMCID: PMC3498517.
40. Moumdjian L, Sarkamo T, Leone C, Leman M, Feys P. Effectiveness of music-based interventions on motricity or cognitive functioning in neurological populations: A systematic review. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2016.
41. Münte TF, Altenmüller E, Jäncke L. The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nat Rev Neurosci*. 2002;3(6):473-8.
42. Nikmaram N, Scholz DS, Großbach M, Schmidt SB, Spogis J, Belardinelli P, Müller-Dahlhaus F, Remy J, Ziemann U, Rollnik JD, Altenmüller E. Musical Sonification of Arm Movements in Stroke Rehabilitation Yields Limited Benefits. *Front Neurosci*. 2019;13:1378. doi: 10.3389/fnins.2019.01378. PMID: 31920526; PMCID: PMC6933006.
43. Nown TH, Upadhyay P, Kerr A, Andonovic I, Tachtatzis C, Grealy MA. A Mapping Review of Real-Time Movement Sonification Systems for Movement Rehabilitation. *IEEE Rev Biomed Eng*. 2022;1-16.
44. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9(1):97-113.
45. Parmentier FBR. The cognitive determinants of behavioral distraction by deviant auditory stimuli: a review. *Psychological Research*. 2014;78(3):321-38.
46. Pereira APS, Marinho V, Gupta D, Magalhães F, Ayres C, Teixeira S. Music Therapy and Dance as Gait Rehabilitation in Patients With Parkinson Disease: A Review of Evidence. *J Geriatr Psychiatry Neurol*. 2019;32(1):49-56.
47. Peretz I, Champod AS, Hyde K. Varieties of Musical Disorders The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann. N. Y. Acad. Sci*. 2003;999:58-75.
48. Pollock A, Farmer SE, Brady MC, Langhorne P, Mead GE, Mehrholz J, et al. Interventions for improving upper limb function after stroke (Review). *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2014.
49. Raglio A, Oasi O, Gianotti M, Rossi A, Goulene K, Stramba-Badiale M. Improvement of spontaneous language in stroke patients with chronic aphasia treated with music therapy: a randomized controlled trial. *International Journal of Neuroscience*. 2016;126(3):235-42.

50. Raglio A, Panigazzi M, Colombo R, Tramontano M, Iosa M, Mastrogiacomo S, et al. Hand rehabilitation with sonification techniques in the subacute stage of stroke. *Sci Rep.* 2021;11(1):7237.
51. Rauschecker JP. An expanded role for the dorsal auditory pathway in sensorimotor control and integration. *Hearing Research.* 2011;271(1-2):16-25.
52. Robertson JV, Hoellinger T, Lindberg P, Bensmail D, Hanneton S, Roby-Brami A. Effect of auditory feedback differs according to side of hemiparesis: a comparative pilot study. *J NeuroEngineering Rehabil.* 2009;6(1):45.
53. Roddy S. Mapping for meaning: the embodied sonification listening model and its implications for the mapping problem in sonic information design. *Journal on Multimodal User Interfaces.* 2020; 9.
54. Rojo N, Amengual J, Juncadella M, Rubio F, Camara E, Marco-Pallares J, et al. Music-Supported Therapy induces plasticity in the sensorimotor cortex in chronic stroke: A single-case study using multimodal imaging (fMRI-TMS). *Brain Injury.* 2011;25(7-8):787-93.
55. Schaffert N, Janzen TB, Mattes K, Thaut MH. A Review on the Relationship Between Sound and Movement in Sports and Rehabilitation. *Front Psychol.* 2019;10:244.
56. Schmitz G, Bergmann J, Effenberg AO, Krewer C, Hwang TH, Müller F. Movement Sonification in Stroke Rehabilitation. *Front Neurol.* 2018;9:389.
57. Schmitz G, Kroeger D, Effenberg AO. A mobile sonification system for stroke rehabilitation. *The 20th International Conference on Auditory Display ICAD 2014.* New York. 2014;7.
58. Schnell N, Röbel A, Schwarz D, Peeters G, Borghesi R. MuBu & Friends - Assembling Tools for Content Based Real-Time Interactive Audio Processing in Max/MSP. 2009.
59. Scholz DS, Rhode S, Großbach M, Rollnik J, Altenmüller E. Moving with music for stroke rehabilitation: a sonification feasibility study: Musical sonification in stroke rehabilitation. *Ann NY Acad Sci.* 2015;1337(1):69-76.
60. Sethi A, Ting J, Allen, M, Clark W, Weber, D. Advances in motion and electromyography based wearable technology for upper extremity function rehabilitation: A review. *Journal of Hand Therapy.* 2020;7.
61. Sihvonen AJ, Särkämö T, Leo V, Tervaniemi M, Altenmüller E, Soinila S. Music-based interventions in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology.* 2017;16(8):648-60.
62. Siponkoski ST, Martínez-Molina N, Kuusela L, Laitinen S, Holma M, Ahlfors M, Jordan-Kilkkki P, Ala-Kauhalauma K, Melkas S, Pekkola J, Rodriguez-Fornells A, Laine M, Ylinen A, Rantanen P, Koskinen S, Lipsanen J, Särkämö T. Music Therapy Enhances Executive Functions and Prefrontal Structural Neuroplasticity after

Traumatic Brain Injury: Evidence from a Randomized Controlled Trial. *J Neurotrauma*. 2020 15;37(4):618-634. doi: 10.1089/neu.2019.6413. PMID: 31642408.

63. Tajadura-Jiménez A. Action Sounds Modulate Arm Reaching Movements. *Frontiers in Psychology*. 2016;7:14.
64. Véron-Delor L, Pinto S, Eusebio A, Azulay JP, Witjas T, Velay JL, et al. Musical sonification improves motor control in Parkinson's disease: a proof of concept with handwriting. *Ann N Y Acad Sci*. 2019;14.
65. Vickers P, Hogg B, Worrall D. Aesthetics of sonification : Taking the subject-position. In C. Wöllner (Éd.), *Body, sound and space in music and beyond: Multimodal explorations*. Routledge. 2017.
66. Wan CY, Schlaug G. Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span. *Neuroscientist*. 2010;16(5):566-77.
67. Yelnik AP, Bonan IV, Simon O, Gellez-Leman MC. Rééducation après accident vasculaire cérébral. *EMC - Neurologie*. 2008;5(3):1-15.
68. Zhang Y, Cai J, Zhang Y, Ren T, Zhao M, Zhao Q. Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sci Rep*. 2016;6(1):38521.

Supplementary Materials

S3.1: Guide of semi-structured interview

1. Could you summarize the study (steps, elements you noticed, those you appreciated and didn't like)?
2. Could you describe your impressions, physical feelings, and the thoughts that crossed your mind when you carried out the different stages of the experience?
3. Did you notice any differences according to the sound context when you were doing the movement? Which differences? In which cases?
4. During gesture-sound coupling, on which elements did you focus your attention?
5.
 - a. What sound contexts did you appreciate? For what reasons?
 - b. What sound contexts did you not appreciate? For what reasons?
 - c. Could you rank the sound contexts in order of your preference?
6. Answer only for patients: Would you use this type of device to continue your rehabilitation at home?
7. In this list, choose the terms that correspond to your feelings during the experience. Then, rank them from 1 to 5.

Unpleasant

Tiring

Stressful

Uncomfortable

Playful

Stimulating

Intuitive

Captivating

Annoying

Surprising

Relaxing

Frustrating

Irritating

Easy

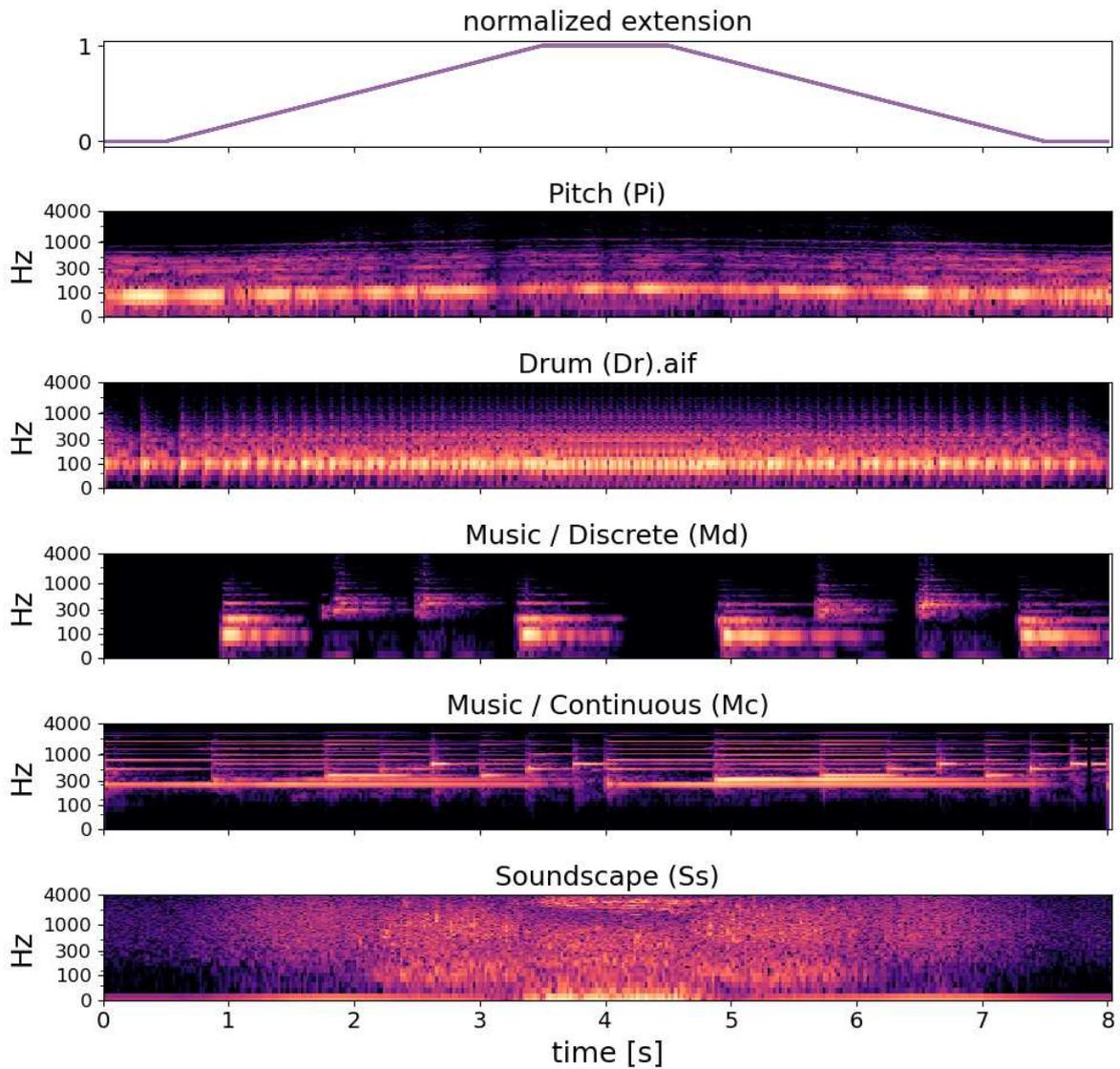
Pleasant

Difficult

Embarrassing

Amusing

S3.2: Sound Spectrogram



Sound spectrogram for each sound condition. This was measured using the same simulated extension for each sound condition to enable the comparison. This was performed using the librosa library using a FFT window of 2048 pts and a hop length of = 1024 pts, at sampling frequency of 44.1 KHz).

S3.3: Descriptive Data of Participant's Profiles

Patient	Age	Sex	Type	Site	Paretic Arm	Time between lesion and sonif session (months)	Musical Background	MBEA Average	Hearing troubles / Exploration
P1	34	F	Hemorrhagic Stroke	Right Frontal Lobe	Left	2	Amateur	25,8	None
P2	42	F	Ischemic Stroke	Pons-Midbrain	Right	4	None	23,4	Tinnitus
P3	49	M	Ischemic Stroke	Territory of Left Middle Cerebral Artery	Right	1	None	27,0	None
P4	27	M	TBI with post-TBI hematoma	Right Fronto-Parietal Lobe	Left	9	Amateur	19,2	Tinnitus
P5	40	F	Ischemic Stroke	Territory of Right Middle Cerebral Artery	Left	4	None	17,2	None
P6	59	F	Ischemic Stroke	Territory of Left Middle Cerebral Artery	Right	1	Amateur	22,4	None
P7	45	F	Ischemic Stroke	Territory of Left Middle Cerebral Artery	Right	7	None	23,6	Audio test OK
P8	28	F	Ischemic Stroke	Territory of Right Middle Cerebral Artery	Left	10	Amateur	24,2	Audio test OK
P9	47	M	Ischemic Stroke	Territory of Left Middle Cerebral Artery	Right	16	None	21,2	Audio test OK
P10	55	F	Hemorrhagic Stroke	Pons	Left	13	None	21,4	Audio test OK
P11	70	F	Hemorrhagic Stroke	Right Capsulo-thalamus	Left	3	Amateur	26,0	None
P12	64	M	Ischemic Stroke	Right Paramedian Pons	Left	1	Professional	26,6	Transient Tinnitus Audio test OK
P13	20	F	Ischemic Stroke	Right Anterior Cerebral artery	Left	2	None	26,4	Transient Tinnitus Audio test OK
P14	42	M	Ischemic Stroke	Left Posterior cerebral artery	Right	11	None	25,4	Transient Tinnitus Audio test OK
P15	48	M	Ischemic Stroke	Territory of Left Middle Cerebral Artery	Right	4	Amateur	26,6	Audio Test OK

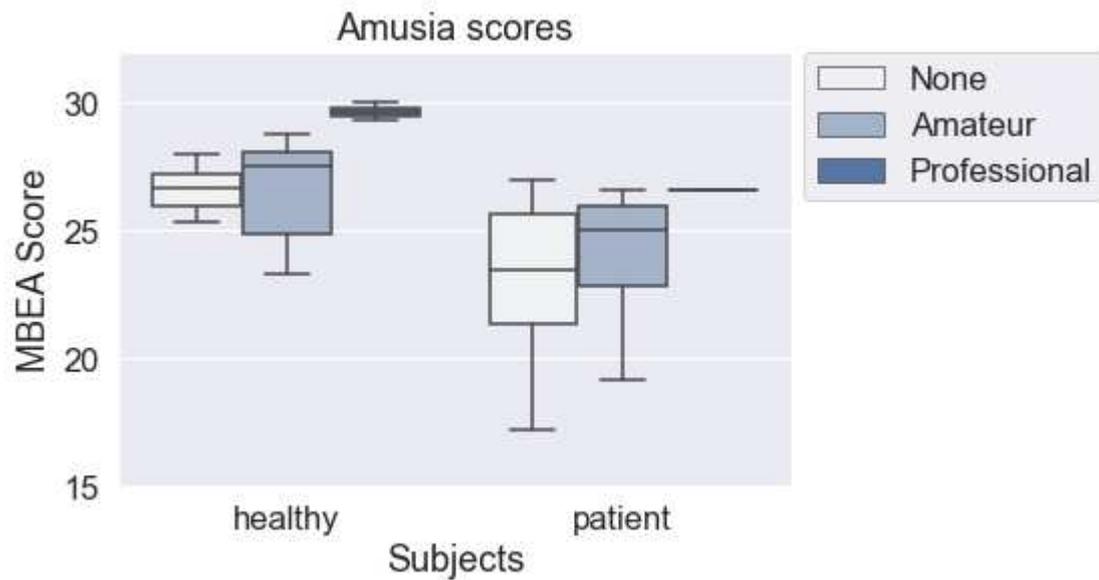
Table A: Descriptive information of each patient

TBI: Traumatic Brain Injury

Healthy	Age	Sex	Musical Background	MBEA Average	Hearing troubles / Exploration
H1	24	H	Amateur	27,5	Tinnitus
H2	37	H	Professional	30	Transient tinnitus
H3	21	F	None	28	None
H4	23	H	None	27,2	Tinnitus Audio test OK
H5	30	F	Amateur	27,5	None
H6	34	H	Amateur	25,7	Tinnitus Audio test OK
H7	61	F	Amateur	28,7	None
H8	32	F	Amateur	28,8	None
H9	29	H	Professional	29,3	Tinnitus
H10	46	F	None	25,3	None
H11	42	F	None	24,2	Audio test OK
H12	58	F	None	26,7	Audio test OK
H13	52	H	None	23,3	None
H14	71	F	None	26	None
H15	68	F	Amateur	24	Audio test OK

Table B: Descriptive information of each healthy participants

S3.4: Amusia Scores



Plot of the Amusia score for the healthy and patient participants, considering different levels of music practice: non-musician (“None”), Amateur and Professional. The box of the boxplots represents the limit of the 25th percentile and 75th percentile, the median being indicated inside.

S3.5: Sound condition results

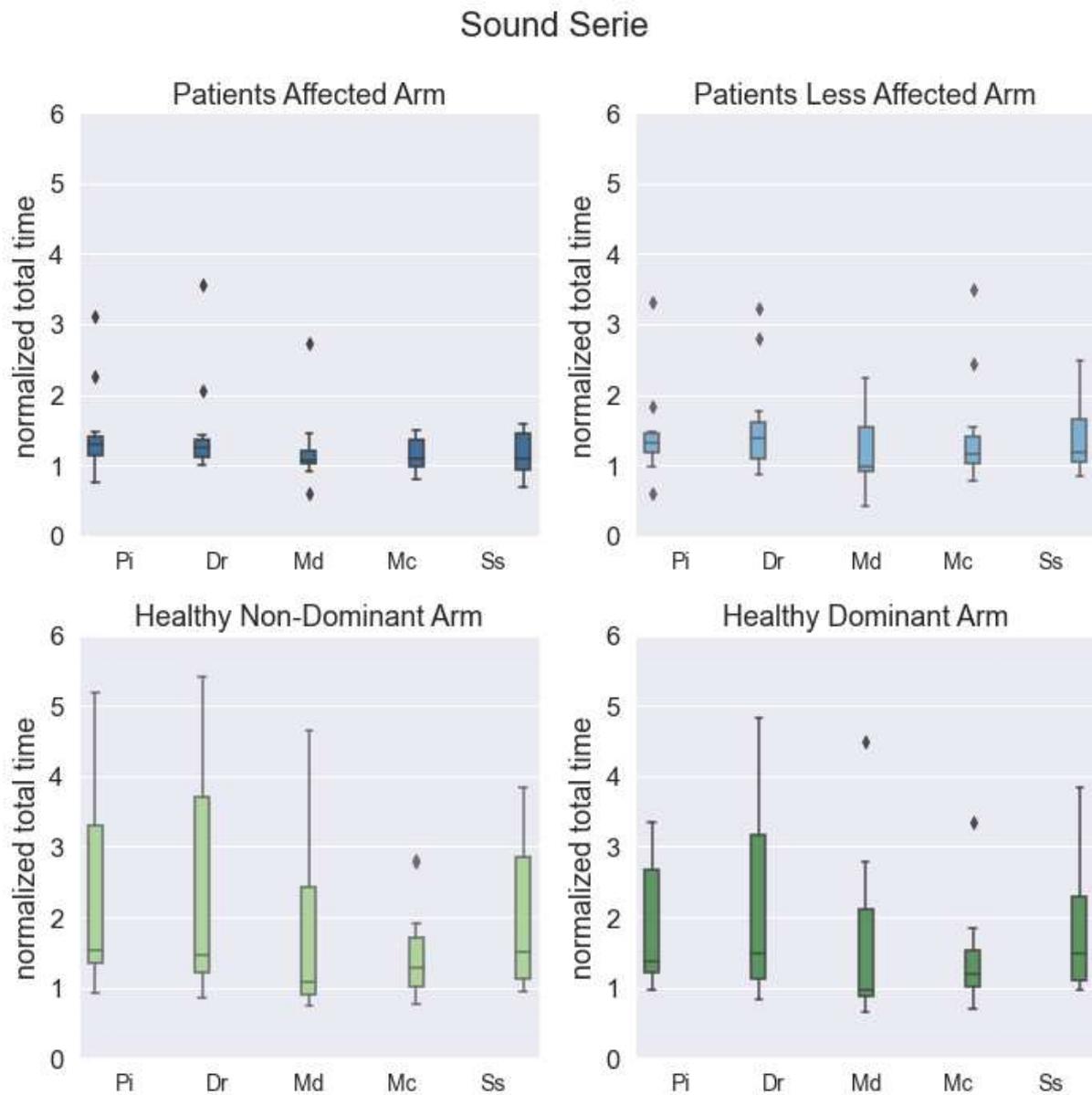


Figure S3.5A: Boxplots of the normalized total time for each sound condition, reported for the Patients and Healthy participants, considering each arm. The box of the boxplots represents the limit of the 25th percentile and 75th percentile, the median being indicated inside.

Pi: Pitch; Dr: Drum; Md: Music Discrete; Mc: Music Continuous; Ss: Soundscape

Sound Serie

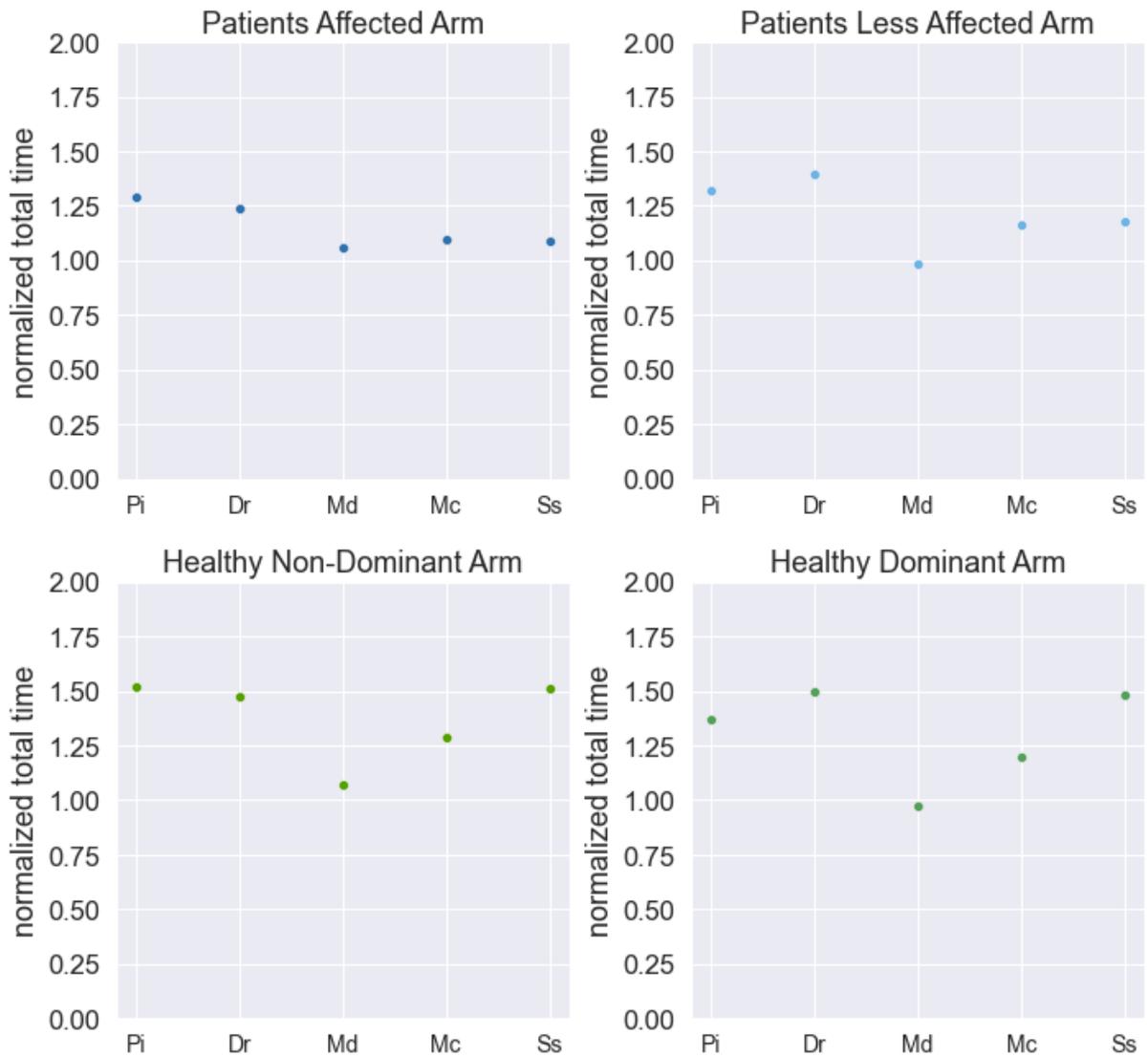


Figure S3.5B: Median of the normalized total time for each sound condition, reported for the Patients and Healthy participants, considering each arm

3. Synthèse

Les résultats obtenus mettent en évidence un effet significatif de la présence de retours sonores interactifs sur la temporalité de réalisation de gestes d'extension-retrait du coude, en comparaison à une situation sans retour sonore. En effet, en présence des retours sonores interactifs la durée moyenne des cycles d'extension-retrait est significativement augmentée, et ce quelque soit le groupe de participants et le bras considéré. L'analyse des différentes phases des cycles permet la mise en évidence d'un allongement significatif de la durée des phases de plateau en extension maximale, de retrait (retour vers la position initiale), et plateau en position initiale, pour l'ensemble des participants. La durée de la phase d'extension du coude est également significativement augmentée quelque soit le bras considéré pour les participants ne présentant pas de troubles moteurs, et pour le bras non parétique chez les patients.

Plusieurs hypothèses ont été formulées au regard du ralentissement du mouvement en présence des retours sonores interactifs. L'expérience de sonification du mouvement, par la boucle interactionnelle qu'elle suppose, semble présenter des particularités dans la mobilisation attentionnelle et le vécu des participants qu'elle suscite.

D'un point de vue qualitatif, les participants ont majoritairement exprimé leur préférence pour les situations en présence des retours sonores interactifs, plutôt que sans retour sonore, et plus particulièrement avec le paysage sonore de nature, univers métaphorique, et le retour sonore musical continu.

Les participants ont exprimé la notion de repère, notamment temporel, en présence des retours sonores interactifs.

En fonction du type de retour sonore considéré, les ressentis des participants ont été contrastés, du point de vue des émotions suscitées (amusement, curiosité, frustration et détente), et du point de vue de la mobilisation de l'imagerie mentale. Certains retours favorisent la stimulation de l'imaginaire (paysage sonore), tandis que d'autres étaient associés à une représentation mentale des caractéristiques du mouvement supposées lui correspondre (mouvements saccadés et rebondis pour le retour sonore musical discontinu). Ce dernier aspect est à considérer au regard de la notion d'affordance gestuelles sonores, confirmant l'hypothèse qu'outre des instruments sonores tangibles, des sons sont susceptibles de mobiliser une imagerie mentale motrice.

Enfin, à partir d'une liste de 18 termes, les participants ont majoritairement qualifié l'expérience de ludique, amusante, stimulante et intuitive.

CHAPITRE 4

Conception d'un dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation en autonomie supervisée

Les étapes du processus de co-conception centrée utilisateurs du dispositif, depuis la définition des critères de conception jusqu'à la discussion des avantages et limites du dispositif conçu, sont exposées dans ce chapitre.

1. Co-conception centrée utilisateurs: définition du projet et présentation des acteurs impliqués

1.1 Contexte et objectifs

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'objectif était de concevoir un dispositif de sonification du mouvement pouvant conjointement soutenir la création et le maintien d'un lien entre les patients et leurs thérapeutes autour d'un objet dédié au temps quotidien de rééducation, et s'inscrire dans leur accompagnement à long terme, en favorisant leur implication et autonomie dans leur rééducation tout en évitant leur isolement.

Le dispositif, initialement envisagé dans la perspective de l'accompagnement de la transition entre l'hôpital et le domicile pour permettre une utilisation en autonomie supervisée, pourrait également s'avérer utile dans d'autres situations où les séances ne peuvent avoir lieu en présence d'un thérapeute (distance géographique, effectifs insuffisants, journées sans rééducation lors du passage en hôpital de jour, ou encore restriction d'accès à des lieux de soins comme lors de la période de pandémie de 2020).

Ainsi, la particularité du processus de conception est de s'adresser aux **binômes patients-thérapeutes**, nécessitant donc la prise en considération conjointe de ces deux populations d'utilisateurs.

Afin de créer un dispositif novateur, répondant conjointement aux besoins spécifiques des patients présentant des séquelles notamment motrices, telles qu'une hémiparésie au membre supérieur, et à ceux des thérapeutes, disposant dans la majorité des situations d'un temps limité pour appréhender un nouvel outil, un processus incluant co-design et design centré utilisateur a été suivi (Sanders, 2002; Rizzo, 2010; Vial, 2021).

Les définitions n'étant pas uniformes selon les auteurs, nous précisons que dans le cadre de ce travail le **co-design** est considéré comme un processus impliquant des experts de domaines variés, afin d'unir les connaissances et compétences nécessaires au développement du dispositif en favorisant l'émergence de propositions créatives.

Le **design centré utilisateur** implique quant à lui de développer un dispositif en centrant le processus de conception autour des utilisateurs finaux, en partant de leurs besoins et compétences variables, et en conservant tout au long de l'avancement du projet les objectifs pragmatiques à atteindre. Ainsi, complémentaire au co-design, le design centré utilisateur incite à sélectionner parmi les propositions créatives des experts issues du co-design celles qui seront les plus en adéquation avec les besoins des utilisateurs et qui assurent la faisabilité du projet.

L'approche initiée dans ce projet s'inscrit dans la continuité des travaux précédemment menés dans le domaine de la sonification du mouvement pour la rééducation du membre supérieur après une lésion cérébrale acquise. Partant des besoins des utilisateurs, la démarche se situe plutôt dans une perspective d'innovation incrémentale que dans la recherche d'une innovation radicale (Buisine, 2018). Néanmoins, le contexte d'utilisation envisagé et les modalités de mise en œuvre reposent sur la projection d'une évolution future des modalités d'accompagnement des patients, et par conséquent des relations établies dans ces circonstances. Traduisant les réflexions initiées à ce sujet, outre les propositions d'amélioration des dispositifs existants, l'originalité de l'approche tient à la considération de l'entité patient-thérapeute, et à l'attention portée sur les multiples facettes et enjeux susceptibles d'être mobilisés par la création d'un dispositif de sonification du mouvement pour l'accompagnement de la rééducation de patients présentant des séquelles de lésions cérébrales acquises.

L'objectif fixé au début du processus de conception du dispositif était de concevoir puis développer un prototype à taille réelle, fonctionnel, dupliqué en 10 exemplaires, et d'initier une phase de validation afin de recueillir des données utiles dans la perspective d'une sollicitation d'un promoteur de recherche pour envisager une étude clinique, en conformité avec la réglementation actuelle de la recherche en santé impliquant la personne humaine (Loi Jardé). Ainsi, la démarche initiée se situe très en amont d'un processus d'industrialisation supposant la prise en considération de la norme ISO 9241-210:2019, qui porte sur la conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs dans le cadre de l'ergonomie de l'interaction homme-système établie par l'Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization, ISO). Si l'on se réfère à l'échelle TRL (Technology Readiness Level) d'avancement de la technologie constituée de 9 échelons, cet objectif correspond au niveau d'avancement intermédiaire 5 (évaluation du dispositif dans un environnement réaliste simulé).

1.2 Experts impliqués

Dans le cas du développement du dispositif de sonification du mouvement s'adressant aux binômes patients-thérapeutes, des professionnels de santé (médecins de médecine physique et réadaptation et ergothérapeutes), des ingénieurs (électroniciens, développeurs, sound designer) et des chercheurs, ont été réunis pour définir un cahier des charges, proposer des solutions adéquates et les évaluer. La participation des différents acteurs dans ce processus est récapitulée dans le tableau 4.1 du présent chapitre. Bien qu'utilisateurs finaux les patients n'ont pas pu être inclus directement dans le processus du fait de

contraintes réglementaires et restriction d'accès pendant la période de crise sanitaire. Leurs besoins et compétences spécifiques ont été définis grâce à l'expertise des thérapeutes expérimentés les côtoyant quotidiennement, mis en regard avec la littérature (Egglestone, 2009; Taule, 2014; Cavuoto, 2018).

La diversité des pratiques actuelles concernant la rééducation après le retour à domicile des patients nous a conduit à solliciter des professionnels de santé spécialisés dans la prise en charge des lésions cérébrales acquises exerçant dans 3 services différents de Médecine Physique et Réadaptation (MPR) en Ile de France: les médecins et ergothérapeutes du service de MPR de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris, le médecin chef de service de MPR de l'hôpital Albert Chenevier (Centre Hospitalo-Universitaire Henri Mondor, Créteil), une ergothérapeute et un kinésithérapeute du service de Neurologie MPR du Centre Hospitalier de Saint Denis.

Domaines d'expertise	Professions et lieux d'exercice	Modalités d'interventions dans le processus et contributions
Santé	Equipe Ergothérapeutes MPR Salpêtrière A. Assogba, E. Degand, C. Dessagne, C. Gouriou, M. Jeanne, E. Ledoux, H. Migeot	Réunion Brainstorming Co-Définition des critères conception Séances tests Prototype
	Médecins MPR Salpêtrière Pr P. Pradat-Diehl Dr E. Bayen	Supervision Supports (littérature et méthodologie)
	Ergothérapeute et Kinésithérapeute Service Neurologie Hôpital Saint-Denis C. Chassan M. Véra	Réunions trimestrielles Validation conception exercices Tests Prototype
	Médecin MPR Créteil Pr JM. Graciès	Réunion présentation Contrat auto-rééducation
Informatique	Equipe ISMM IRCAM Chercheurs Développeurs F. Bevilacqua B. Matuszewski L. Rodriguez	Réunions hebdomadaires Conception architecture système Développement interface navigation et <i>mapping</i> gestes-sons Corrections Bug
Electronique	Ingénieurs électroniques IRCAM E. Fléty A. Recher	Réunions mensuelles Co-conception Objet Assemblage et Duplication
Audio-visuel	Designer sonore (indépendant) V. Audouze	Réunions trimestrielle Co-conception des supports sonores
	Réalisateur audio-visuel (indépendant) M. Chevallier	Tournage et montage supports visuels (vidéos tutoriels)
Interdisciplinarité	Doctorante Sorbonne Université I. Peyre	Co-conception Sélection des propositions Encadrement et Coordination Évaluations

Tableau 4.I Tableau récapitulatif Professionnels-experts impliqués dans le processus de conception

2. Étapes de la conception

2.1 Présentation générale

Les étapes de la conception du dispositif jusqu'au bêta-prototype sont récapitulées dans la figure 4.1, et font l'objet d'une description détaillée ci-après.

Afin de simplifier la lecture, la démarche de conception est décrite de manière linéaire, néanmoins, le processus itératif qu'elle suppose a induit plusieurs allers-retours entre les différentes étapes.

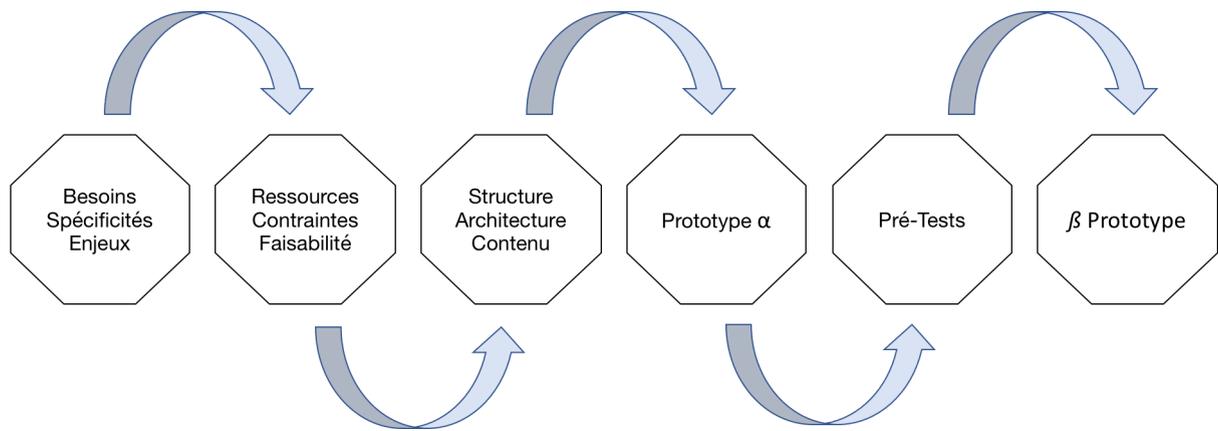


Figure 4.1 Schéma récapitulatif des étapes de la conception et du développement du dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation en autonomie supervisée de patients présentant des séquelles d'une lésion cérébrale acquise.

2.2 Première étape: Établir les critères orientant la conception du dispositif à partir de la définition des besoins des patients et thérapeutes, de leurs spécificités, et des enjeux et contextes d'usage

L'analyse de la littérature concernant les principes généraux de la conception de dispositifs technologiques pour la santé, dans le cas des maladies chroniques (Miller, 2014; Jessen, 2018) et dans le cas particulier du contexte post-AVC (Chen, 2015; Taske, 2015; David, 2020; Mubin, 2020; Gelineau, 2021; Lo, 2021), mis en regard avec les résultats issus de la précédente étude ont orienté les échanges avec les professionnels de santé-experts, permettant ainsi d'établir le cahier des charges pour concevoir le dispositif à partir des spécificités des profils des patients adultes présentant des séquelles, notamment motrices, suite à une lésion cérébrale acquise, et du contexte de la rééducation en autonomie supervisée.

Les **critères**, présentés brièvement ci-dessous, sont repris à différentes étapes du processus de conception jusqu'à l'évaluation du β prototype.

Assurer la **sécurité** des patients, des données recueillies grâce au dispositif, et des appareils constituant le dispositif a été le premier critère établi pour la conception puis le développement du dispositif. Ce critère s'entend sous l'acception générale de garantir en premier lieu l'intégrité physique et psychique des utilisateurs au cours de leur interaction avec le dispositif, de protéger les données depuis le temps de collecte jusqu'à la conservation de celles-ci, et de prévoir des moyens de protection du matériel contre sa détérioration potentielle lors de sa manipulation.

A ce premier critère incontournable s'ajoute celui de la **fiabilité** des données recueillies, pour assurer la qualité du fonctionnement du dispositif lors des exercices, et leur ajustement au cours du temps par les thérapeutes. La fiabilité des données repose notamment sur la qualité du matériel choisi et du système développé et peut s'évaluer via la reproductibilité des résultats obtenus dans des conditions d'utilisation spécifiques. Dans le cas d'un usage en autonomie, s'assurer de la fiabilité des données suppose donc conjointement que les utilisateurs disposent d'informations suffisamment claires et précises pour réaliser les exercices dans des conditions comparables et de prévoir un enregistrement précis des conditions de réalisation de l'exercice.

Les échanges avec les professionnels de santé ont fait émerger trois caractéristiques principales requises pour le dispositif. En premier lieu, le critère de **flexibilité** a été retenu, afin d'assurer une adaptation à la diversité des déficits et troubles sensoriels, moteurs et cognitifs, présentés par les patients, et leur évolution au cours du temps. Ce critère est considéré comme indispensable pour susciter l'adhérence thérapeutique des patients au long cours.

L'**attractivité** du dispositif, et plus précisément la capacité du contenu à susciter et maintenir la motivation des patients à poursuivre quotidiennement leur rééducation et aux thérapeutes de proposer le recours à ce dispositif est un autre critère central. Le critère d'attractivité recouvre ici les notions d'attraction spontanée induite par le dispositif (critère esthétique portant sur l'objet et son contenu, notion d'interface utilisateur) et de maintien dans le temps de l'intérêt dédié au dispositif. Il dépend notamment de la personnalisation possible du dispositif, et découle ainsi du critère de flexibilité.

Enfin, la **simplicité** de prise en main et de manipulation du dispositif, et la dimension intuitive (autre facette de la notion d'interface utilisateur), sont des critères primaires non spécifiques à cette situation de conception d'un dispositif, nécessitant néanmoins dans ce contexte une prise en considération particulière au regard des restrictions de mobilité, et de la fatigabilité des patients, conjointe à la nécessité de limiter la distraction et la charge

attentionnelle. Concernant les thérapeutes, le critère de simplicité suppose une contrainte limitée en termes de prérequis et de temps nécessaires pour la prise en main (compréhension des options disponibles et maîtrise de l'outil pour superviser son usage pour les patients).

Ces 3 critères contribuent à l'expérience utilisateur, définie comme les "réponses et perceptions d'une personne qui résultent de l'usage ou de l'anticipation de l'usage d'un produit, d'un service ou d'un système" (Norman, 2013).

Ainsi, le cahier des charges de conception du dispositif s'est articulé autour de ces **5 critères principaux: la sécurité, la fiabilité, la flexibilité, l'attractivité, et la simplicité.**

2.3 Deuxième étape: Répertorier les ressources et contraintes afin d'assurer la viabilité de la conception.

Les 5 critères définis préalablement ont servi de lignes directrices dans les échanges avec les ingénieurs afin de déterminer les stratégies à mettre en œuvre au regard des ressources mobilisables et des contraintes. Un ingénieur électronique (Emmanuel Fléty), et un chercheur-développeur de l'IRCAM (Benjamin Matuszewski) ont été sollicités dès le début du processus. Le processus d'idéation initié a permis de définir les étapes et la répartition du travail entre chaque membre impliqué, de répertorier et choisir le matériel nécessaire, et de planifier l'organisation de la création du dispositif.

Initialement, il avait été envisagé de développer une application Web utilisable sur smartphone, et d'utiliser les capteurs intégrés au sein de ces appareils (gyroscope, accéléromètre et magnétomètre permettant notamment d'assurer la rotation de l'écran en fonction de sa position, ou encore la fonction de boussole des assistants de navigation, GPS). Toutefois, le souhait de proposer un dispositif dédié au temps de rééducation dans la vie des patients, créant un lien spécifique entre la phase d'hospitalisation et le retour au domicile, entre le thérapeute et le patient, conjoint au critère d'assurer la sécurité des données, ont finalement orienté le choix de concevoir un objet, dans lequel les données sont stockées, et non simplement une application Web. Cet **objet-support, médiateur des interactions entre le système de captation du mouvement et la restitution sonore, et des interactions entre patients et thérapeutes, pourrait ainsi revêtir la fonction symbolique d'objet transitionnel, au sens Winnicottien** (Winnicott, 2010; Brackelaire, 2011; Marcelli, 2016), entre l'institution (hôpital, centre de rééducation) et le domicile. En effet, comme présenté dans la première partie de ce manuscrit, cette phase très particulière du retour à domicile dans le parcours des patients s'accompagne le plus souvent d'une prise de conscience des troubles et de leur impact dans leur vie quotidienne, source d'anxiété

voire de dépression. Ainsi, proposer un objet consacré à cette transition pourrait soutenir les patients, au-delà de considérations portées exclusivement sur la récupération fonctionnelle après une lésion cérébrale acquise.

D'un point de vue technique, la nécessité de répondre au critère de sécurité des données collectées induisait de recourir à un système embarqué autonome. Mis en regard avec l'expertise développée lors de précédents projets par les chercheurs-développeurs et ingénieurs, et la considération des ressources financières disponibles pour l'achat de matériel visant à limiter le coût du dispositif développé, l'orientation vers **un système embarqué autonome basé sur un nano-ordinateur de type Raspberry Pi** dont les fonctionnalités étaient maîtrisée par les experts a été choisie.

Un temps du processus a été consacré à la conception de la forme et l'utilisabilité de l'objet en tant que tel, et l'adaptation de la programmation et du contenu proposé.

Ainsi, la planification de la conception du dispositif s'est organisée autour de 3 axes: la structure de l'objet (*hardware*), l'architecture du système et la programmation de la synthèse sonore (*software*), le contenu du dispositif (exercices de rééducation, et design sonore).

2.4 Troisième étape: Organiser et formaliser la conception à partir d'une présélection de solutions répondant aux critères établis.

2.4.1 *Hardware*

Concernant la structure, la forme, et les fonctions de l'objet envisagé, la décision de créer un kit constitué des capteurs de mouvements associé à une boîte support d'interactions a ainsi offert la possibilité de rassembler les différents constituants essentiels à l'usage du dispositif. Ce choix a permis d'assurer l'accessibilité à un matériel de qualité, et identique pour chaque utilisateur (écran, haut-parleurs), sans restriction liée à l'usage de biens personnels (smartphone, tablette ou ordinateur).

Au-delà de garantir la sécurité du système, l'uniformité du matériel assure ainsi également une comparabilité des données recueillies (critère de fiabilité). Afin de répondre au critère de simplicité, les choix ont été orientés de façon à limiter pour les patients les tâches bimanuelles, et la distraction attentionnelle, tout en favorisant la prise de repères. Par exemple: les critères de sécurité et de simplicité d'usage ont conduit à prévoir un système d'emboîtement pour assurer la manipulation des capteurs de mouvements. La volonté d'assurer la fiabilité des données collectées a également impliqué le recours à un système de repères sur les boîtes des capteurs afin d'assurer leur correct positionnement à chaque session (coque colorée, et diode lumineuse). Dans la même perspective, un système de

rechargement des capteurs par induction a été sélectionné, afin d'éviter le recours à une tâche bimanuelle requérant de surcroît une dextérité fine.

2.4.2 Software

S'agissant de l'architecture du système, la nécessité de répondre simultanément à l'ensemble des critères de sécurité, fiabilité, flexibilité, attractivité, et simplicité a conduit à envisager un système constitué de plusieurs strates: un socle élémentaire assurant l'organisation et la robustesse du système afin de répondre aux critères de sécurité et fiabilité des données, une couche intermédiaire permettant de paramétrer les exercices, répondant ainsi au critère de flexibilité, et enfin en façade une interface graphique attractive assurant une navigation intuitive (critère de simplicité). Le système de synthèse audio a été envisagé dans la perspective d'accroître la diversité du contenu sonore proposé (critère d'attractivité et de flexibilité), en recourant à un générateur paramétrable de lecture simultanée et aléatoire de différentes pistes sonores.

Parallèlement à cette étape, les systèmes de reconnaissance de gestes et synthèse sonore développés dans le cadre de la première étude ont été transposés à la nouvelle architecture afin d'assurer la compatibilité avec le support Raspberry Pi sélectionné. Cette étape particulière est exposée dans la partie 2.5.2 du présent chapitre.

2.4.3 Contenu

Nous appuyant sur les **guides et livret d'auto-rééducation** proposés par différentes équipes de rééducation à destination de patients présentant des déficits et troubles moteurs suite à une lésion cérébrale acquise (Bourgeois, 2010; Graciès, 2016; Bonnyaud, 2017), et les différents échanges avec les professionnels de santé-experts, plusieurs types d'exercices ont été créés. En premier lieu des exercices de **maintien de posture (exercices statiques)**, permettant conjointement le renforcement musculaire et l'assouplissement ligamentaire dans la perspective d'étirements quotidiens bénéfiques pour lutter contre le phénomène de spasticité, et des exercices de **répétitions de mouvements (exercices dynamiques)**, ont été sélectionnés. Souhaitant par ailleurs favoriser l'attractivité du dispositif, en plus des deux grands types d'exercices habituellement préconisés mentionnés précédemment, un exercice plus ludique, basé sur le principe du jeu de Simon (Proctor, 2011; Turp, 2019), a été envisagé (**exercice memory**).

Par ailleurs, afin de susciter la motivation des patients à poursuivre leur rééducation, une **variété de contenus sonores et de modalités de couplages gestes-sons** ont été créés et sélectionnés. Le design sonore a été orienté en prenant en compte le système de

synthèse sonore conçu, de façon à proposer différents univers susceptibles d'accompagner les exercices tout en favorisant la stimulation de l'imagerie mentale et de l'imaginaire des utilisateurs. Les choix ont été guidés au regard de la littérature (Avanzini, 2013; Dubus, 2013; Nown, 2022) et des résultats qualitatifs obtenus lors de la première étude. Ce travail a été mené grâce à la collaboration avec le designer sonore Victor Audouze.

2.5 Quatrième étape: mise en forme du prototype α

2.5.1 Hardware

Un premier prototype d'emboîtement des capteurs de mouvements a été envisagé ainsi qu'une forme de boîte contenant le Raspberry Pi, l'écran tactile associé, les hauts-parleurs, et des plateformes de rechargement des capteurs de mouvement. La façade de la boîte supportant l'écran tactile a été inclinée de façon à faciliter la lecture.

Deux modalités de restitution sonore ont été prévues pour s'adapter en fonction du contexte et de l'environnement de réalisation des exercices (casque ou haut-parleur). Deux entrées casques sont proposées afin de faciliter la réalisation des exercices quel que soit le côté parétique (sans risque de contrainte liée au passage d'un câble) et d'offrir la possibilité d'écoute conjointe patient-thérapeute lors des séances. L'encadrement des plateformes de rechargement des capteurs est conçu pour faciliter leur dépôt à leur surface, pour s'assurer de leur rechargement correct.



Figure 4.2 Coque 1^{ère} version



Figure 4.3 Boîte: 1^{ère} version façade

2.5.2 Software

2.5.2.1 Transposition du système de sonification vers *Soundworks*

Le système de sonification utilisé pour l'étude précédente reposait sur le logiciel *Max/MSP* assurant l'analyse et la synthèse sonore. Le choix de développer un dispositif embarqué autonome, impliquant l'utilisation d'un Raspberry Pi, a orienté la décision de recourir à une combinaison entre les infrastructures logicielles *Soundworks* et CoMo (Collective Musical Objects), et une synthèse sonore réalisée en *Web-Audio* (via le navigateur Chromium lancé par le Raspberry) plutôt que le logiciel *Max*. *Soundworks* est une infrastructure logicielle (*framework*) modulaire flexible, reposant sur une architecture clients-serveur utilisant Node.js (codée en javascript) initialement développée en 2015 par Norbert Schnell, et Sébastien Robaszkiewicz, puis refondée par Benjamin Matuszewski (Robaszkiewicz, 2015; Matuszewski, 2019).

Un système de sonification du mouvement a donc été réécrit à l'aide de *Soundworks* à l'occasion du développement de l'exercice dédié au maintien de posture (exercice nommé "statique"). Ce travail a donné lieu à la réalisation d'un stage Recherche et Développement d'une étudiante en Master 2 Acoustique, Traitement du signal, Informatique, Appliqués à la Musique (ATIAM) à l'IRCAM. Le système développé a fait l'objet d'une évaluation (présentée en Annexe), afin de disposer notamment d'une preuve de concept de la fonctionnalité du dispositif.

2.5.2.2 Modalité de sonification des exercices de maintien de posture

Dans le cas particulier des exercices de maintien de posture, la modalité de sonification choisie a été de diffuser des extraits sonores (sons continus, ou boucles d'évènements sonores ponctuels) et d'indexer le volume sonore aux oscillations de posture, pour signaler les éventuels écarts par rapport à la référence enregistrée au cours de la calibration. Ainsi, les oscillations de posture par rapport à la référence, obtenues en temps-réel grâce aux capteurs de mouvements, vont déterminer l'indice de déviation, et la modulation du volume sonore de l'extrait diffusé.

Dans la perspective d'un exercice de maintien de posture réalisé par les patients avec leur membre supérieur parétique, deux capteurs de mouvements sont utilisés: un capteur positionné sur le bras, et un sur l'avant-bras. Chaque capteur de mouvement (module RIoT) dispose comme précédemment de 3 fonctions (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre), à partir desquelles il est possible de déduire les 3 orientations (coordonnées de positions dans les 3 axes de l'espace).

Afin de répondre au critère de flexibilité, le principe de la calibration déjà utilisée précédemment a été reconduit, permettant ainsi de s'adapter aux capacités individuelles des utilisateurs du dispositif. De même, le paramétrage du système a été configuré de manière à être modulable afin que différentes postures puissent être envisagées en fonction du stade de récupération propre à chacun des patients. Un indice de pondération est attribué à chaque axe (orientation), selon l'intérêt que peut revêtir sa prise en considération pour la posture choisie.

Le système conçu a fait l'objet d'une expérimentation auprès de 8 participants volontaires parmi les membres de l'équipe ISMM du laboratoire STMS-IRCAM et leurs proches permettant de s'assurer de sa fonctionnalité.

2.5.2.3 Interface

Une première version de l'interface de navigation a été proposée, conjointement au programme de synthèse sonore permettant de réaliser des tests de contenu sonore en adéquation avec celui-ci.

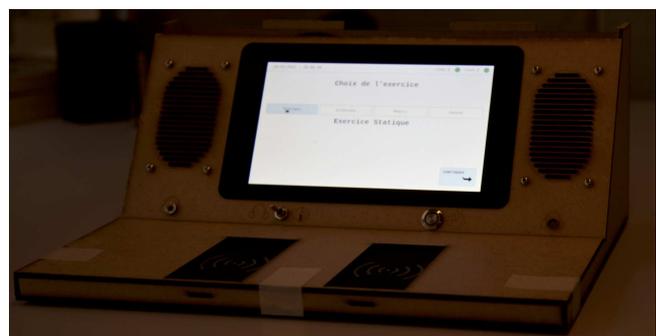


Figure 4.4 Interface : Page de présentation Figure 4.5 Interface implémentée dans la boîte

2.5.3 Contenu

Parallèlement au prototypage de la boîte et de l'interface, les modalités d'interactions gestes-sons ont fait l'objet d'un développement et d'une évaluation technique.

Concernant les exercices de maintien de posture, une première sélection d'extraits musicaux a été réalisée. Pour les exercices de répétition de mouvements, supposant l'alternance entre un point de départ et un point d'arrivée, plusieurs associations de retours sonores ont été envisagées: des associations mono-thématique permettant d'évoluer dans un même univers sonore (par exemple ressac des vagues - et cri de mouettes), et des association bi-thématiques permettant le passage d'un univers sonore à un autre, avec une

plus ou moins grande proximité entre les univers sonores (par exemple bruits d'un centre commercial - hululement d'une chouette), amenant un degré de congruence variable.

2.6 Cinquième étape: Pré-Tests

2.6.1 Mise en oeuvre des pré-tests

Afin de vérifier la robustesse du système, d'ajuster le contenu et d'optimiser les fonctions proposées, des tests ont été réalisés avec le prototype α auprès des professionnels de santé impliqués dans le processus de conception, de membres des équipes de recherche non impliqués dans le projet, et d'experts extérieurs aux structures. Ainsi 16 participants aux profils variés ont été sollicités, à savoir: 4 ergothérapeutes et 1 médecin de médecine physique et réadaptation (MPR) du service de rééducation de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, 1 médecin de cet hôpital présentant une hémiparésie du bras gauche suite à un AVC, 1 ergothérapeute et 1 kinésithérapeute du service de MPR de Saint Denis, 6 membres de l'équipe ISMM de l'IRCAM (doctorants, post-doctorant, et ingénieurs), 1 ingénieure du LIB, et le médiateur culturel en art sonore du Lavoir Numérique de Bagneux.

Cette étape de pré-tests a été organisée en trois temps, selon trois modalités: une phase initiale, une phase intermédiaire, et une phase avancée.

Lors de la phase initiale les tests étaient sous la forme d'une séance individuelle d'une durée d'environ 30 minutes, au cours de laquelle la démarche de conception était expliquée, les fonctions du dispositif étaient présentées sous forme d'une démonstration brève, puis le testeur pouvait librement naviguer sur l'interface, réaliser les exercices avec différentes configurations, poser des questions et exprimer ses observations. Cette phase a concerné les 6 membres de l'équipe de recherche de l'IRCAM, l'ingénieure du LIB, le médecin présentant une hémiparésie résiduelle post-AVC, et le médiateur culturel. A l'issue de chaque séance les points appréciés et ceux à améliorer étaient listés.

La phase intermédiaire a pris la forme d'une séance en groupe d'une durée d'une heure, avec 4 ergothérapeutes et 1 médecin du service MPR de l'hôpital impliqués dans le projet, selon une modalité analogue aux séances individuelles.

Le phase avancée a concerné l'ergothérapeute et le kinésithérapeute extérieurs à la structure, avec lesquels un suivi régulier de l'avancement du projet était réalisé. Dans ce cas, une séance de démonstration de 30 minutes a été organisée, suivie du prêt du dispositif pendant 2 semaines pour un usage en autonomie supervisée, puis un temps d'échanges lors de la restitution du dispositif.

Ces différentes phases ont permis de recueillir des points de vue complémentaires, et d'apporter progressivement des corrections au dispositif.

2.6.2 Modifications et corrections apportées

2.6.2.1 *Hardware*

A l'issue des tests, le système hardware a été optimisé de façon à réduire l'épaisseur de l'emboîtement des capteurs, et déplacer les plateformes à induction pour réduire la taille de la boîte et faciliter l'accès aux boutons de façade de la boîte (bouton marche/arrêt, et switch de la modalité sonore haut-parleur versus casque) et aux entrées casques.

2.6.2.2 *Software*

Les séances de pré-tests ont permis de repérer quelques dysfonctionnements techniques ou d'usages (exemple: erreur d'affichage de la date et de l'heure, mauvais positionnement de boutons sur l'interface, ou boutons manquants) et d'y remédier. Concernant l'interface de navigation, celle-ci a été modifiée notamment via l'ajout dans la barre de tâches d'un bouton "Home" permettant ainsi à tout moment le retour à la page de choix d'exercice considéré comme le menu racine, et d'un bouton permettant de terminer la session. De plus, des emplacements permettant d'accéder à des vidéos tutorielles ont été ajoutés sur chaque page d'exercice. Par ailleurs, différentes modalités de navigation ont été envisagées: une navigation "guidée" (linéaire, avec des sélections limitées aux exercices sélectionnés préalablement par le thérapeute) et une navigation "ouverte" (offrant l'ensemble des options au choix du patient). A l'issue de la réalisation d'un exercice, une page intermédiaire d'orientation a été ajoutée, permettant de choisir entre la répétition du même exercice dans des conditions identiques, le retour à la page de choix d'exercice (en cas de souhait de changer soit l'exercice, soit le retour sonore, soit le niveau de difficulté), ou la fin de session. Pour finir, une réflexion concernant l'esthétique de l'interface, jusqu'alors présentée sur fond blanc, a été menée afin de la rendre plus attractive tout en limitant la surcharge d'informations pour limiter la charge attentionnelle et les risques de distraction.

2.6.2.3 *Contenu*

Concernant les exercices: dans la perspective d'un usage en autonomie adaptée à différentes situations de mobilité des patients (critère de flexibilité) un délai temporel a été prévu entre le lancement de la calibration et son enregistrement, afin de laisser ce temps au

patient pour la prise de position, et éventuellement soutenir le membre parétique à l'aide du membre non parétique pour réaliser l'exercice (exercice en actif-aidé). La formulation des consignes a été révisée pour simplifier leur compréhension.

Enfin, les tests réalisés avec ce premier prototype ont permis d'une part de compléter le contenu sonore proposé, et d'autre part d'envisager le développement de différentes modalités de couplage pour un même type de retour sonore concernant l'exercice de répétition de mouvement (exercice "dynamique").

3. Description du β Prototype

La version finale du β prototype conçu est présentée au regard des 5 critères principaux de développement déterminés au début du processus de conception: sécurité, fiabilité, flexibilité, attractivité, simplicité.

3.1 Matériel

3.1.1 Capteurs de mouvements

Des capteurs identiques à ceux utilisés dans la première étude ont été sélectionnés pour le dispositif (module RIoT, manufacturés et vendus par Bitalino-Plux). Les systèmes de capture du mouvement par caméra sans marqueurs (de type Kinect, Leap Motion) sont contraignants au niveau du champ de détection et souffrent d'artefacts de mesure, et les systèmes reposant sur des marqueurs (réflecteurs proche infra-rouge de type Vicon, Qualisys) utilisés pour différents dispositifs d'auto-rééducation des membres supérieurs après un AVC (Colombo 2019; David, 2020) sont onéreux, ce qui limite la possibilité de duplication du dispositif. Ainsi, un système de capture du mouvement de type centrales inertielles, porté par les utilisateurs comporte des avantages: outre la précision des données recueillies, il est possible de réaliser les exercices en dehors d'un espace dédié. L'utilisateur peut donc se déplacer avec les capteurs mobiles, réaliser des exercices dans différents lieux, et sans contraintes d'amplitude.

De plus, par rapport à d'autres types de centrales inertielles, les modules RIoT sont peu onéreux, et la transmission des données repose sur des protocoles de communication Wi-Fi plutôt que Bluetooth, ce dernier étant moins stable et plus contraignant du fait d'une portée plus restreinte.

Par ailleurs, les modules RIoT ont été initialement conçus à l'IRCAM, ainsi, la connaissance historique de ces outils permet un ajustement rapide et optimal pour répondre aux spécificités d'usage. Pour finir, ses composants disposent d'une déclaration de conformité avec les normes européennes (Annexe).

Ainsi, le choix de ce type de capteurs a été orienté pour répondre aux critères de **sécurité**, de **fiabilité** des données recueillies (précision temporelle: 200 Hz, quantification des données: 16 bits, et bruit limité), et de **flexibilité** (minimisation des contraintes de lieux d'usage,, d'espace et de setting).

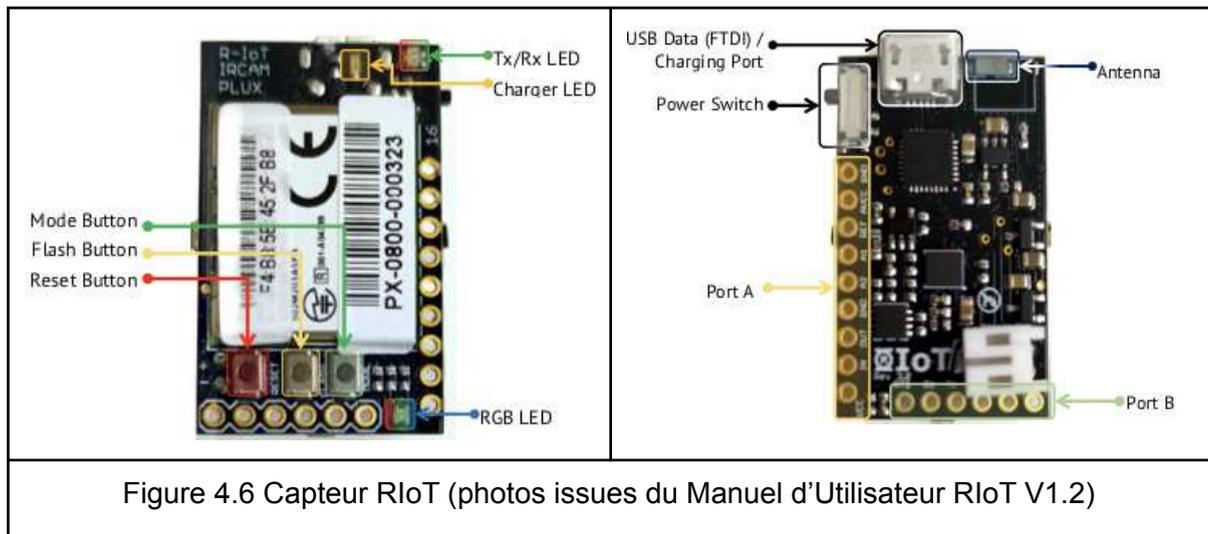


Figure 4.6 Capteur RIoT (photos issues du Manuel d'Utilisateur RIoT V1.2)

3.1.2 Coques imprimées en 3D

Afin de faciliter la manipulation et le port des capteurs, des boîtiers ont été conçus grâce à la technique d'impression 3D additive, à partir de plastique polymère ABS (acrylonitrile butadiène styrène) coloré. Ce matériau peu dense permet d'obtenir des objets légers. Ainsi, les capteurs sont protégés des chocs, répondant au critère de **sécurité**, tout en minimisant le poids ajouté.

Les coques permettent par ailleurs de contenir les récepteurs de recharge à induction des capteurs. Comme mentionné précédemment, la forme et la taille des coques ont été ajustées après les pré-tests pour réduire l'épaisseur en optimisant l'espace contenant les capteurs, les récepteurs de recharge et le passage du système de port des capteurs (sangles amovibles). Dans cette perspective, une pièce imprimée 3D a été conçue afin de stabiliser la position du capteur dans la coque, assurant ainsi la **fiabilité** des données collectées au cours des séances d'exercices (reproductibilité et consistance dans le temps). Par ailleurs, afin de faciliter le paramétrage des capteurs, une perce très fine a été prévue à la surface de la coque pour accéder au bouton de réinitialisation évitant la nécessité d'ouvrir le boîtier. Pour finir, la distinction des capteurs grâce à la coloration des coques (orange et grise), et la présence d'un bouton LED en surface, permettent aux utilisateurs de disposer d'indicateurs de positionnements sur leurs membres, répondant ainsi aux critères de **simplicité** et de **fiabilité**. Enfin, la coloration des coques peut contribuer à leur **attractivité**.



Figure 4.7 Coques avant / après



Figure 4.8 Coque vue du dessus

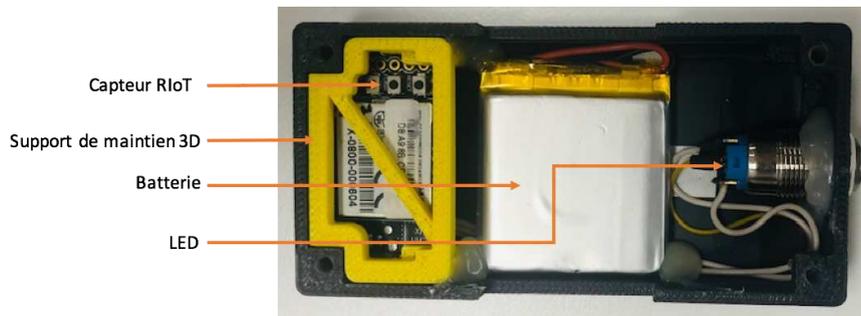


Figure 4.9 Contenu des coques

3.1.3 Système de port des capteurs

Le choix d'utiliser des capteurs de type centrales inertielles induit la nécessité de recourir à un support pour les positionner sur les membres des utilisateurs et assurer un maintien stable au cours des exercices. Des moyens techniques supposant des pièces aimantées, bien que faciles à manipuler et positionner, étaient exclus du fait de la fonction de magnétomètre des capteurs. S'inspirant du système de brassards textiles précédemment utilisé, nous avons pour le présent dispositif choisi de recourir à des sangles fines et souples ajustables à l'aide d'un scratch auto-adhésif de deux tailles différentes afin d'assurer une adaptation à toutes les morphologies, tout en limitant à la fois les contraintes pour les enfiler et le coût. Ces brassards présentent également l'avantage d'être lavables et donc de répondre aux préconisations bio-sanitaires pour une utilisation par différents utilisateurs. Une autre possibilité aurait été d'élaborer un vêtement ou une manche enfilaible contenant le système de captation du mouvement (de manière comparable à des prototypes de

vêtements instrumentés présentés dans la littérature Bobin, 2018). Néanmoins, les possibilités d'ajustement aux caractéristiques morphologiques individuelles auraient été moindres, à moins de réaliser ces vêtements après prise de mesure de chaque utilisateur, ce qui aurait induit des contraintes logistiques, des délais avant utilisation, et un surcoût. De plus, enfiler un vêtement peut s'avérer plus contraignant pour un individu présentant une hémiparésie, et n'est pas nécessairement confortable selon la saison. Comme précédemment, le choix de ce type de moyen de maintien des capteurs a donc été orienté sous forme de compromis pour répondre aux critères de **sécurité** (hygiène), de **flexibilité** (adaptabilité aux morphologies) et de **simplicité** pour les utilisateurs.



Figure 4.10 Système de port des capteurs

3.1.4 Boîte

3.1.4.1 Structure

La boîte contenant le matériel indispensable au fonctionnement du dispositif a été élaborée à partir de panneaux de fibres de bois MDF (Medium Density Fiberboard). Ce matériau, très utilisé dans l'industrie d'ameublement et pour le prototypage, présente de multiples intérêts: plus solide et robuste que l'aggloméré tout en étant lisse, léger (contrairement au bois massif), il est découpable au laser, et peu onéreux. Ainsi, la forme et la taille des pièces constituant la boîte ont pu être ajustées facilement, et le poids de la boîte finie est réduit, facilitant son transport. La résistance du matériau assure un maintien sécurisant pour l'écran

et les appareils qu'il contient. Enfin, des symboles informatifs (pictogrammes) ont pu être gravés au laser sur la façade.



Figure 4.11 Structure de la boîte

3.1.4.2 Façade

A l'avant de la boîte se situent l'ensemble des supports d'interaction avec les utilisateurs, à savoir: l'écran tactile, le bouton marche / arrêt, les deux entrées casques pour l'audio, et le bouton permettant la sélection du mode audio choisi par l'utilisateur (casque ou haut-parleur). Aucun élément additionnel superflu pour les utilisateurs (patients et thérapeutes) n'est présent sur la façade de la boîte, afin de répondre au critère de **simplicité**. Dans cette perspective, un accès à une prise RJ 45, utile pour la programmation de la boîte par des chercheurs-développeurs, est présenté sur la façade latérale, de façon à ne pas susciter de distraction pour les utilisateurs.

Le deuxième critère ayant orienté l'élaboration de la façade de la boîte est l'**attractivité**, avec un choix de design orienté vintage: la forme globale et les éléments constitutifs (grilles haut-parleurs, boutons, vis) évoquant d'anciens modèles d'appareils radiophoniques.

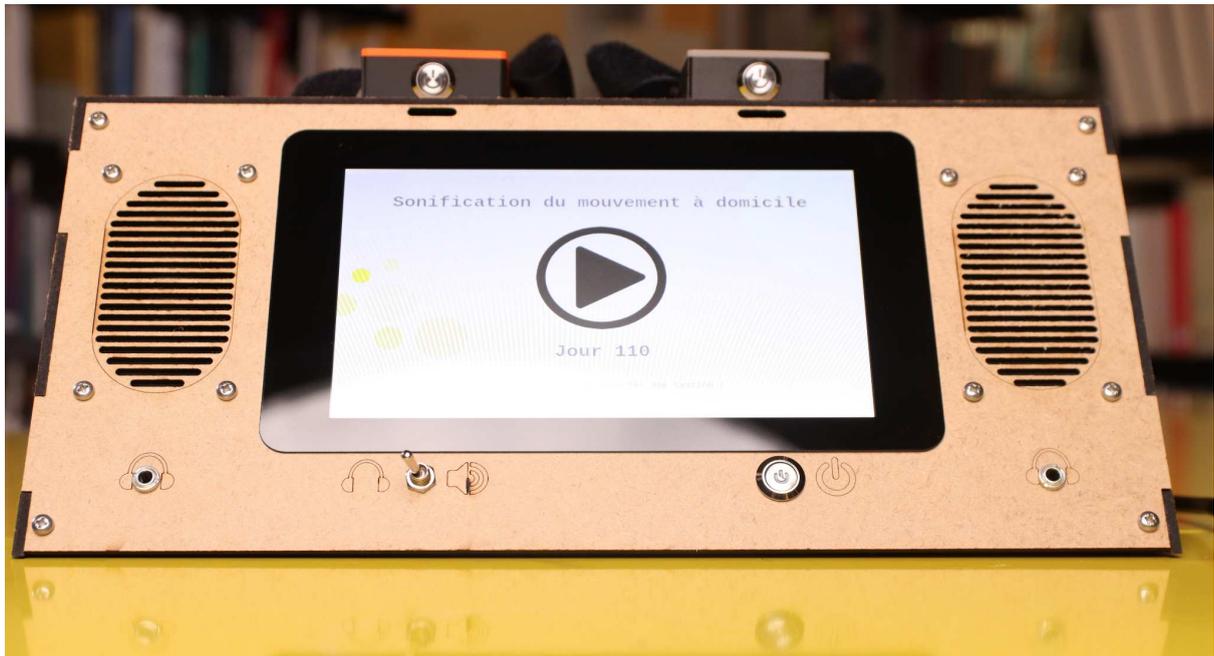


Figure 4.12 Boîte : Façade

Le choix de l'écran tactile a été orienté en fonction de la compatibilité avec la carte Raspberry Pi 4 et du coût (écran tactile capacitif Raspberry Pi 7 pouces, de dimensions 194mm x 110mm x 20mm, assurant une résolution 800 x 400 pixels).

Les deux options de restitution sonore ont été envisagées dans la perspective d'offrir plusieurs modalités d'usage: lors des séances de rééducation selon la localisation et la proximité avec d'autres patients le thérapeute et le patient peuvent faire le choix d'entendre le retour sonore sur les haut-parleurs ou munis de casques, de manière identique lors d'une utilisation en autonomie à son domicile le patient dispose d'un choix selon le bruit environnant et son souhait de partager avec ses proches le temps dédié à la réalisation des exercices. L'utilisation du dispositif peut donc être individuelle, ou partagée, et s'adapter en fonction du contexte sonore environnant. Ce choix répond au critère de **flexibilité**. De plus, à terme, un autre mode d'utilisation pourrait être envisagé pour favoriser l'attractivité de l'usage du dispositif, en incluant des jeux à plusieurs utilisateurs avec par exemple la sommation des entrées des capteurs de mouvements, ou bien sous forme de tournoi prenant en compte des réglages individualisés des paramètres pour ajuster des niveaux de difficulté personnalisés.

3.1.4.3 Dessus de la boîte

Les plateformes de chargement des capteurs (chargeurs sans fil rapide Choetech) ont été placées sur le dessus de la boîte afin d'optimiser sa taille et favoriser conjointement son transport et son stockage. Des gouttières ont été aménagées pour faciliter le dépôt des capteurs et s'assurer ainsi de la fonctionnalité du rechargement. De plus, des ouvertures ont été conçues en façade afin de bénéficier d'indicateurs lumineux permettant de vérifier le placement correct des capteurs sur les plateformes.

Les plateformes à induction ont été choisies afin de ne pas nécessiter la manipulation de câbles et tout particulièrement l'insertion dans le port micro-USB, tâche bimanuelle nécessitant de surcroît une dextérité fine en inadéquation avec les troubles moteurs présentés par les patients. Ces choix répondent donc conjointement aux critères de **simplicité** pour l'usage du dispositif, et de **sécurité** pour la maintenance des capteurs de mouvements.



Figure 4.13 Boîte vue du dessus : plateformes de chargement

3.1.4.4 Arrière de la boîte

L'arrière de la boîte a été conçu de manière à conjointement protéger les appareils contenus dans la boîte, assurer un accès **simple** et rapide au contenu de la boîte pour la maintenance des appareils en cas de nécessité, et enfin favoriser la qualité de la restitution des retours sonores aux haut-parleurs en prévoyant de fines ouvertures.

3.1.5 Contenu de la boîte

La boîte permet de contenir et protéger l'ensemble des appareils nécessaires au fonctionnement du dispositif de sonification du mouvement, à savoir:

- la carte RaspBerry Pi 4 associée à une carte microSD, supports assurant le fonctionnement autonome de l'application, l'enregistrement et le stockage des données sans nécessité de recourir à un serveur extérieur, répondant ainsi au critère de **sécurité** formulé.
- le système de restitution sonore, constitué d'une carte son Hifiberry assurant une sortie audio de bonne qualité via le casque, associée à un amplificateur disposant de sa propre alimentation pour la sortie audio des haut-parleurs. L'ensemble de ces appareils assurent la qualité de la restitution sonore, facteur essentiel pour contribuer à l'**attractivité** du dispositif.
- une horloge externe intégrée au Raspberry est nécessaire pour stocker la date et l'heure puisque le système n'accède pas à une horloge via internet. Cela assure ainsi une double fonction d'information de l'utilisateur disposant ainsi d'un cadre temporel pour réaliser ses exercices, et de système d'indication permettant de classer les données enregistrées, indispensable au suivi de l'évolution des données des utilisateurs au cours du temps. Ceci assure ainsi la **fiabilité** des données collectées et analysées.
- des joints conçus pour le maintien des appareils dans la boîte, et élaborés de manière comparable aux coques protégeant les capteurs de mouvement (impression 3D additive) assurant ainsi la **sécurité** des constituants lors notamment des transports de la boîte.
- un bloc d'alimentation USB spécifique (Anker) a été ajouté afin de pouvoir éviter les prises USB du raspberry pour garantir une alimentation non bruitée de l'amplificateur audio

3.1.6 Accessoires complémentaires

Pour l'exercice ludique inspiré du jeu de Simon, un support délimitant des espaces, grâce à des couleurs primaires permettant de maximiser les contrastes, a été élaboré afin de faciliter la prise de repères pour réaliser l'exercice répondant ainsi au critère de **simplicité**. Les dimensions du support ont été établies en accord avec les professionnels de santé inclus dans le processus de conception dans l'objectif d'offrir une adaptation possible aux amplitudes de déplacements variables selon les patients, étant ainsi en accord avec le critère de **flexibilité**.

La plastification du support rend possible son nettoyage (critère de **sécurité**) et facilite les déplacements à sa surface (critère de **simplicité**).

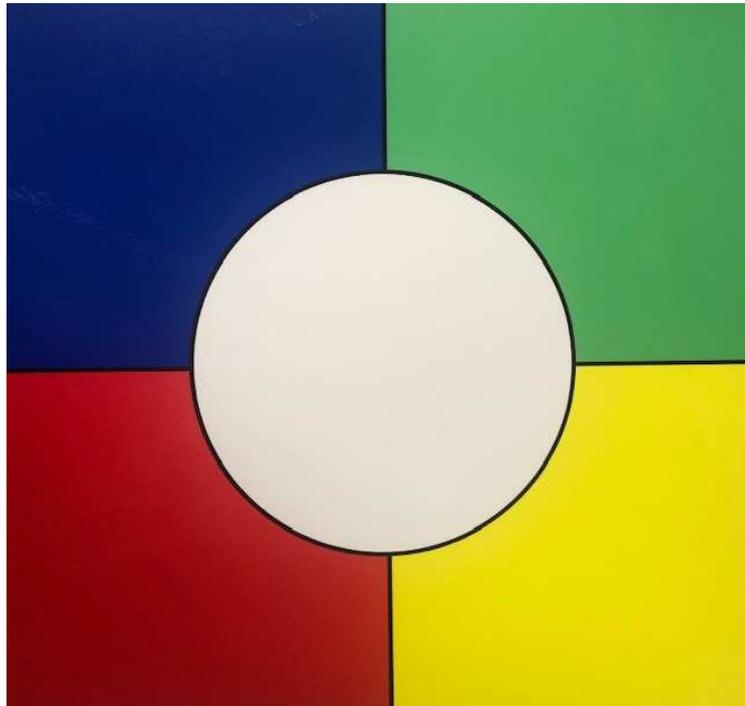


Figure 4.14 Support de l'exercice memory

3.2 Application

3.2.1 Constellation CoMo

L'application, nommée CoMo-Rééducation, s'inscrit dans l'ensemble CoMo: collection d'applications, développées au sein de l'équipe ISMM de l'IRCAM par Benjamin Matuszewski, reposant sur des objets musicaux interactifs et collaboratifs. CoMo regroupe des applications spécialisées selon leur contexte d'usage spécifique, à savoir principalement la création artistique et la pédagogie (CoMo Elements, CoMo Vox, CoMo Education). Le travail initié dans le cadre de cette thèse propose donc une version dans le domaine de la santé via la conception et le développement de l'application CoMo-Rééducation.

L'ensemble des applications CoMo présentent des caractéristiques communes: utilisant Node.JS, elles reposent sur une architecture clients-serveur et font intervenir l'infrastructure logicielle *Soundworks* et intègre le système de reconnaissance de gestes XMM créé par Jules François. L'architecture originale de ces applications se caractérise par la présence

d'un système de contrôle, placé comme un client dans l'architecture, mais dont la spécificité est d'offrir une interface pour paramétrer et choisir les actions à mener. Ce système offre ainsi la possibilité de contrôler la navigation sur l'interface utilisateur, ou bien également de relancer l'application.

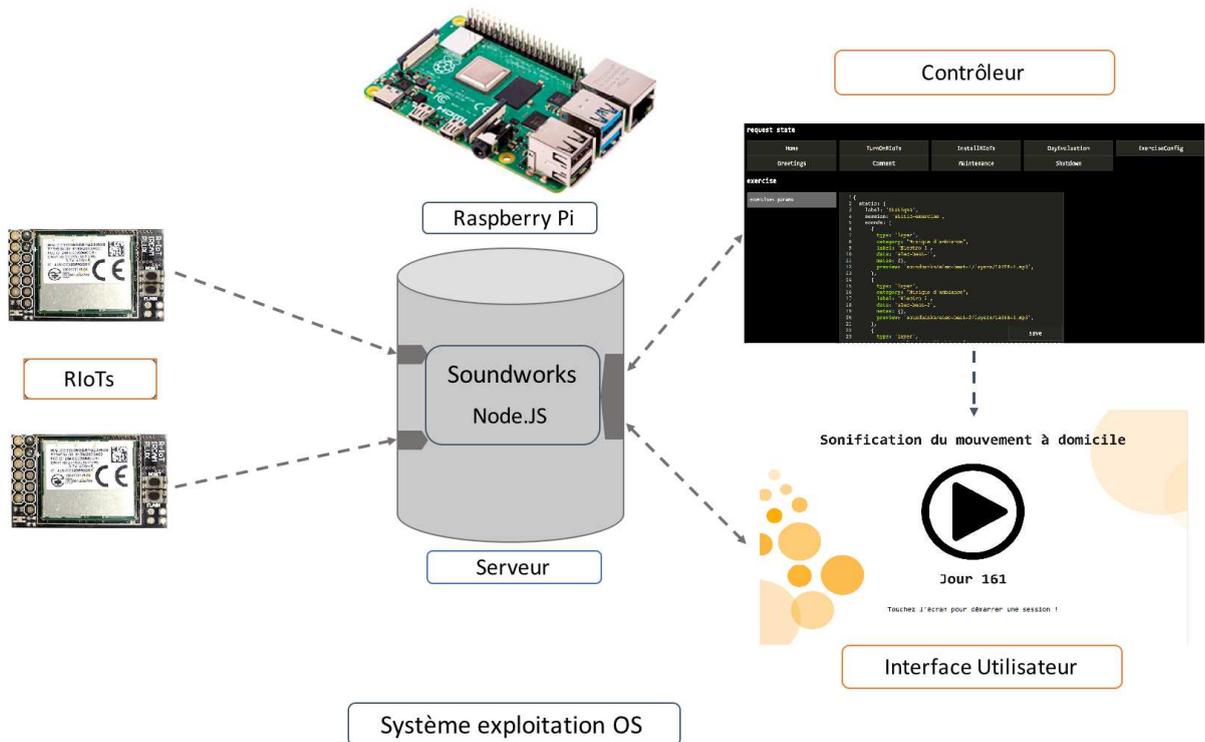


Figure 4.15 Schéma de l'architecture clients - serveur de l'application CoMo Rééducation

3.2.2 Spécificités CoMo-Rééducation

La particularité dans le développement de CoMo-Rééducation réside dans l'adaptation aux 5 critères établis spécifiquement pour l'usage prévu, impliquant une organisation du système en 3 strates imbriquées. Chaque strate est en adéquation avec un profil d'utilisateurs auquel elle s'adresse.

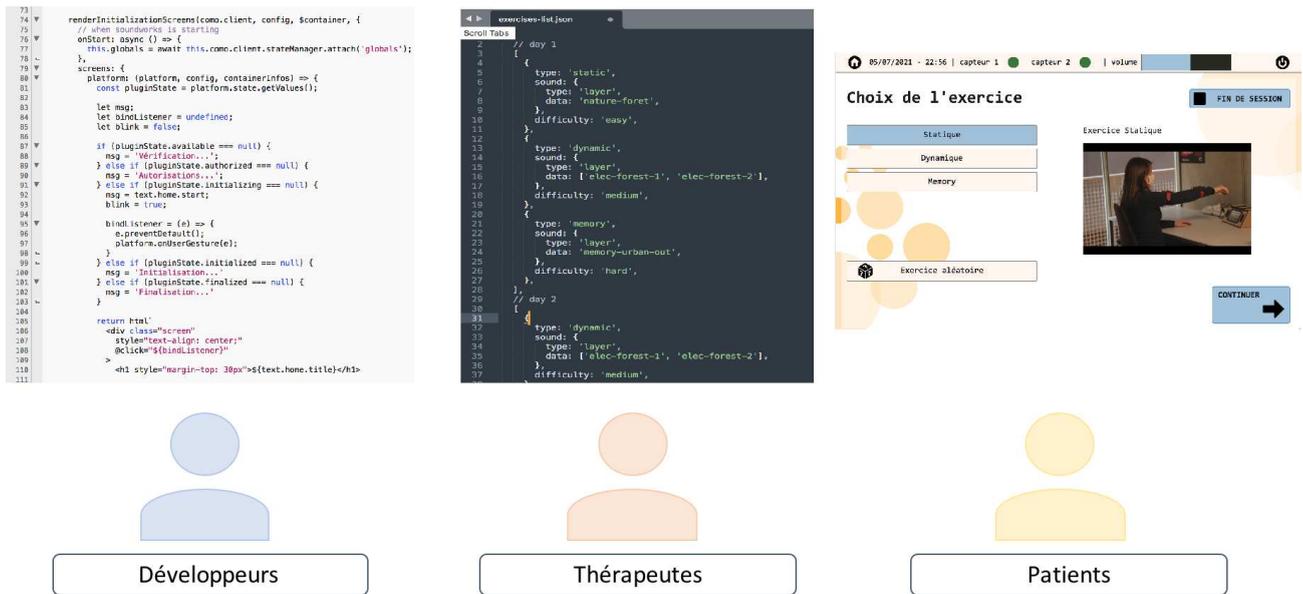


Figure 4.16 Schéma de l'organisation des programmes de l'application CoMo-Rééducation en fonction des profils d'utilisateurs

La strate élémentaire correspond aux programmes assurant la fonctionnalité de l'application. Elle a été conçue de manière à assurer la **sécurité** et la **fiabilité** des données. Cette strate suppose des connaissances avancées et une expertise en programmation, elle s'adresse donc à des développeurs qui souhaiteraient dupliquer le code, l'améliorer ou transposer le dispositif conçu à une situation ne supposant pas le recours à un Raspberry Pi ou des capteurs de mouvements de type RIoT, développer un nouveau type d'exercice interactif geste-son pour la rééducation, ou encore offrir la possibilité d'une modalité d'usage du dispositif à plusieurs participants simultanément disposant chacun de capteurs de mouvements.

La strate intermédiaire correspond aux modalités d'interactions gestes-sons et aux différents paramétrages possibles des exercices et de l'ensemble des informations présentées sur l'interface graphique des utilisateurs finaux (patients), à savoir notamment les consignes, les vidéos tutorielles ou encore les ressources sonores mises à disposition. Initialement conçue pour les professionnels de santé, souhaitant ajuster le niveau de difficulté des exercices, leur durée, les consignes et gestes à réaliser, créer des programmes quotidiens pour leurs patients, ou encore ajouter des ressources sonores en fonction des souhaits et préférences des patients, celle-ci peut également être utilisée par des chercheurs qui souhaiteraient se servir du dispositif pour réaliser des études sur la sonification du mouvement pour la rééducation en adaptant notamment les choix de retours sonores et les modalités de couplages gestes-sons. Cette strate assure donc la **flexibilité** du dispositif et assure son

adaptabilité à son contexte d'usage, aux besoins spécifiques et aux profils de chaque patient. La création de cette interface intermédiaire entre le code de l'application et l'interface graphique utilisateur, offrant de multiples options d'ajustements et n'imposant aucune connaissances préalables requises en programmation, caractérise la démarche de conception particulière de cette application. Cette originalité s'inscrit dans l'objectif d'offrir conjointement la plus grande diversité d'options, assurant l'adéquation aux besoins et spécificités individuelles, et une **simplicité** apparente pour les utilisateurs afin de favoriser leur autonomie dans la prise en main du dispositif, avec comme perspective de réduire le plus possible les contraintes (notamment temporelle mais également de potentiels obstacles liés aux compétences informatiques) pour s'assurer de la faisabilité d'un usage réel au quotidien par les professionnels de santé pour soutenir les prises en charge rééducatives. La strate émergée, visible, correspond à l'interface graphique, ou interface utilisateur, dédiée aux patients (ou dans certains cas particulier s'adressant aux participants d'expérimentations ou protocoles de recherche). Cette interface a été conçue pour offrir une aisance dans la navigation, avec une prise de repères simple grâce notamment à une barre de tâches référençant la date et l'heure, des emplacements boutons similaires sur chaque page, des options de navigation restreintes pour focaliser la nécessité de prise de décision aux étapes susceptibles de favoriser la motivation des patients (choix des exercices et des retours sonores). Afin de limiter la charge cognitive incombant aux patients-utilisateurs du dispositif, les étapes clés nécessitant une vigilance particulière pour le bon fonctionnement du dispositif font chacune l'objet d'une page dédiée (allumage capteurs, placements, maintenance du dispositif) présentant, outre des explications et illustrations photographiques, des tutoriels vidéos. De manière identique, la **simplicité** de prise en main de l'interface est assurée par le séquençage des consignes des exercices par étapes pour limiter le coût cognitif lié à la rétention de nombreuses informations présentées simultanément. L'ensemble de l'interface utilisateur a donc fait l'objet d'une réflexion dans l'objectif de répondre au critère de **simplicité**. Par ailleurs, afin de favoriser l'**attractivité** de l'interface, un habillage de fond des pages a été proposé pour remplacer le fond noir et blanc initial.



Figure 4.17 Habillage pages de l'interface

3.3 Contenus de l'application

3.3.1 Exercices

Trois grands types d'exercices ont été conçus pour le dispositif: des exercices de maintien de posture (**exercices statiques**), des exercices de répétition de mouvements (**exercices dynamiques**) et des exercices de mémorisation de séquences sonores associées à des déplacements sur un support via des extensions-flexions du coude (**exercices cognitivo-moteur, de type memory**). L'existence de ces trois types d'exercices offre la possibilité à chaque thérapeute d'ajuster les programmes quotidiens de rééducation des patients en fonction de leurs besoins, répondant ainsi au critère de **flexibilité**. L'alternance entre les exercices, rendant ainsi le dispositif plus **attractif**, pourrait par ailleurs soutenir le maintien de motivation des patients.

Les **exercices de maintien de posture**, sur le modèle des étirements, ont pour objectifs de conjointement limiter la raideur liée à la spasticité, et de favoriser le renforcement musculaire. Ces exercices peuvent être réalisés librement avec ou sans l'aide d'un support de maintien selon le niveau de récupération du patient et la difficulté de l'exercice. La posture à maintenir, la durée du maintien de la posture, le niveau de difficulté sont ajustables.

Les **exercices de répétition de mouvement** visent à entretenir les amplitudes articulaires en mouvement, voire obtenir un gain d'amplitude, et soutenir la fluidité du mouvement. Ces exercices peuvent être réalisés en prenant comme modèle des gestes de la vie quotidienne, comme le fait d'ouvrir une porte, ou d'atteindre un objet dans un meuble. Le type de mouvements et le nombre de répétitions de chaque exercice sera déterminé par le thérapeute et le patient en fonction de ses besoins. Trois modalités de couplages gestes-sons ont été développées, et sont explicitées dans le paragraphe 3.3.3 Synthèse Sonore.

Enfin, les **exercices cognitivo-moteurs** visent essentiellement à détourner la focalisation d'attention du geste vers une tâche non motrice, à savoir la mémorisation d'une séquence sonore et sa restitution grâce à la mise en mouvement, avec comme pré-supposé que le geste, visant un but non fonctionnel, peut être moins saccadé.

Ce type d'exercices se veut ludique, et les choix de retours sonores ont été orientés dans l'objectif de susciter la possibilité d'une narration ou mise en récit libre pour soutenir l'attractivité.

3.3.2 Design sonore

Les retours sonores du dispositif ont été élaborés avec le designer sonore Victor Audouze, à partir de la description de multiples univers propices à stimuler l'imagerie mentale des utilisateurs, pour favoriser l'**attractivité** du dispositif, en nous référant notamment aux résultats de la première étude menée, et à la littérature sur ce sujet. La conception des retours sonores a été orientée avec comme critère principal de proposer le maximum de variété avec un nombre limité d'univers sonores.

Trois catégories d'univers sonores ont été sélectionnées: environnement nature, environnement urbain, musique d'ambiance/électronique. Chaque catégorie est divisée en sous-catégorie, chacune comprenant au minimum quatre extraits sonores pouvant se superposer (layers), d'une durée moyenne d'une minute chacun, et des sons brefs de quelques secondes permettant d'agrémenter les layers et pouvant également être utilisés de manière indépendante.

La catégorie environnement nature est déclinée en trois sous-catégories: forêt, faune nocturne autour d'un étang, mer. La catégorie environnement urbain est déclinée en deux sous-catégories: gare et marché. La catégorie musique d'ambiance et électronique est déclinée en deux sous-catégories: rythmée, suspensive.

Chaque retour sonore a été conçu de manière à pouvoir être modulable en fonction des types d'exercices.

Ainsi, dans le cas des exercices statiques, l'objectif principal était de créer des retours sonores permettant l'accompagnement dans la durée du maintien de la posture, assurant une forme de soutien confortable malgré la contrainte physique induite par l'exercice à réaliser, tout en favorisant la préservation de l'attention grâce à la présence des sons brefs survenant aléatoirement.

Concernant les exercices de répétitions de mouvements, des associations par paires de retours sonores ont été créées, en alternant entre des associations congruentes (mono-thématique, par exemple: rivière/oiseaux) et des associations plus surprenantes (bi-thématique, par exemple: musique électronique/oiseaux). Ce choix a notamment été orienté par l'objectif d'évaluer l'influence de la congruence des paires de retours sonores sur la préférence des utilisateurs et sur les gestes qu'ils effectuent. Ces associations sont sujettes à libre modification selon les souhaits des utilisateurs.

Les exercices cognitivo-moteurs reposent exclusivement sur les sons brefs, qui sont proposés par groupe de quatre. La constitution des groupes a été pensée de manière à assurer une identification et une distinction aisée de chaque son, et pour favoriser la possibilité d'une mise en récit en mobilisant les représentations associées à chaque son et l'imaginaire de chaque utilisateur, ces deux aspects permettant de faciliter la mémorisation.

Pour l'exercice statique, en plus des retours sonores créés spécifiquement pour le dispositif, des extraits musicaux ont été sélectionnés. La sélection proposée à ce jour est issue du choix de représenter une diversité de courants musicaux, et fait suite aux échanges au cours des pré-tests du prototype α . Six catégories ont été retenues: classique, jazz, latino, pop, reggae et relaxation. Cette classification a été choisie en référence aux organisations proposées dans la majorité des médiathèques et librairies musicales, permettant ainsi une prise de repères afin de remplir le critère de **simplicité** pour les utilisateurs. Pour chaque catégorie, un extrait musical peu connu a été choisi. Ce choix a notamment été orienté par le souhait de réaliser des expérimentations avec le dispositif. L'influence de la connaissance d'un extrait musical et de la préférence musicale des participants sur l'effet de la sonification du mouvement n'étant pas suffisamment documentée à ce jour, la sélection d'œuvres peu connues assurait une neutralité des participants. A l'usage, il est tout à fait possible de modifier les catégories, et les extraits proposés dans chacune des catégories, répondant ainsi au critère de **flexibilité**.

Les réflexions concernant les choix de design sonore ont été réalisées parallèlement à celles portant sur les modalités de synthèse sonore, afin de proposer des interactions gestes-sons variées, et susceptibles d'offrir des expériences diversifiées aux utilisateurs. Ainsi, les modalités de synthèse sonore ont été adaptées spécifiquement en fonction des types d'exercices proposés et des caractéristiques des retours sonores et vice-versa.

3.3.3 Modalités d'interactions gestes-sons et synthèse sonore

L'ensemble des paramètres impliqués dans la synthèse sonore (paramètres de mouvement et caractéristiques sonores) sont ajustables en fonction de chaque situation, à l'aide d'un script (javascript) dédié. Ce script peut être modifié en temps réel lors de tests, et il est accessible depuis le client appelé "controller". De plus, nous avons fait le choix d'utiliser des calibrations réalisées par les patients avant chaque exercice, car cela permet, d'une part, de s'affranchir du positionnement exact des capteurs sur le bras, et d'autre part, de pouvoir modifier facilement les exercices, sans modifier le code. Ce choix est dicté par le critère de simplicité pour l'usage, garantissant par ailleurs la robustesse du système.

Dans tous les cas, les mesures de calibrations permettent de calculer des déviations ou des "distances" dans un espace paramétrique dérivé des données des capteurs inertiels.

Le mouvement du bras est donc considéré comme un point $x(t)$ dans un espace paramétrique formé par N paramètres. Dans cet espace, nous pouvons calculer en temps

réel des distances “Dist” ou déviation par rapport à des valeurs de calibration P.

Afin de s’adapter au plus grand nombre de situations, des approches ne reposant sur aucune conjecture de trajectoires et variations angulaires ont été envisagées.

Deux approches ont été implémentées:

- 1) **Approche 1:** Calcul de distance dans l’espace de paramètres $x(t)$ comme exprimé par l’équation ci-dessous. Cette approche a été utilisée pour la preuve de concept évoquée précédemment (2.5.2.1 de ce chapitre), où l’importance de chaque paramètres peut être ajustée par des poids w (par défaut $w=1$)

$$Dist(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i (x_i(t) - p_i)^2}$$

- 2) **Approche 2:** Calcul de déviation comme une somme pondérée des différences d’orientation des unités de mesures inertielles. A partir des accéléromètres et gyroscopes, il est possible d’obtenir 3 orientations P_o par rapport à la gravité (projections des angles sur l’axe vertical). Ces mesures d’orientations sont très stables au cours du temps et ne sont pas influencées par des perturbations magnétiques. L’utilisation des magnétomètres permet en plus d’obtenir l’angle azimutal, mais ces capteurs peuvent être fortement perturbés par des variations magnétiques locales (typiquement des haut-parleurs). Leur utilisation n’est donc pas systématique, et réduite aux situations où cette information est nécessaire. Il est possible de calculer des différences angulaires θ à partir du produit scalaire de l’orientation mesurée $x_o(t)$ avec celle de la calibration P_o :

$$\theta = \arccos(x_o \cdot p_o) \text{ (la norme des orientations est égale à 1)}$$

A partir des angles, il est possible de déterminer une déviation angulaire $Dev(t)$ comme une moyenne quadratique pondérée des différences angulaires mesurées par chaque capteurs (w_i représente un poids associé à chaque capteurs)

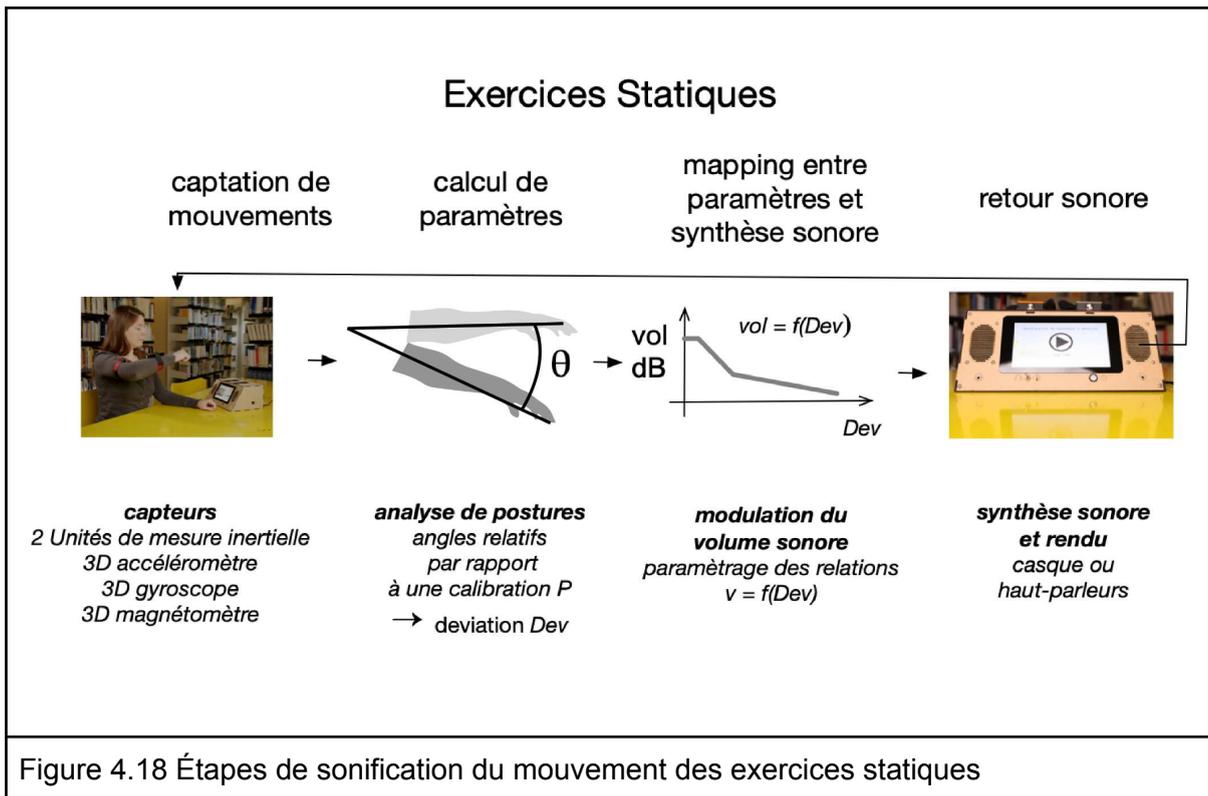
$$Dev(t) = \sqrt{\frac{1}{2} (w_1 \theta_1^2 + w_2 \theta_2^2)}$$

3.3.3.1 Exercices statiques

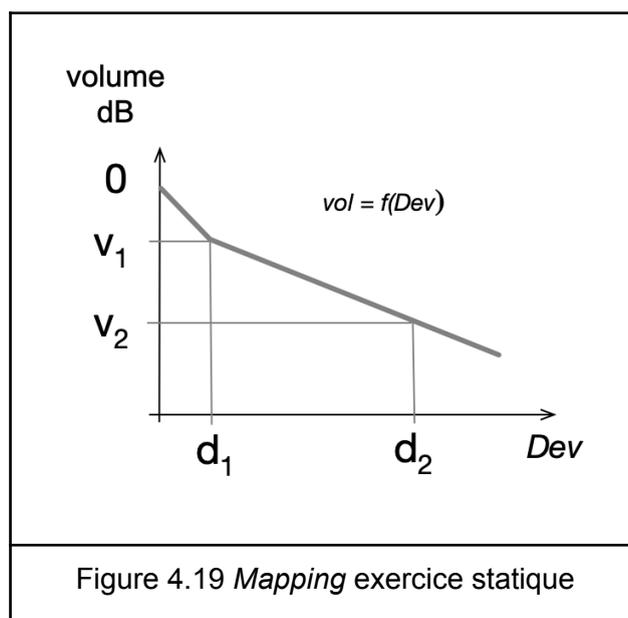
Pour les exercices de maintien de posture reposant sur des retours sonores non musicaux, les fichiers audios (layers) associés à la thématique choisie par l'utilisateur sont séquencés par un générateur de lecture aléatoire pour lequel il est possible de paramétrer les délais minimum et maximum de lecture de chaque extrait, les délais de chevauchement de lecture simultanée de plusieurs pistes, ou encore les délais d'exclusion de lecture des pistes après leur utilisation.

Concernant les extraits musicaux, il a été choisi de réaliser une lecture linéaire à partir du début de l'œuvre. En effet, si dans le cas des retours sonores créés le choix était de maintenir l'attention des utilisateurs en jouant avec d'éventuels effets de surprise, et donc en créant de la variabilité grâce au générateur aléatoire de lecture, dans le cas des extraits musicaux, le présumé était de s'appuyer sur la structure intrinsèque de chaque oeuvre, comportant des phases de tension et détente, comme support au maintien de l'attention des utilisateurs.

Le principe de sonification de ces exercices repose sur **l'indexation du volume sonore aux déviations de posture, la lecture des pistes sonores est interrompue lorsque la posture n'est pas maintenue ou lorsque l'utilisateur met un terme à l'exercice**. La tolérance aux déviations de posture par rapport à la référence enregistrée varie en fonction du niveau de difficulté sélectionné. A ce jour, trois niveaux de difficultés ont été créés.



En utilisant l'approche 2, un *mapping* est établi entre la déviation "Dev" et le volume (exprimé en décibels, dB), comme décrit par la figure 4.19.

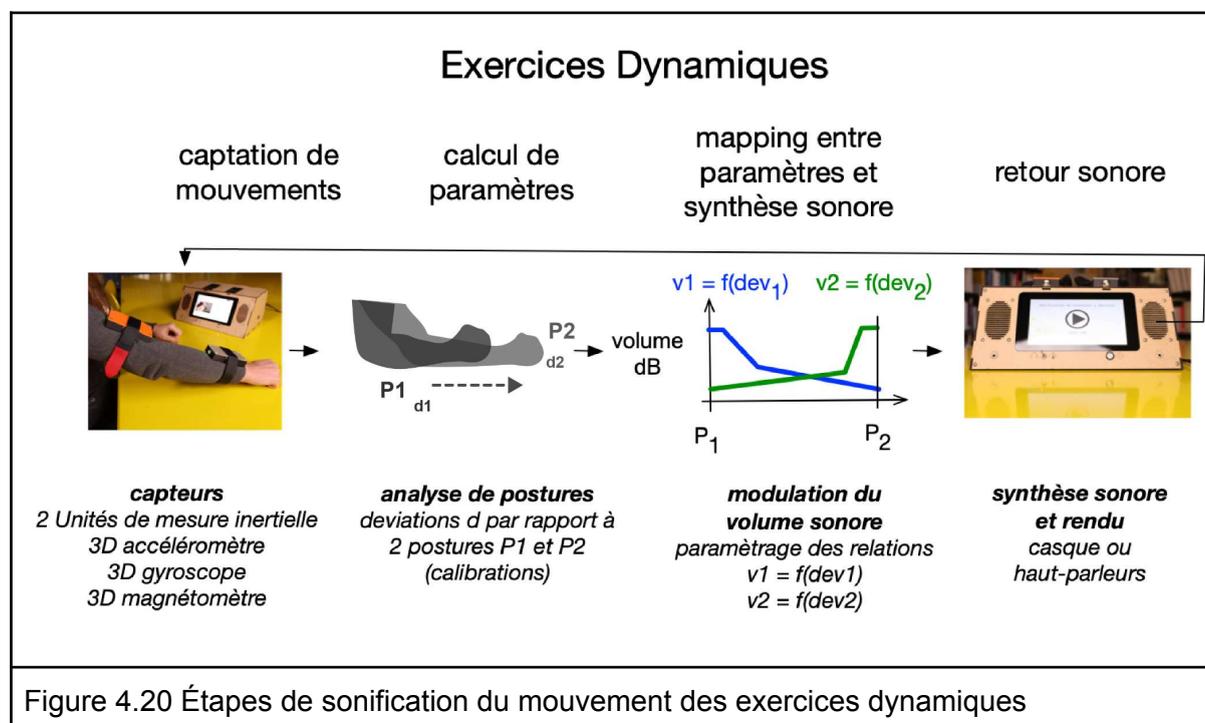


Les choix des valeurs v_1 , v_2 , d_1 et d_2 sont ajustables par l'utilisateur, notamment par le thérapeute.

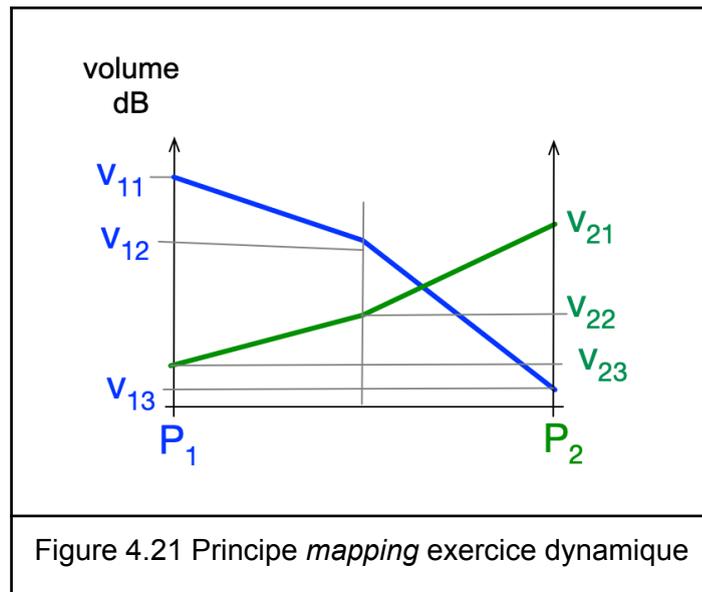
Pour l'expérience décrite dans le chapitre 5, nous avons choisi après plusieurs pré-tests les réglages suivants: $v_1 = 2$ [deg], $v_2 = 30$ [deg], $d_1 = -15$ [dB], $d_2 = -60$ [dB].

3.3.3.2 Exercices Dynamiques

Le principe de sonification des exercices dynamiques repose sur la navigation entre deux zones: un point de départ du mouvement et un point d'arrivée, chaque zone spatiale (et donc position de l'utilisateur) étant associée à un retour sonore.



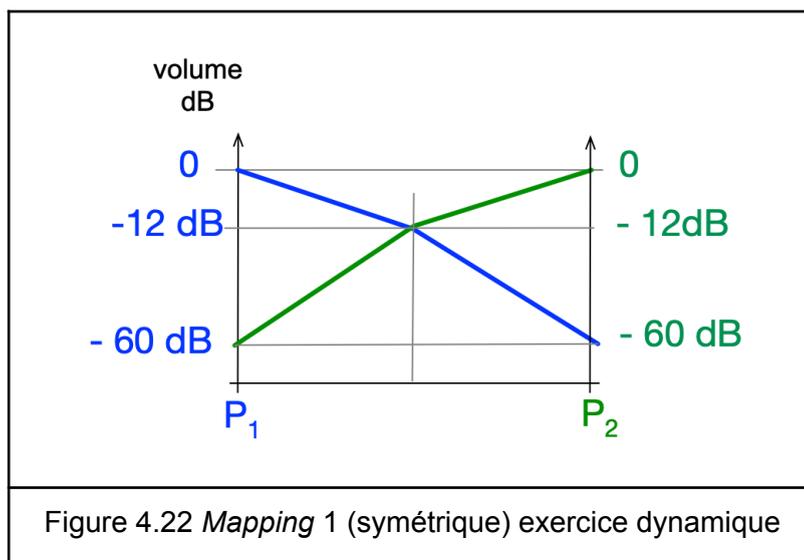
En utilisant l'approche 2, un mapping est établi entre les deux déviations "Dev" relatives aux deux calibrations.



Les choix des valeurs v_1 , v_2 , d_1 et d_2 sont ajustables par l'utilisateur.

Pour l'expérience décrite dans le chapitre 5, **trois types de *mapping* ont été développés.**

Mapping 1: Dans la première modalité de *mapping*, l'utilisateur dispose en permanence d'un retour sonore, et navigue d'un point à un autre accompagné par les retours sonores placés en fondu enchaîné. Le volume respectif de chacun des deux sons joué en fonction de la position relative par rapport aux deux positions calibrées est modulé de manière symétrique:

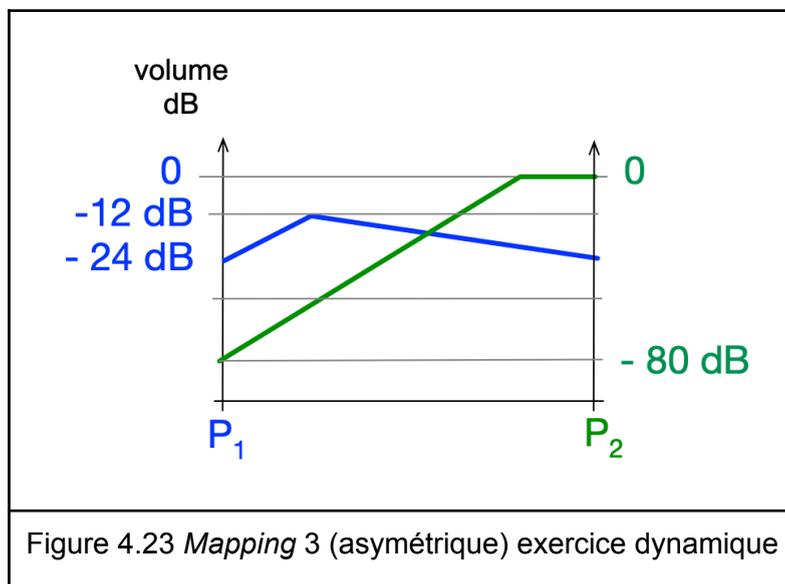


Mapping 2:

Dans la deuxième modalité de couplage, seule la mise en mouvement assure à l'utilisateur d'obtenir un retour sonore. Dans ce cas, le volume est ainsi modulé par deux effets. Le volume dépend d'une part de la position comme pour le mapping 1, et d'autre part il varie également en fonction de la valeur d'accélération du mouvement (norme de l'accélération filtrée). Ainsi, en l'absence de mouvement aucun son n'est perceptible. Le volume augmente graduellement en fonction de l'intensité du mouvement, et le son obtenu dépendra de la position relative par rapport aux calibrations des points d'arrivée et de départ.

Mapping 3

Dans la troisième modalité de couplage, le retour sonore associé à la zone de départ est présenté à un faible volume et il faut atteindre la zone d'arrivée pour obtenir le deuxième son avec un volume important. Le mapping est donc dans ce cas "asymétrique", comme décrit schématiquement ci-dessous. Le son n'est pas maximal à la position 1, et les deux sons apparaissent progressivement dans le cours du mouvement vers la position 2. Aucune modulation n'est ajoutée en fonction de l'intensité du mouvement.

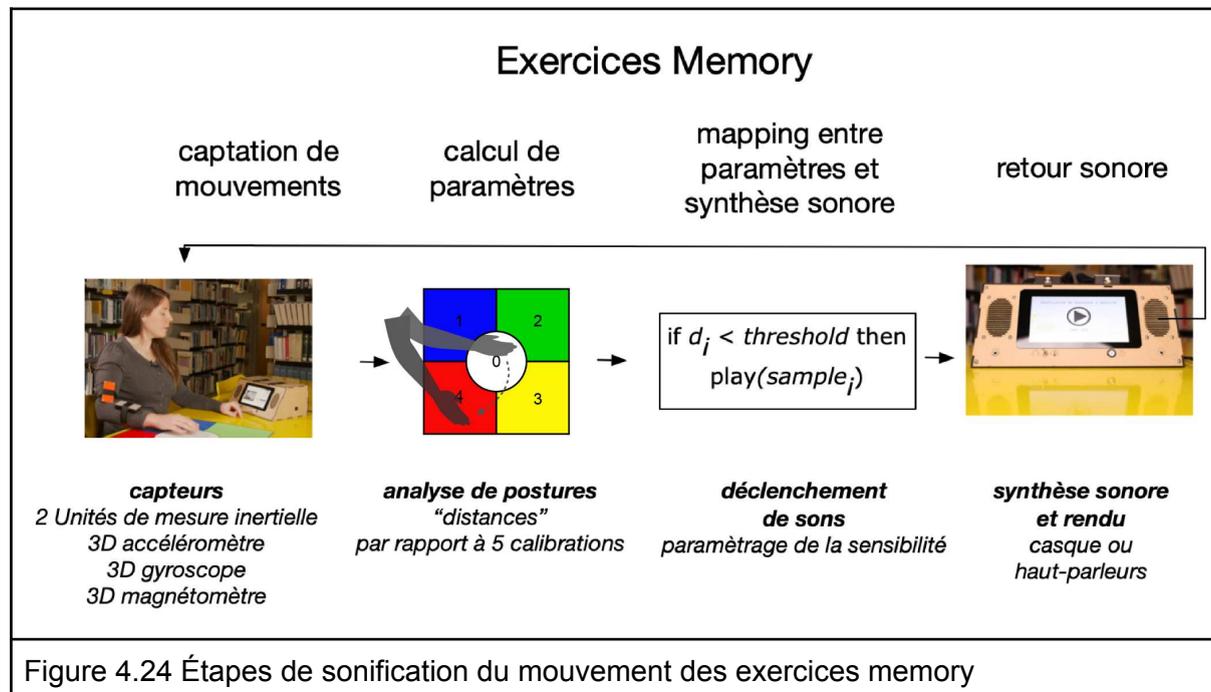


Chaque modalité peut ainsi répondre à des situations et objectifs différents. Dans le premier cas, l'objectif principal est de soutenir en permanence le mouvement, ce qui peut notamment être intéressant pour mettre en confiance le patient lorsque la mobilité peut être réduite et lorsque celui-ci a besoin de bénéficier d'informations constantes pour distinguer précisément

les positions de départ et d'arrivée. Dans le deuxième cas, l'objectif est de motiver le patient à rester toujours en mouvement pour notamment renforcer son endurance. Dans le troisième cas, l'objectif est d'atteindre l'amplitude maximale, avec comme perspective la possibilité progressivement d'obtenir une amplitude plus importante.

3.3.3.3 Exercices Memory

Concernant les exercices cognitivo-moteurs, chacune des 5 positions calibrées est associée à un son bref qui va être restitué en boucle tant que le sujet conservera sa position. Le système de synthèse sonore consiste donc uniquement à la lecture répétée de la piste audio pré-établie.



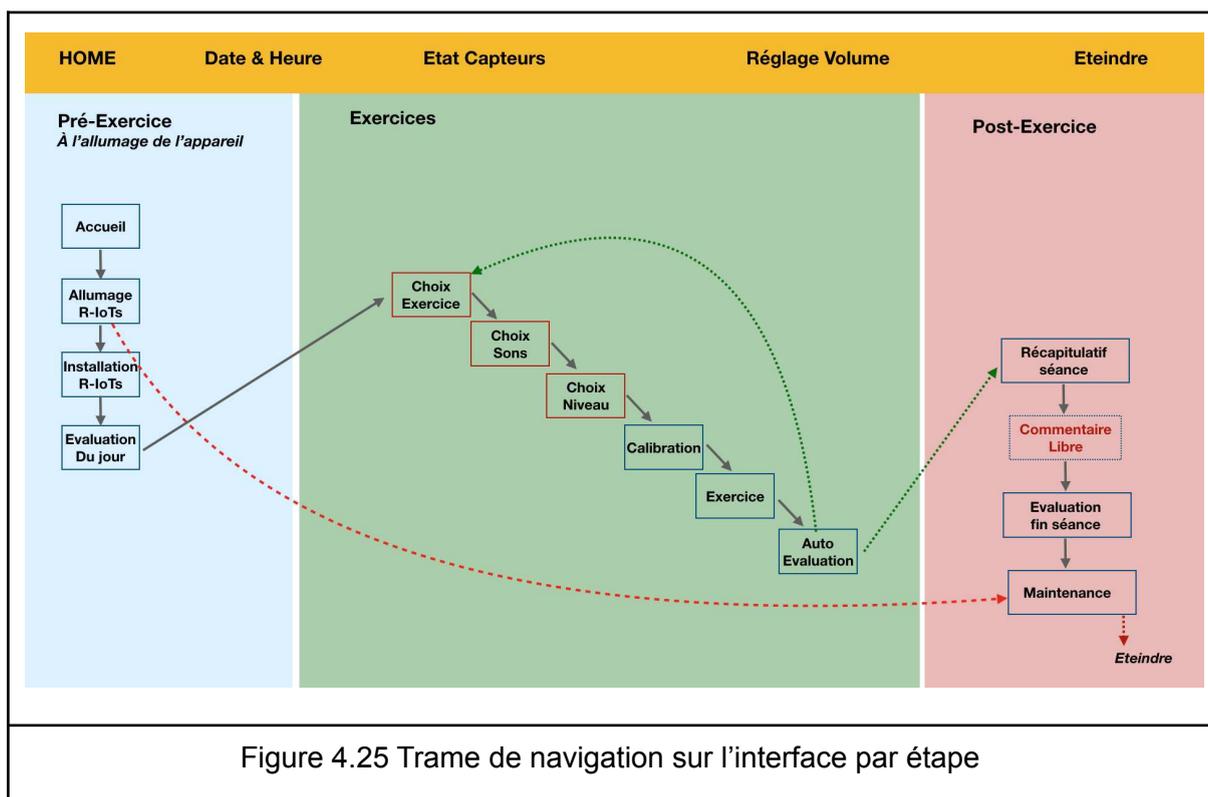
3.3.4 Navigation

La navigation a été conçue pour présenter successivement les étapes à réaliser aux utilisateurs, permettant conjointement de limiter la charge leur incombant (**simplicité**), et de s'assurer que les étapes soient toujours réalisées (**fiabilité**). Le système rappelle par exemple la nécessité d'allumer les capteurs de mouvements au début d'une séance, et l'étape suivante (placement des capteurs) n'est proposée que lorsque les deux capteurs sont effectivement en état de fonctionnement. L'avancée dans les différentes étapes est donc soumise à la validation de certains critères. Dans le cas de l'étape d'allumage des capteurs mentionnée précédemment, en cas de niveau de charge insuffisant des capteurs

au début de la séance, le système bifurque directement sur la page de maintenance afin d'éviter qu'une séance d'exercices soit interrompue en cours d'utilisation.

Deux modes de navigation existent: une navigation par étape, au cours de laquelle l'utilisateur sélectionne les exercices qu'ils souhaite réaliser, dans l'ordre de son choix, et selon les modalités de son choix, et une navigation guidée ou programmée, pour laquelle certaines étapes peuvent avoir été choisies au préalable, pour pré-définir certaines modalités tels que le nombre d'exercice à réaliser, leur ordre de présentation et niveau de difficulté.

Afin d'assurer un suivi adapté aux patients, et d'ajuster leurs programmes de rééducation, des informations quotidiennes sont recueillies concernant leur état général en début et fin de séance, et concernant leurs ressentis (évaluation de la difficulté des exercices et de leur performance). De même, s'agissant également d'un outil d'expérimentation et d'évaluation des effets de programmes de sonification du mouvement, des évaluations portant sur la qualité des retours sonores sont proposées à la fin de chaque exercice.



3.3.5 Tutoriels

L'usage du dispositif en autonomie par des patients présentant des séquelles de lésions cérébrales acquises implique la nécessité d'anticiper un potentiel besoin de supervision. La mise à disposition de vidéos tutorielles, accessibles à tout moment, et présentées aux étapes clés dans le dispositif, est une solution choisie pour répondre à ce besoin.

En plus de l'accès à des vidéos au cours de la navigation grâce à un emplacement dédié sur chaque page, celles-ci sont regroupées et complétées par des vidéos supplémentaires sur la page <https://www.stms-lab.fr/projects/pages/rehabilitation-with-interactive-music> au sein de la plateforme <https://apps.ismm.ircam.fr/>.

Enfin, un guide d'utilisateur, récapitulant les informations essentielles, associées à des illustrations, est en cours d'élaboration afin que les utilisateurs disposent d'une version écrite complémentaire aux vidéos, permettant ainsi de s'adapter selon leur préférence de support (Annexe "Notice").

4. Discussion : points forts, limites et perspectives d'améliorations

Le processus de conception et développement mis en œuvre a permis la création d'un **dispositif fonctionnel**, reposant sur une **structure robuste** et présentant des avantages, notamment la possibilité de programmer des sessions d'exercices, d'**adapter les niveaux de difficultés**, et d'**impliquer les patients dans les choix des retours sonores**. Cette **flexibilité** assure la possibilité d'ajuster les paramètres à chaque profil d'utilisateurs. De plus, l'originalité de s'adresser aux binômes patients-thérapeutes a permis de proposer un objet revêtant une fonction symbolique assurant un lien entre l'institution et le domicile.

Par ailleurs, le dispositif a pu être **dupliqué** en 10 exemplaires. Le coût moyen de duplication a été estimé à partir du récapitulatif des bons de commande de matériel à un montant compris entre 400 et 500€. Ainsi, outre sa transportabilité, le dispositif a un **coût modéré**, équivalent voire inférieur à des dispositifs de réalité virtuelle, et moindre comparativement à d'autres dispositifs visant à soutenir la rééducation du membre supérieur après une lésion cérébrale acquise, tel que le robot *Armeo Spring*.

Néanmoins, au-delà de quelques corrections à apporter aux programmes, le dispositif créé, fruit de choix et de compromis, présente des limites, résultant dans certains cas d'incidences contradictoires entre les critères de conception sélectionnés.

La première limite, d'ordre méthodologique, concerne la définition indirecte des besoins des patients du fait des contraintes contextuelles faisant obstacle à leur implication. La participation de thérapeutes de profils variés dans le processus avait ainsi pour objectif de limiter les conséquences de cette restriction.

Concernant le critère de sécurité, la décision de recourir à un système autonome disposant de son propre serveur, permet dans une certaine mesure de protéger les données enregistrées. Toutefois, les données enregistrées ne sont pas cryptées à ce jour. Cette limite évoquée, il convient de nuancer l'importance du risque conséquent, les données collectées n'étant pas identifiantes, peu informatives à l'état brut et relativement chronophages à traiter. Ce choix implique en revanche une impossibilité pour les thérapeutes d'accéder à distance aux données enregistrées au cours des sessions réalisées par les patients, et suppose donc des visites régulières pour réajuster les programmes.

Par ailleurs, l'ensemble des composants utilisés dans le dispositif disposent d'une certification, et sont utilisés dans les pratiques quotidiennes, en revanche l'assemblage proposé ne dispose pas à ce jour de certification. La présence de batteries au lithium soulève notamment la problématique de l'impact écologique de ce type d'appareil, aspect non traité dans le processus de conception. Les risques impliqués étant comparables à ceux survenant lors d'utilisation d'appareils mobiles de télécommunication, quelques précautions d'usage sont préconisées.

Le choix d'élaborer une boîte, pour des enjeux symboliques et pragmatiques, implique des contraintes à plusieurs niveaux: pour la fabrication, la duplication, la maintenance, le transport, et le stockage notamment. Plus chronophage, plus encombrant et plus coûteux, ce choix permet d'assurer une plus grande sécurité, de s'affranchir des problématiques de compatibilité de navigateur et de versions qu'impose une application, et garantit également une plus grande fiabilité, notamment concernant la comparabilité des données recueillies. Cependant, ce choix ne remplit pas nécessairement le critère de simplicité, particulièrement du point de vue du concepteur.

Dans une perspective comparable, le recours à des capteurs de mouvement permet de ne pas restreindre l'espace d'utilisation mais implique également des contraintes pour leur port, imposant la prise en considération des limitations de mobilité des utilisateurs. Ce choix peut ainsi être discutable concernant le critère de simplicité. Par ailleurs, le risque de positionnements incorrects des capteurs implique également une discussion du critère de fiabilité. Néanmoins, cette problématique est inhérente à la situation d'usage d'un dispositif en autonomie et non spécifique au choix effectué dans ce cas. De plus, dans le cas présent, ce risque a été anticipé, et des modalités visant à le limiter ont été prévues.

Parmi les améliorations souhaitables, un système de synthèse et de contrôle vocal permettrait de ne pas restreindre l'usage du dispositif à l'écran tactile. Cette amélioration permettrait ainsi de faciliter la navigation notamment pour les déclenchements et arrêts des exercices, de limiter les risques de focalisation attentionnelle sur l'écran détournant de la modalité auditive, et enfin éviter l'exclusion de patients présentant des troubles visuels.

Pour répondre au critère de simplicité, une interface graphique à destination des thérapeutes pourrait être développée afin de faciliter l'élaboration de programmes quotidiens pour leurs patients.

En plus du récapitulatif du nombre d'exercices réalisés lors d'une séance, des informations concernant la durée de la séance, et l'évolution du temps consacré au fil des jours pourraient être présentées aux patients, les représentations synthétisant les efforts réalisés pouvant contribuer à leur motivation.

L'attractivité du dispositif pourrait également être potentialisée grâce à la création d'exercices ludiques complémentaires, et notamment le développement d'exercices sous la forme de jeux collectifs.

Enfin, un système de portage du dispositif pourrait être conçu, par exemple sous forme d'un plateau de jeu pliable dans lequel il serait possible de ranger la boîte et qui permettrait de compléter par d'autres exercices le dispositif actuel.

CHAPITRE 5

Évaluations du dispositif

Ce chapitre présente les 3 évaluations réalisées avec le dispositif: les évaluations techniques visant à évaluer la fonctionnalité du dispositif, les évaluations des exercices dynamiques et statiques, visant notamment à comparer les effets des modalités d'interactions gestes-sons (étude N°2), et les évaluations d'utilisabilité initiées auprès de rééducateurs.

1. Évaluations techniques du β prototype

1.1 Matériel

Pour définir le temps d'autonomie des capteurs, et la fonctionnalité du système de recharge, des tests ont été réalisés permettant de suivre l'évolution du niveau de charge des capteurs au cours du temps.

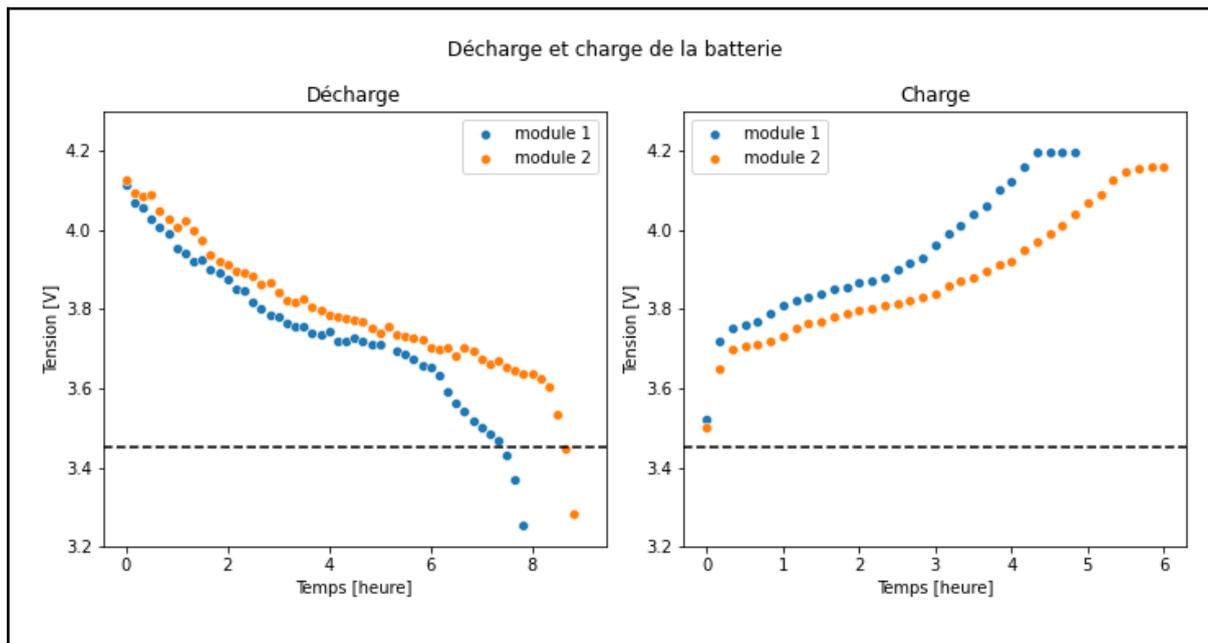


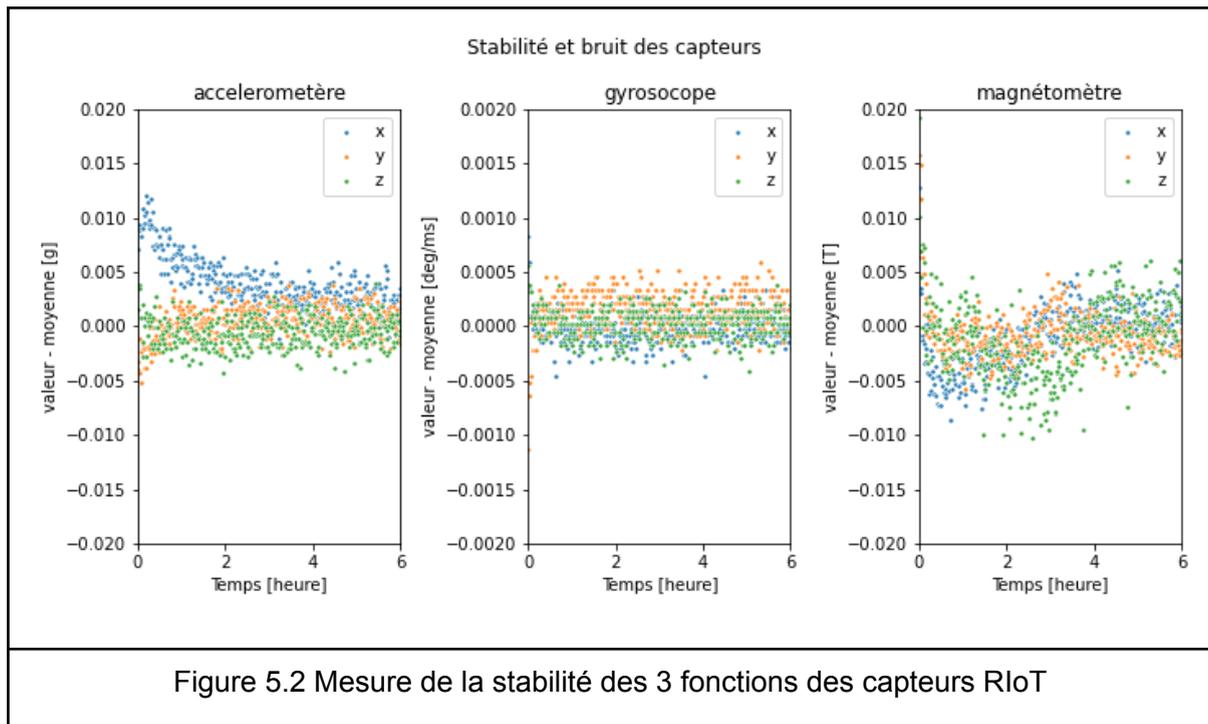
Figure 5.1 Suivi au cours du temps de la batterie des capteurs RIoT

La ligne horizontale correspond à la valeur minimale pour le fonctionnement des capteurs (3,45 V).

Le suivi au cours du temps de la tension mesurée dans les capteurs allumés a permis d'estimer la durée d'autonomie de la batterie à environ 7 heures. Le temps de charge minimum a quant à lui été estimé à 30 minutes pour une expérience d'une heure, et le temps de recharge complet à 5 heures.

Ces estimations ont permis de définir la valeur seuil de redirection vers la page de maintenance du dispositif lors du démarrage d'une séance afin d'éviter une interruption par défaillance de la charge des batteries des capteurs.

Par ailleurs, afin de s'assurer de la fiabilité des données, et d'extraire les éventuelles variations naturelles des mesures des capteurs, les variations de mesures des 3 fonctions des capteurs ont été suivies au cours du temps au repos (capteurs posés sur une table).



Les variations des valeurs de la fonction accéléromètre sur 1h sont estimées au maximum à 0.05 g. Rapportées au calcul des angles, ces variations sont susceptibles d'induire une estimation des angles avec une erreur maximale de 0.3 degrés. Cette erreur, sans effet sur la synthèse sonore, est jugée négligeable dans le cas de notre application.

Les variations mesurées par les gyroscopes et magnétomètres, inférieures à 1%, sont également négligeables par rapport aux valeurs mesurées lors des séances de sonification.

Les mesures présentées ont été réalisées avec l'ensemble des capteurs du panel à disposition (20) afin de valider la duplication du dispositif.

1.2 Fonctionnalité dispositif

Afin de vérifier la fonctionnalité de la boîte, des exercices, du système de sonification, et de la programmation d'exercices quotidiens, différentes sessions de tests ont été menées: des sessions de tests d'utilisation aléatoire par des utilisateurs experts (*monkey testing*), des sessions d'utilisation programmée et libre par des utilisateurs non experts.

1.2.1 "Monkey testing"

Dans l'objectif d'identifier et isoler des problèmes techniques pouvant survenir lors de l'usage du dispositif, plusieurs sessions de tests du type *smart monkey test* (tests

d'utilisation aléatoire par des utilisateurs ayant connaissance du dispositif, de son fonctionnement, et de ses fragilités notamment) ont été réalisées par les membres de l'équipe ISMM impliqués dans le projet. En cas d'observation d'une erreur ou d'un dysfonctionnement technique redondant, les conditions propices à leurs survenues étaient répétées et notées, afin d'isoler les problématiques. Ainsi, il a été possible d'identifier 3 sources principales de dysfonctionnements, une liée au matériel et deux liées au code de l'interface.

Le dysfonctionnement de l'horloge survenait au démarrage des sessions en cas d'utilisation du bouton de façade après avoir éteint le dispositif. Ce dysfonctionnement générait des erreurs de dates, avec pour conséquence possible un enregistrement incorrect de la date de réalisation des exercices.

Le premier dysfonctionnement lié à la programmation de l'interface survenait en cas d'utilisation du mode de choix aléatoire des exercices et sons, bloquant la poursuite de la session d'exercices. Le second dysfonctionnement lié à la programmation de l'interface survenait lors du lancement des vidéos tutorielles sur les pages d'exercices, bloquant ensuite le chargement des exercices.

Ainsi, une fois les trois sources principales de dysfonctionnements isolées des modifications ont été apportées, grâce respectivement au changement du bouton de façade pour les problèmes d'horloge, à la modification du code pour la sélection aléatoire d'un exercice ou d'un retour sonore, et à la création d'un espace dédié à chaque vidéo tutorielle sur les pages d'exercices.

Par ailleurs, un script permettant de suivre la survenue d'éventuels incidents et ainsi d'en identifier les causes possibles a été développé à l'issue de cette phase de tests.

1.2.2 Tests répétés avec des utilisateurs non experts

1.2.2.1 Contexte et objectifs

Après réception d'un avis favorable du Comité d'Éthique de la Recherche de Sorbonne Université (CER-SU, Protocole PEYRE-Sonification CER-2020-86), les dispositifs ont été proposés à des participants volontaires afin d'évaluer leur fonctionnalité et utilisabilité en autonomie pour des utilisateurs non experts aux profils variés. Des sessions d'une semaine d'utilisation suivant un programme pré-établi ("Programme"), et d'une semaine d'utilisation libre ("Libre") ont été prévues.

L'objectif principal était d'évaluer le fonctionnement des dispositifs et des contenus proposés, grâce à des rapports d'incidents quotidiens, et selon deux modalités d'usage, l'une programmée et l'autre libre.

L'objectif secondaire était d'évaluer la prise en main du dispositif par des utilisateurs extérieurs au projet.

Dans le cas des sessions "Programme" les utilisateurs devaient réaliser quotidiennement les exercices proposés successivement sur l'interface, et n'avaient pas de choix concernant les modalités (ordre et nombre des exercices, niveau de difficulté, retours sonores). Les programmes étaient conçus via une randomisation des situations de façon à ce que chaque participant réalise chaque jour un exercice de chaque type (statique, dynamique et memory) avec les 3 niveaux de difficultés ou les 3 modalités de couplage possibles, soit un total de 9 exercices par session quotidienne avec 1 retour sonore par exercice, variant chaque jour.

Dans le cas des sessions "Libre" les participants avaient pour consigne de réaliser chaque jour chaque type d'exercice avec les 3 niveaux de difficultés ou modalités de couplages, et pouvaient choisir librement l'ordre de réalisation des exercices et les associations sonores.

1.2.2.2 Participants

Les critères d'inclusion étaient les suivants: Âge ≥ 18ans; Bonne compréhension du français ; Signature du consentement éclairé; Affiliation à un régime de Sécurité Sociale.

Les critères de non inclusion étaient les suivants: Troubles cognitifs majeurs empêchant la signature du consentement éclairé ou la compréhension de la note d'information et du carnet de bord; Epilepsie audiotogène ; Port d'un pacemaker, conformément aux recommandations d'usage de ces appareils sensibles aux champs électromagnétiques tel que le WIFI; Refus de participer.

Le critère d'exclusion était le suivant: retrait du consentement.

1.2.2.3 Déroulement des tests

Après transmission de la note d'information, les participants étaient conviés individuellement à une visite d'inclusion au cours de laquelle les conditions de participation étaient vérifiées, des réponses étaient apportées à leurs questionnements, et la fiche de consentement co-signée. Après recueil du consentement, une présentation et démonstration de l'utilisation du dispositif était réalisée. Un temps de test par les participants était prévu afin de vérifier la bonne compréhension du fonctionnement et les étapes à suivre lors des séances en autonomie.

A l'issue de cette visite, un carnet de bord permettant de récapituler les informations principales sur l'utilisation du dispositif, de noter les exercices réalisés quotidiennement, les éventuelles difficultés rencontrées et un rapport d'incidents était remis aux participants avec le dispositif.

Les participants réalisaient quotidiennement leur séance en autonomie à leur domicile pendant une semaine. En cas de difficultés ou de questionnements, ils pouvaient contacter les investigateurs de l'étude.

A l'issue de la semaine d'utilisation programmée ou libre, les participants rapportaient le dispositif avec leur carnet de bord complété et pouvaient mentionner leurs observations, et remarques concernant l'utilisation du dispositif et les différents exercices réalisés.

Le modèle de carnet de bord et les programmes quotidiens des participants sont présentés en annexes.

1.2.2.4 Résultats des tests

Quatre participants répondant aux critères d'inclusion ont été recrutés, leur profil est récapitulé dans le tableau 5.I.

Participant	Genre	Âge	Pratique musicale	Appétence pour les nouvelles technologies	Profession de santé	Mode d'utilisation dispositif
01	Homme	34 ans	Non	Usage professionnel	Non	Programme puis Libre
02	Femme	63 ans	Amateure	Non	Profession médicale hors rééducation	Programme
03	Femme	24 ans	Amateure	Utilisatrice	Non	Programme puis Libre
04	Femme	40 ans	Non	Utilisatrice	Rééducateur	Libre

Tableau 5.I Tableau récapitulatif des profils des participants du test fonctionnel

Il a été possible pour chaque participant de réaliser les exercices quotidiennement, avec une durée de séance variable, comprise entre 25 minutes et 55 minutes. Les participants ont précisé ne pas avoir rencontré de difficultés pour réaliser leurs exercices, ou utiliser le dispositif. La participante 2 a précisé avoir regardé les vidéos tutorielles lors des deux premières séances pour s'assurer de réaliser correctement ses exercices.

Les rapports d'incidents font état de 3 événements survenus de manière épisodique : le blocage sur la page de chargement d'un exercice à une reprise pour les participantes 3 et 4,

et la déconnexion de l'application après un temps d'arrêt en cours de session pour la participante 3. Ces dysfonctionnements techniques ponctuels ont nécessité l'arrêt et redémarrage du dispositif pour poursuivre la séance. Après relance de l'interface, il était à nouveau possible de réaliser des exercices. Par ailleurs, les données ont été correctement enregistrées avant et après la survenue de l'incident.

Les participants 1 et 2 n'ont pas déploré d'incidents techniques au cours de leurs sessions d'exercices.

Le participant 1 a toutefois noté un bruit d'interférence lors de l'allumage de son dispositif.

Concernant l'évaluation de la fonctionnalité du script des programmes pré-établis, les exercices programmés ont été comparés aux données enregistrées dans le dispositif et à ceux notés dans les carnets de bord des participants. La concordance des données a permis de confirmer la fonctionnalité du script de programmation des exercices, et l'enregistrement correct des données.

Les sessions d'utilisation libre ont également permis de confirmer l'enregistrement correct des données en l'absence de programmes pré-établis, grâce à la concordance entre les exercices notés dans les carnets de bord des participants et ceux enregistrés dans le dispositif.

Enfin, le mode d'utilisation libre du dispositif a permis de confirmer la fonctionnalité du système de sonification du mouvement avec des postures et mouvements différents des modèles utilisés lors du développement.

1.2.2.5 Discussion

Les résultats obtenus avec ce très petit échantillon de participants permettent de suggérer que le dispositif conçu est fonctionnel et utilisable en autonomie par des utilisateurs non experts aux profils variés à l'issue d'une séance de démonstration de son usage, complétée par la présence des vidéos tutorielles.

Ces tests ont permis d'identifier des dysfonctionnements ponctuels sur certains dispositifs: le bruit d'interférence a été imputé à l'assemblage de la boîte avec le passage d'un câble à proximité des haut-parleurs. Une correction a ainsi été apportée sur ce dispositif. Par ailleurs, des bugs peuvent ponctuellement survenir dans des lieux où de nombreuses bornes wifi cohabitent, dû à la configuration du système WiFi embarqué dans les Raspberry Pi.

Les incidents rapportés sont rares et jugés mineurs car sans risque pour les utilisateurs et sans effet sur l'enregistrement des données et la poursuite de la séance après leur

survenue. Néanmoins, nous pouvons supposer que ce type d'évènements pourrait être susceptible de déstabiliser certains utilisateurs anxieux, et éventuellement décourager de poursuivre la séance. Outre les corrections à apporter pour limiter la survenue de ces dysfonctionnements techniques, il apparaît donc indispensable à minima de prévenir les utilisateurs de cette éventualité, et de préciser les étapes à réaliser en cas de survenue.

2. Evaluations des exercices et modalités de couplages développés

2.1 Objectifs

Si la première étude réalisée dans le cadre de ce travail de thèse (chapitre 3) a permis de mettre en évidence l'influence de la présence de retours sonores sur la temporalité de réalisation de cycles de mouvements répétés d'extension du coude, et l'effet de la nature des retours sonores sur le vécu de l'expérience des participants, nous nous sommes questionnés sur l'influence potentielle des modalités de couplage gestes-sons.

Ainsi, nous avons réalisé une étude visant à évaluer les trois modalités de couplage geste-son développées pour l'exercice dynamique, avec trois conditions sonores différentes. Par ailleurs, l'effet de la sonification étant susceptible d'être variable selon la tâche à réaliser, nous avons également souhaité évaluer l'effet de la sonification du mouvement concernant la tâche statique de maintien d'une posture.

Une étude en deux parties visant à évaluer le contenu des exercices dynamique et statique développés lors de la conception du dispositif a donc été réalisée avec des participants volontaires ne présentant pas de troubles moteurs, au sein du Centre Multidisciplinaire des Sciences Comportementales Sorbonne Université INSEAD (laboratoire de l'Institut Européen d'Administration des Affaires), après obtention de l'accord de leur comité d'éthique.

2.2 Participants

2.2.1 Critères d'inclusion et non inclusion

L'ensemble des participants répondaient aux critères d'inclusion suivants: être âgé d'au moins 20 ans, ne pas présenter de pathologies impliquant des troubles de la motricité des membres supérieurs, être en capacité de comprendre des consignes simples et de donner son consentement libre et éclairé pour participer à l'étude. Suivant un principe de précaution concernant l'usage d'appareils électro-magnétiques, les participants n'étaient pas inclus en cas de port d'un dispositif cardiaque implantable de type pacemaker.

Afin de réunir une variété équilibrée de profils de participants, ceux-ci ont été répartis par groupe de huit dans trois catégories d'âge, définies comme suit: 20-40 ans, 41-61 ans, plus de 61 ans, en considérant également leur genre.

2.2.2 Description des participants

Parmi les 24 participants inclus dans l'étude, la répartition d'hommes et de femmes dans chaque catégorie d'âge était identique. La description des profils de chaque participant inclus dans l'étude est récapitulée dans le tableau ci-dessous.

Critères Participants	Âge	Genre	Dominance manuelle	Pratique et écoute musicale	Troubles auditifs	Ordre expérience
P1	80 ans	Homme	Droitier	Pr: occasionnelle E: régulière	Légère presbycousie	D/S
P2	72 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: quotidienne	Acouphènes ponctuels Audiogramme ok	D/S
P3	62 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: quotidienne	Acouphènes ponctuels Audiogramme ok	D/S
P4	66 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: régulière	Audiogramme ok	S/D
P5	59 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: occasionnelle	Pas de troubles ou gêne déclarés	D/S
P6	82 ans	Femme	Droitière	Pr: occasionnelle E: occasionnelle	Audiogramme ok	S/D
P7	21 ans	Femme	Droitière	Pr: régulière E: régulière	Pas de troubles ou gêne déclarés	S/D
P8	65 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: régulière	Légère presbycousie	S/D
P9	48 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: régulière	Pas de troubles ou gêne déclarés	D/S
P10	41 ans	Femme	Droitière	Pr: régulière E: quotidienne	Audiogramme ok	S/D
P11	30 ans	Homme	Droitier	Pr: occasionnelle E: régulière	Audiogramme ok	D/S
P12	26 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: régulière	Pas de troubles ou gêne déclarés	S/D
P13	42 ans	Homme	Droitier	Pr: régulière E: quotidienne	Audiogramme ok	D/S
P14	42 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: quotidienne	Acouphènes ponctuels Audiogramme ok	S/D
P15	51 ans	Femme	Droitier	Pr: régulière E: quotidienne	Audiogramme ok	S/D
P16	35 ans	Homme	Droitière	Pr: non E: occasionnelle	Audiogramme ok	S/D
P17	23 ans	Homme	Droitier	Pr: régulière E: régulière	Pas de troubles ou gêne déclarés	D/S
P18	26 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: quotidienne	Pas de troubles ou gêne déclarés	D/S
P19	35 ans	Femme	Droitière	Pr: non E: régulière	Audiogramme ok	S/D
P20	47 ans	Homme	Gaucher	Pr: régulière E: régulière	Acouphènes ponctuels Audiogramme ok	S/D
P21	55 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: occasionnelle	Audiogramme ok	D/S
P22	38 ans	Femme	Gauchère	Pr: régulière E: régulière	Pas de troubles ou gêne déclarés	D/S
P23	71 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: occasionnelle	Légère presbycousie	D/S
P24	75 ans	Homme	Droitier	Pr: non E: quotidienne	Audiogramme ok	S/D

Tableau 5.II Tableau récapitulatif des participants de l'étude *mapping*
Pr: pratique instrumentale ou vocale / E: fréquence d'écoute musicale
S: exercice statique / D: exercice dynamique

2.3 Déroulement de l'étude

Les participants ont réalisé successivement les deux parties de l'étude (exercice dynamique, exercice statique), à l'occasion de deux séances distinctes. L'ordre de passation des séances consacrées chacune à un type d'exercice était randomisé.

L'ensemble des exercices ont été réalisés avec des exemplaires du dispositif de sonification du mouvement (β prototype) en présence d'un expérimentateur. Le matériel était donc constitué d'une boîte, associée à deux capteurs de mouvements, placés respectivement sur le bras et l'avant-bras non dominant.

Les objectifs spécifiques, protocoles, analyses et résultats obtenus pour chaque exercice sont présentés dans deux parties distinctes, 2.4 concernant l'exercice dynamique et 2.5 concernant l'exercice statique.

2.4 Étude portant sur l'évaluation des modalités de couplages dans le cas des exercices de répétition de mouvements

2.4.1 Contexte et objectifs

Dans le cadre de la première étude menée, les modalités de couplage gestes-sons développées étaient mises en regard avec la nature des retours sonores. Ainsi, les modalités de couplage avaient été développées en fonction des choix de retours sonores, dans la perspective souhaitée que l'interaction soit la plus fluide possible pour les participants, et les retours sonores attractifs et plaisants.

L'objectif principal de la présente étude était d'évaluer l'effet de différentes modalités d'interaction pour un même retour sonore. En effet, trois modalités d'interaction ont été développées et sont proposées dans le dispositif pour les exercices de répétition de mouvements, répondant à trois situations différentes d'utilisation: présence permanente de retours sonores (modalité de couplage "All": *mapping* 1), présence de retour sonore uniquement lors des phases de mobilisation (absence de sons en cas d'arrêt du mouvement, modalité de couplage "Move": *mapping* 2) présence de retour sonore à l'approche de la zone d'amplitude maximale (modalité de couplage "Max": *mapping* 3). Nous avons donc souhaité évaluer si, pour un même retour sonore, ces modalités d'interaction étaient susceptibles d'influencer l'exécution de gestes répétés.

L'objectif secondaire de cette étude était d'évaluer l'influence du choix de retours sonores sur l'appréciation des modalités d'interaction.

2.4.2 Protocole

L'exercice à réaliser était similaire à celui présenté dans la première étude, à savoir, la répétition d'un mouvement d'extension du coude sur une table, d'un point de départ à un point d'arrivée. Les points de départ et d'arrivée étaient calibrés avant le début de chaque exercice, permettant un ajustement à la longueur des bras et aux amplitudes articulaires de chaque participant. Des marques visibles par l'expérimentateur étaient notées afin d'assurer la comparabilité des données collectées au cours de la séance.

Chaque exercice de répétition de mouvements était réalisé par les participants pendant une durée de deux minutes avec le bras non dominant. Les participants étaient libres de réaliser le mouvement à la vitesse de leur souhait. Assis sur une chaise, ils devaient fixer une cible du regard pendant la durée de répétition des mouvements. Le son était restitué grâce aux hauts-parleurs de la boîte.

Trois conditions sonores étaient proposées: sans retour sonore, avec un retour sonore mono-thématique entre le point de départ et le point d'arrivée (rivière - oiseau), avec un retour sonore bi-thématique et incongruent (forêt - musique électronique). Les trois modalités d'interaction possible ("All", "Max", "Move") étaient évaluées avec les retours sonores mono-thématique et bi-thématique. L'ordre de présentation des situations sans retour sonore était fixe (début, milieu, fin de session) pour servir de contrôle. L'ordre de présentation des situations sonores combinées avec les modalités d'interaction était tiré au sort pour chaque participant.

Ainsi, les participants devaient donc réaliser l'exercice à 9 reprises: un exercice sans retour sonore, trois exercices avec retours sonores et modalités d'interaction variables, un exercice sans retour sonore, trois exercices avec retours sonores et modalités d'interaction variables, enfin, un exercice sans retour sonore. Chaque exercice était suivi d'un temps de pause d'une durée d'une minute afin de limiter l'influence de la fatigabilité.

Au début de la séance, les participants étaient informés de l'existence de plusieurs modalités d'interaction gestes-sons sans précision sur leur caractéristique et fonctionnement. Un temps de test des modalités de couplage était systématiquement proposé après l'enregistrement des références de point de départ et d'arrivée (calibration) afin que chaque participant puisse expérimenter l'interaction avant l'enregistrement des données.

Les données de mouvements étaient enregistrées au cours des exercices. Après chaque exercice de répétition les participants devaient remplir les auto-évaluations de la

performance, du niveau de difficulté de l'exercice, de l'appréciation du retour sonore et de l'adéquation du retour sonore avec l'exercice de répétition de mouvements.

Enfin, à l'issue de la séance, il était demandé aux participants de préciser quelle était leur situation préférée.

2.4.3 Modalités de traitement et d'analyse des données

L'ensemble des données brutes des deux capteurs de mouvements ont été collectées et enregistrées, soit 2x9 flux de données correspondant aux 3 coordonnées relatives à chaque capteur (accéléromètre, gyroscope, et magnétomètre), ainsi que les "déviations" relatives calculées pour moduler le volume des retours sonores lors de la synthèse. Ces "déviations", décrites dans le chapitre 4, sont basées sur la calibration effectuée par chaque participant avant chaque mesure.

Les analyses portent sur :

1) la détermination des amplitudes de l'oscillation, "amplitude moyenne 1" et "amplitude moyenne 2", déterminées entre les minima et maxima observées dans "déviations 1" par rapport au point de départ, et déviations 2" par rapport au point d'arrivée. Ce calcul des amplitudes est illustré sur la figure Figure 5.3

2) la durée moyenne des cycles de mouvement d'extension-retrait.

Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide de Python (version 3.7.9). Les 10 premières secondes de chaque enregistrement n'ont pas été prises en compte pour éviter les artefacts dus à l'initiation du mouvement. Les points maximum et minimum de chaque cycle ont été extraits automatiquement à l'aide de la fonction *findpeaks*. Après vérification manuelle, la durée moyenne des cycles et les amplitudes moyennes des oscillations, prenant en compte tous les points extrêmes valides, ont été calculées (Figure 5.3).

Les amplitudes moyennes d'oscillations et la durée moyenne des cycles sont comparées dans les différentes conditions (modalités de couplage, et caractéristiques des retours sonores) en prenant en considération les catégories d'âge. Comme les distributions des données ne suivent pas une loi normale, et les mesures sont répétées pour chaque participant, des modèles linéaires mixtes ont été utilisés pour analyser les données. Ensuite, des tests de Wilcoxon ont été réalisés pour les différents contextes sonores.

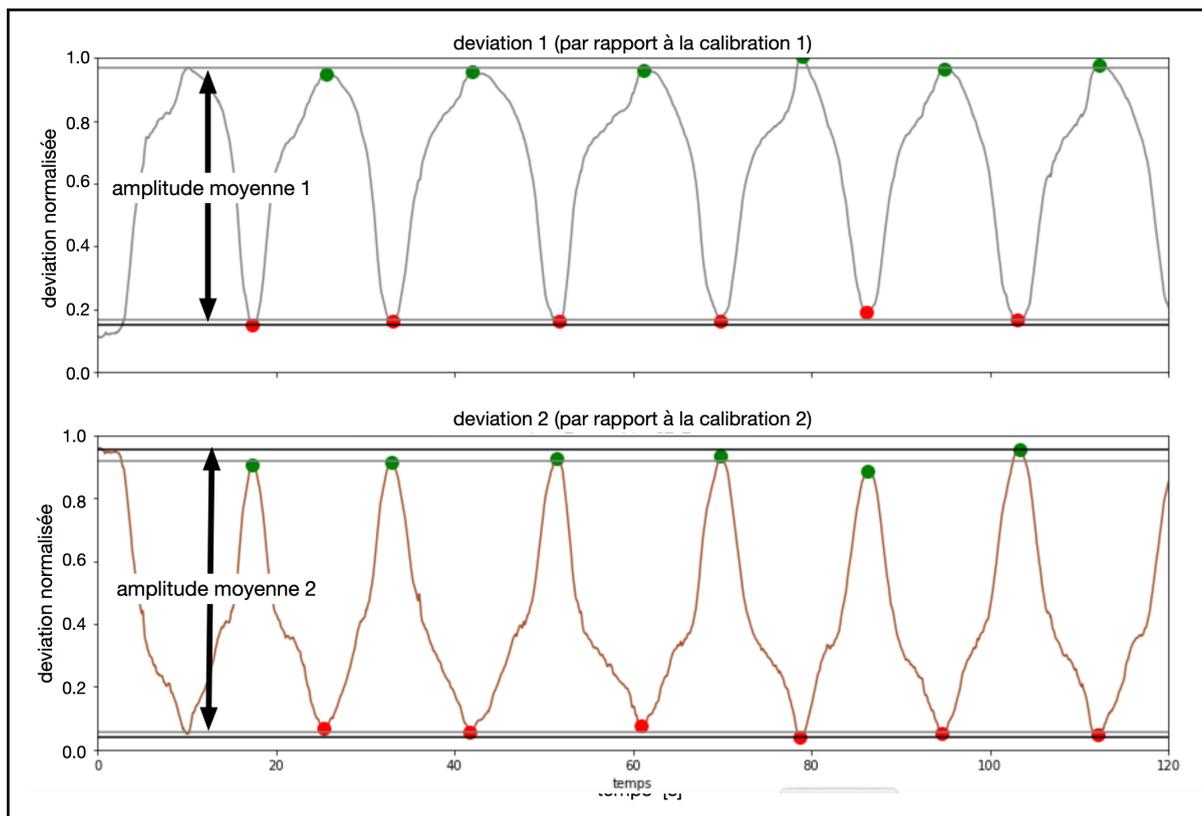


Figure 5.3: Détection des maxima et calcul des amplitudes moyennes relatives à la calibration 1 et calibration 2

2.4.4 Résultats

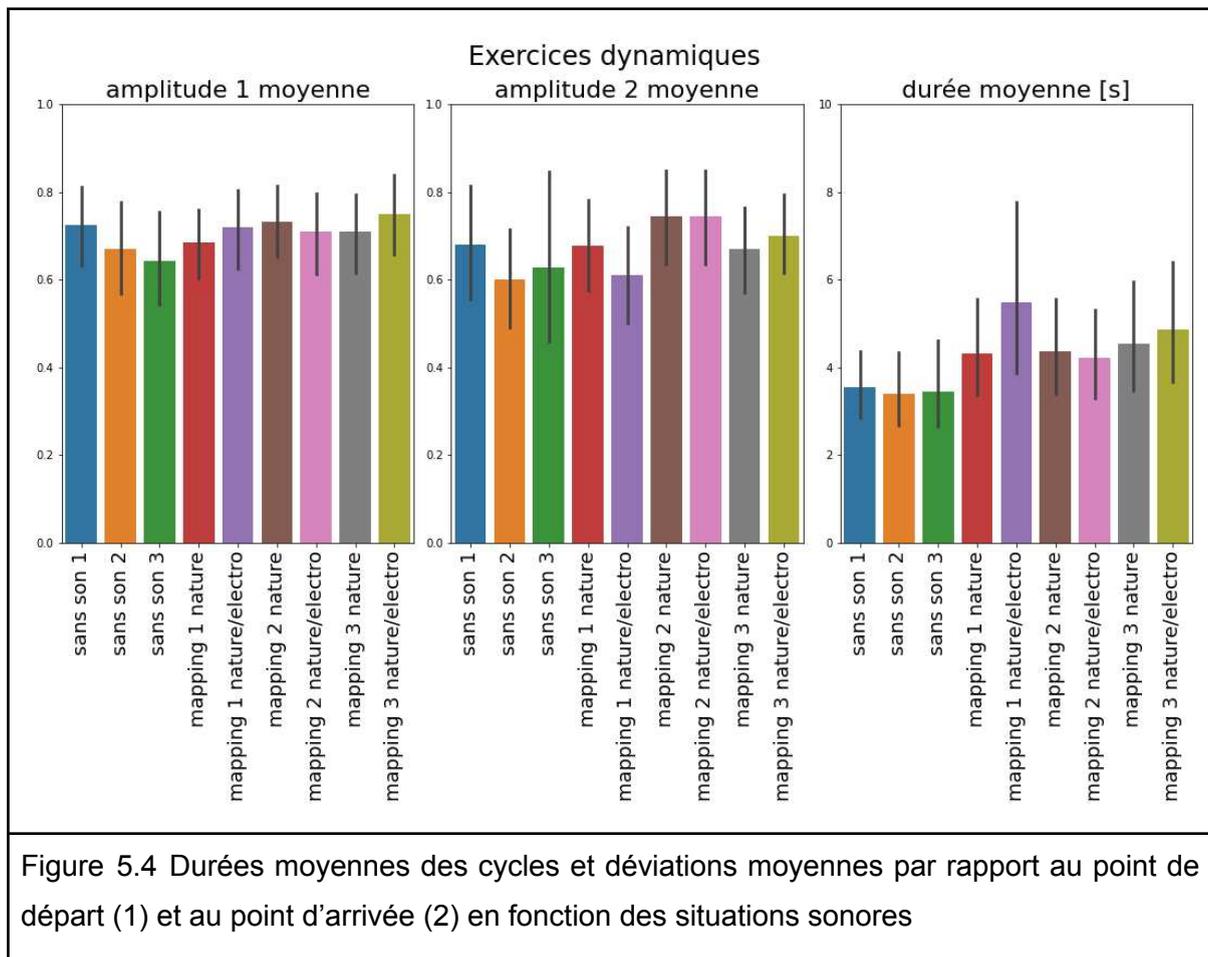
L'absence d'effet d'ordre pour les conditions avec sons a été vérifiée (Figure S5.1, Annexe). Des différences entre les conditions sans son et celles avec un retour sonore sont observables (Figure 5.4).

Aucun effet de l'âge n'est mis en évidence par les modèles linéaires mixtes.

Les différents types de situations sonores relevant d'un même *mapping* ont été regroupés. Aucune différence significative n'est mise en évidence concernant l'amplitude moyenne par rapport au point de départ ("déviation 1") (test de Wilcoxon).

Concernant l'amplitude moyenne pour le point d'arrivée ("déviation 2", correspondant à l'extension maximale) des différences significatives sont mises en évidence entre les conditions sans son et le *mapping 2* ($p=0.004$) et entre le *mapping 1* et le *mapping 2* ($p=0.021$). L'amplitude par rapport au point d'arrivée est plus importante avec le *mapping 2* par rapport à l'amplitude avec le *mapping 1* et la situation sans son. Ainsi, la proximité avec

le point d'arrivée enregistrée comme référence est significativement plus grande avec le *mapping 2* comparativement à celle obtenue avec la situation sans son et le *mapping 1*.



Concernant la durée moyenne des cycles, des différences significatives sont mises en évidence entre la condition sans son et le *mapping 1* ($p < 0.001$), la condition sans son et le *mapping 2* ($p = 0.002$), la condition sans son et le *mapping 3* ($p < 0.001$). Par ailleurs, une différence significative de durée moyenne des cycles est également mise en évidence entre le *mapping 1* et le *mapping 2* ($p = 0.008$).

L'ensemble des résultats sont récapitulés dans la Figure 5.5.

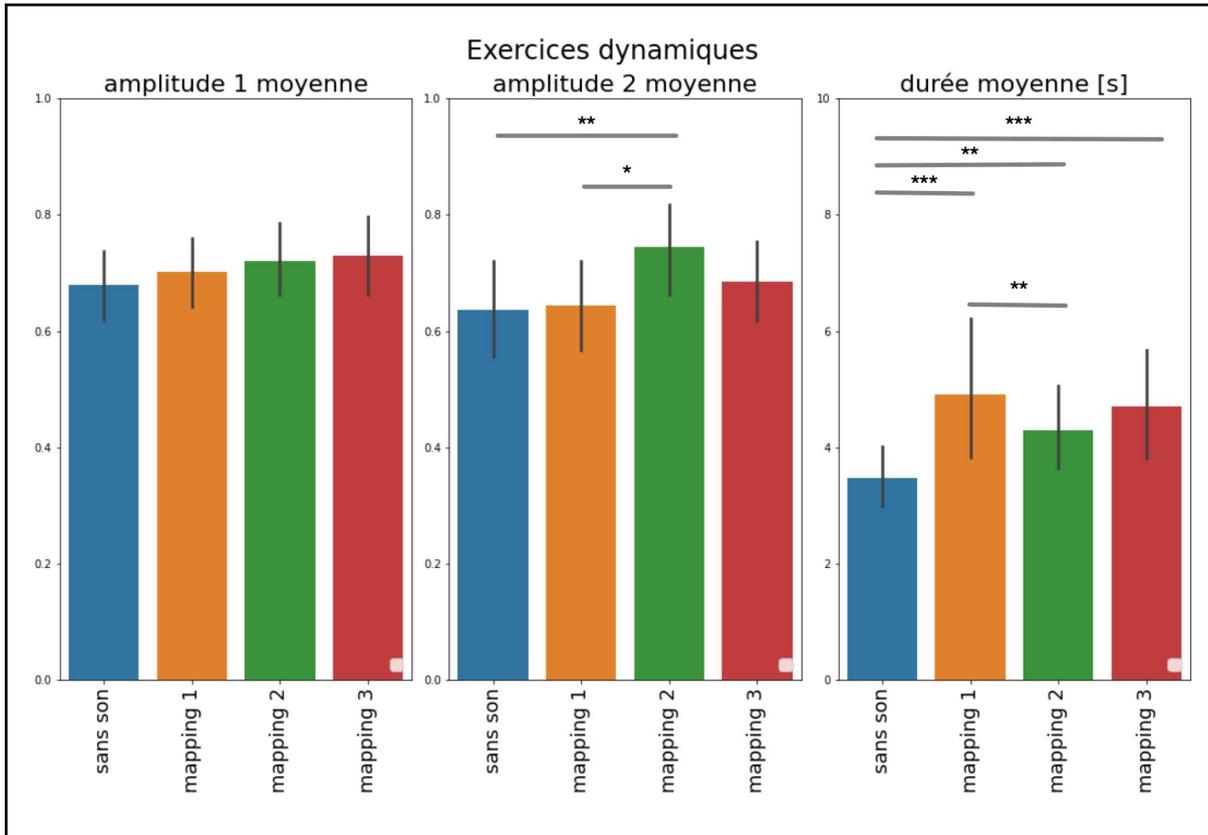
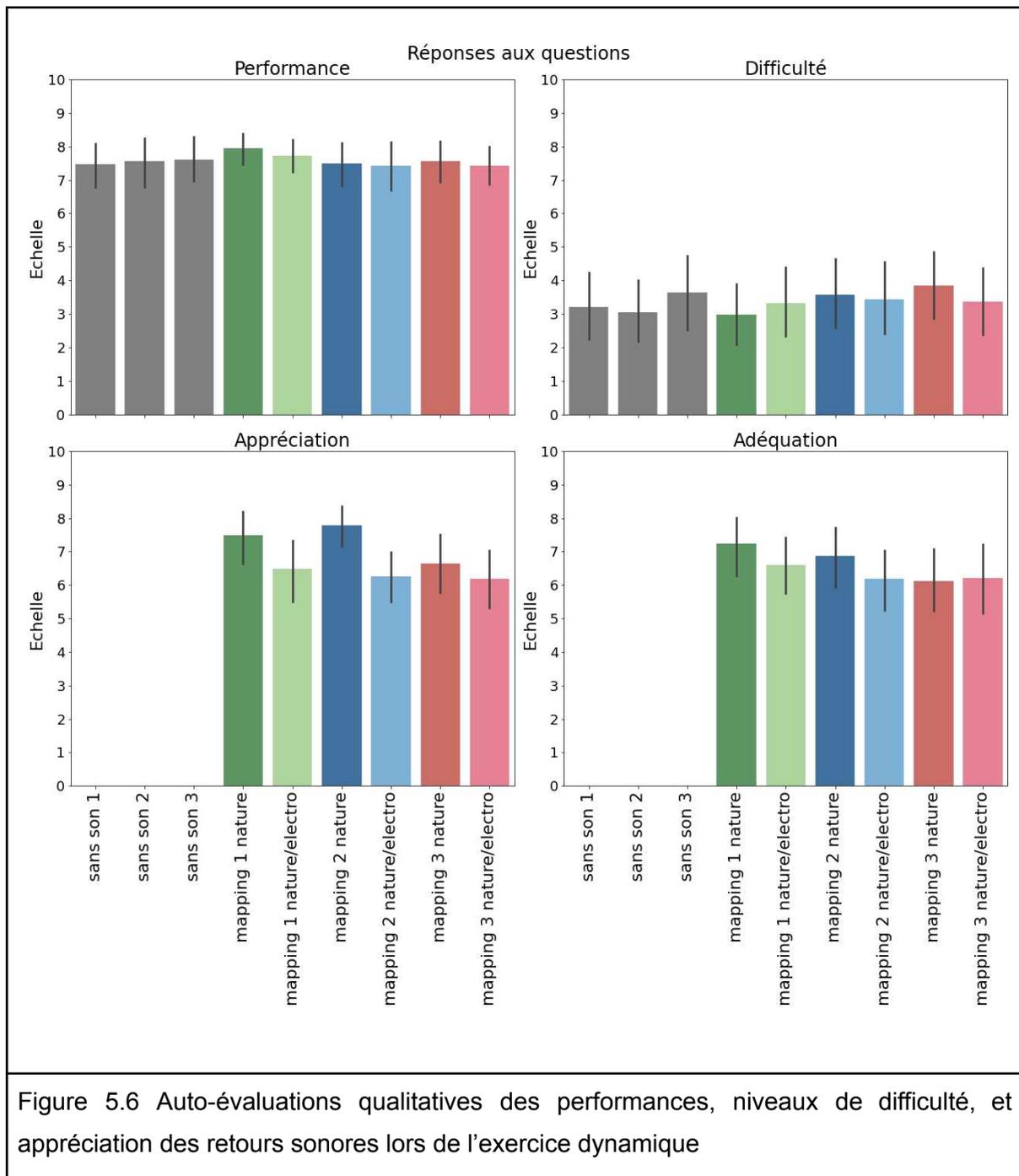


Figure 5.5 Analyse comparative (test Wilcoxon) des amplitudes moyennes d'oscillations et durées moyennes en fonction des modalités d'interactions gestes-sons.

* = $p \leq 0, 05$, ** = $p \leq 0, 01$, *** = $p \leq 0, 001$.

Les résultats des évaluations qualitatives réalisées par les participants à l'issue de chaque exercice sont représentés dans la Figure 5.6.



Concernant les caractéristiques des retours sonores, une préférence pour la combinaison mono-thématique de type nature a été exprimée par les participants, comparativement à des combinaisons bi-thématiques de type nature-électro.

Concernant les *mapping*, les participants ont exprimé une préférence pour les mapping 1 et 2 comparativement au *mapping* 3.

2.4.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus concernant la durée moyenne des cycles en fonction des conditions sonores sont en accord avec ceux mis en évidence dans le cadre de la précédente étude (chapitre 3), à savoir, un allongement significatif de la durée des cycles en présence de retours sonores comparativement à la durée moyenne des cycles d'extension-retrait en absence de son.

Cette étude a de plus permis de mettre en évidence une différence significative de la temporalité de réalisation du geste en fonction de la modalité d'interactions gestes-sons choisie. En effet, les durées moyennes des cycles obtenus avec le *mapping 2* ("Move"), avec lequel le retour sonore n'est perceptible qu'en cas de mise en mouvement et pas à l'arrêt, sont inférieures à celles obtenues avec le *mapping 1* ("All"), assurant la présence permanente d'un retour sonore audible. Ce résultat suggère qu'il est possible d'inciter la mise en mouvement des participants à l'aide du choix de *mapping*.

Par ailleurs, les différences significatives mises en évidence concernant l'amplitude 2 (positions relatives du point d'arrivée en extension maximale) avec le *mapping 2* par rapport aux conditions sans son et au *mapping 1*, suggèrent une meilleure reproductibilité avec cette modalité de couplage par rapport à la référence enregistrée.

Enfin, cette modalité de couplage ayant obtenu le score d'appréciation le plus élevé avec le retour mono-thématique Nature par rapport à l'ensemble des situations proposées, son usage dans un contexte rééducatif pourrait revêtir un intérêt particulier.

2.5 Étude portant sur l'évaluation des effets de la sonification du mouvement lors d'une tâche de maintien de posture

2.5.1 Contexte et objectifs

A notre connaissance les dispositifs de sonification du mouvement ayant fait l'objet d'une évaluation et d'une publication dans le domaine de la rééducation reposent tous sur le suivi d'un geste au cours d'un déplacement. A ce jour, à notre connaissance il n'existe donc pas d'informations concernant l'effet de la sonification du mouvement sur le maintien d'une posture du membre supérieur.

L'objectif principal de cette étude était donc d'évaluer l'effet spécifique de la sonification du mouvement lors d'une tâche statique (maintien de posture), et de le comparer d'une part à une situation sans retour sonore (de manière similaire à la première étude présentée dans le présent manuscrit concernant une tâche de répétition de mouvements), et d'autre part à une situation de diffusion d'un retour sonore indépendant de la qualité de réalisation de la tâche. Cette dernière situation, "*sham*", au cours de laquelle les participants entendent un retour sonore dont le volume ne dépend pas de leur maintien de posture et des oscillations (déviations) par rapport à la référence enregistrée, vise à distinguer l'influence de l'écoute musicale lors de la diffusion d'un extrait sonore, de l'effet lié directement au principe de feedback de la sonification du mouvement.

L'objectif secondaire était d'évaluer l'influence des caractéristiques du retour sonore utilisé (extrait musical versus extrait sonore créé pour le dispositif avec une lecture aléatoire des *layers* le constituant) sur le maintien de posture et l'appréciation des participants.

2.5.2 Protocole

L'exercice consistait à maintenir le bras tendu devant soi, parallèle au sol, en fixant une cible du regard, pendant une durée de deux minutes. Le *setting* était identique à celui proposé pour l'exercice dynamique. Ainsi, les exercices étaient réalisés avec le bras non dominant des participants. Ceux-ci étaient assis sur une chaise pour réaliser cette tâche, et portaient un capteur de mouvement sur leur bras et un capteur de mouvement sur leur avant-bras. Le son était restitué grâce aux hauts-parleurs du dispositif.

Trois conditions sonores étaient proposées pour réaliser cette tâche: sans son, avec un retour sonore continu ne variant pas selon les oscillations de posture du participant (situation

sham), avec un retour sonore continu dont le volume était indexé aux oscillations de posture du participant par rapport à une référence enregistrée avant le début de l'exercice.

Afin d'évaluer l'influence des caractéristiques des retours sonores, deux types de retours sonores ont été utilisés avec chaque participant: un paysage sonore de nature, calme et relaxant, et un extrait musical rythmé et énergique (Duke Ellington, Blue Pepper extrait de Far East of the Blues).

Ainsi, chaque participant a réalisé l'exercice de maintien de posture dans 6 conditions: sans son (à deux reprises), avec le retour sonore de type nature en mode non interactif, avec le retour sonore de type nature en mode interactif, avec l'extrait musical en mode non interactif, et avec l'extrait musical en mode interactif. L'ordre de présentation des six conditions était randomisé pour chaque participant.

Entre chaque exercice de maintien de posture un temps de pause d'une durée de deux minutes minimum était prévu afin de limiter l'influence de la fatigue sur la qualité de réalisation de l'exercice. Pendant ces temps de pause, des données concernant la pratique musicale et les habitudes d'écoute des participants étaient recueillies. De même, des informations concernant d'éventuels troubles auditifs étaient notées, et de brefs exercices rythmiques et d'écoute étaient proposés.

Au début de la séance, les participants étaient informés de l'existence de deux situations distinctes en présence des retours sonores, à savoir, la possibilité que l'extrait diffusé soit dans certains cas indépendant de leur mouvement, et plus exactement de leurs oscillations de posture, et dans d'autre cas dépendant de leur mouvement. Le principe de la sonification du mouvement était présenté et les participants pouvaient expérimenter le dispositif d'interaction avec un extrait musical non utilisé pendant la session d'enregistrements (Roger Reuse, Water).

Dans le cas de l'interactivité entre le son et la posture, les variations de volume sonore étaient indexés à la déviation de posture par rapport à une référence enregistrée pendant 3 secondes de calibration avec une diminution linéaire du volume sonore, comprise entre 15dB (pour une déviation de la posture à partir d'un seuil de 2 degrés par rapport à la référence) et 60dB (lorsque la déviation de posture atteint 30 degrés ou plus par rapport à la référence).

De manière identique à l'évaluation portant sur l'exercice dynamique, au cours des exercices de maintien de posture, les données de mouvements étaient enregistrées.

Après chaque exercice de maintien de posture des auto-évaluations de la performance, du niveau de difficulté de l'exercice, de l'appréciation du retour sonore et de l'adéquation du retour sonore avec l'exercice de maintien de posture étaient complétées.

Enfin, à l'issue de la séance, il était demandé aux participants de préciser quelle était leur situation préférée.

2.5.3 Modalités d'analyse

La sonification proposée est une modulation du volume de la source sonore, qui varie en fonction des angles du bras, en référence aux angles mesurés lors de la calibration (Chapitre 4). Cette variation de volume est déterminée à partir d'une mesure de variations angulaires (somme quadratique pondérée des différences d'angles). La variation de volume, exprimée en décibel, est obtenue en calculant le logarithme de cette variation. Pour cette raison, nous reportons le logarithme de l'Erreur moyenne, en considérant plusieurs plages temporelles: 0 - 1 min, 1 - 2 min, à 2 min (moyenne sur les 10 dernières secondes).

Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide de Python (version 3.7.9). Pour l'analyse statistique, les distributions des données ne suivant pas une loi normale, nous avons utilisé soit des modèles linéaires mixtes, en tenant compte des mesures répétées par chaque participant, soit des tests non-paramétriques (Wilcoxon signed-rank test).

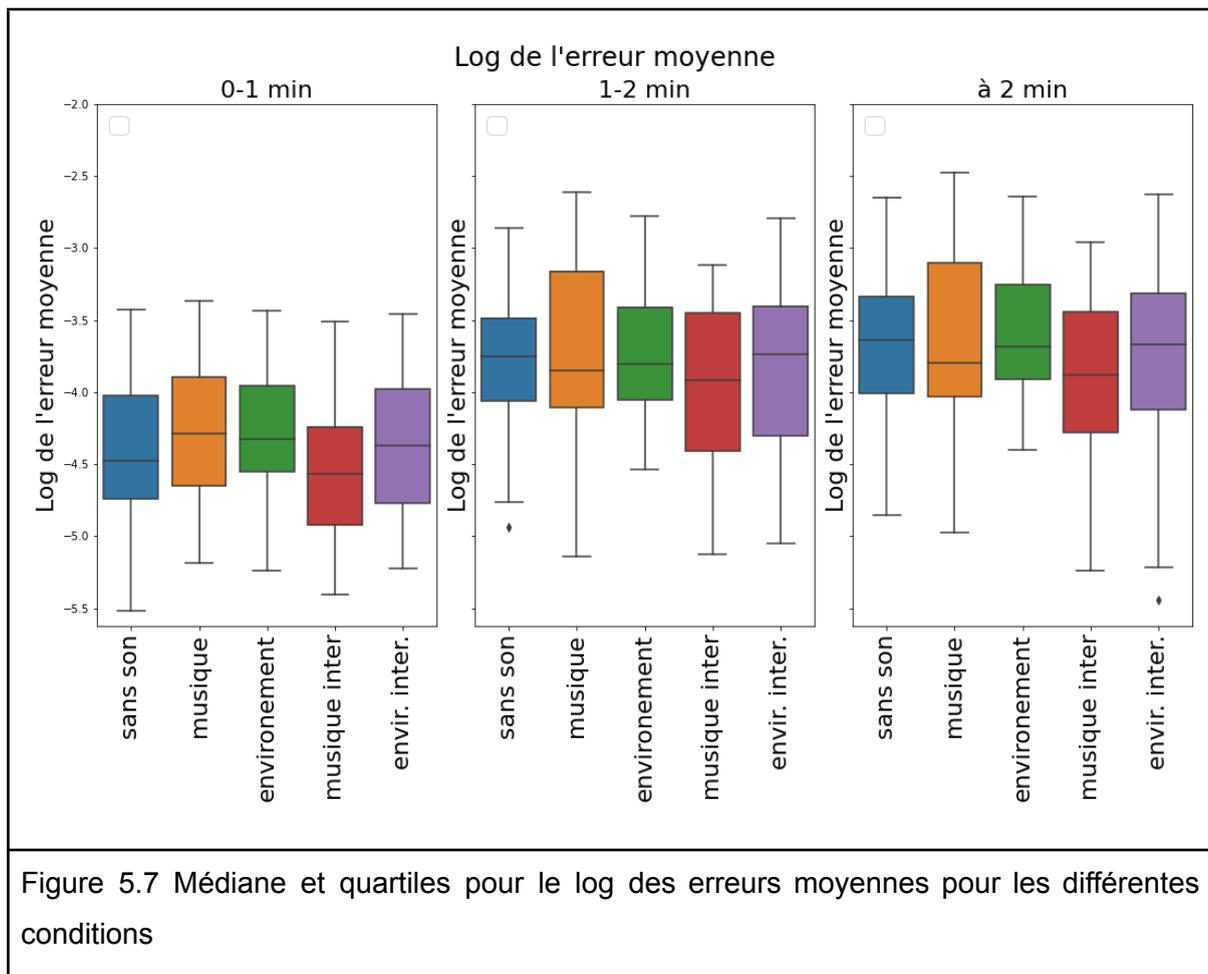
2.5.4 Résultats

Afin d'écartier un possible effet de la fatigue au cours de la séance, l'effet d'ordre a été évalué. Aucune tendance n'a été mise en évidence (Figure S5.2) et l'analyse statistique a confirmé l'absence de différences significatives liées à l'ordre de passation des différentes situations.

L'analyse comparative du logarithme de l'erreur entre les différentes conditions sonores n'a mis en évidence aucune différence significative (modèle linéaire mixte, Figure 5.7).

En revanche, un effet de l'âge des participants a été mis en évidence avec ces modèles, avec une erreur calculée plus importante chez les participants des deux catégories d'âge supérieures à 41 ans comparativement aux participants du groupe de moins de 40 ans ($p < 0.021$).

Cet effet a été confirmé également par une corrélation de Pearson (Figure S5.3 en annexe).



L'analyse des données a ensuite été répétée en comparant les erreurs en fonction de la catégorie d'âge considérée, en regroupant ensemble les retours sonores d'une même condition de passation (sans retour sonore, avec un retour sonore interactif, avec un retour sonore non interactif). Les résultats sont présentés dans la Figure 5.8.

Le test de Wilcoxon réalisé a mis en évidence une différence significative à 2 minutes de l'expérience entre les situations sans retour sonore et avec un retour sonore interactif pour le groupe de participants de 20-40 ans ($p=0.009$). Ainsi, pour cette catégorie de participants le logarithme de l'erreur moyenne est moins important à la fin de l'exercice de maintien de posture avec le retour sonore interactif par rapport à la situation sans retour sonore.

Aucune autre différence statistiquement significative n'a été mise en évidence.

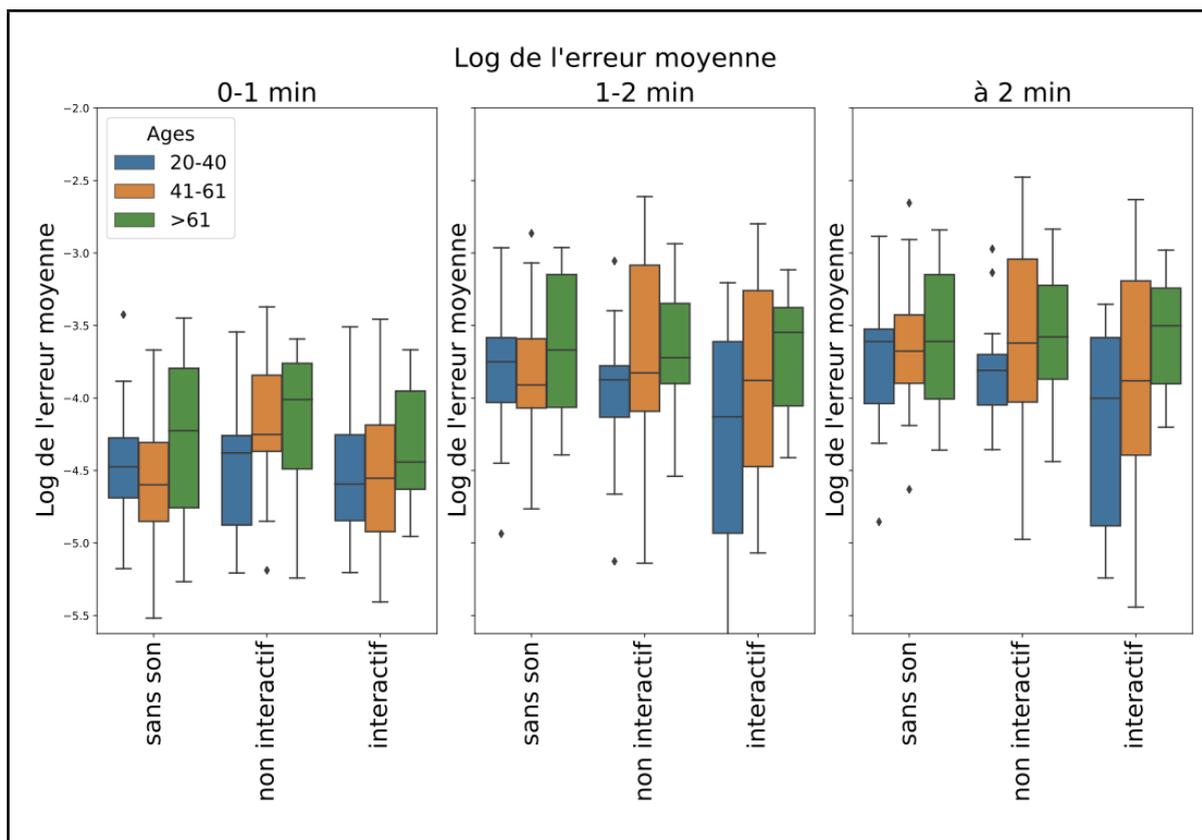
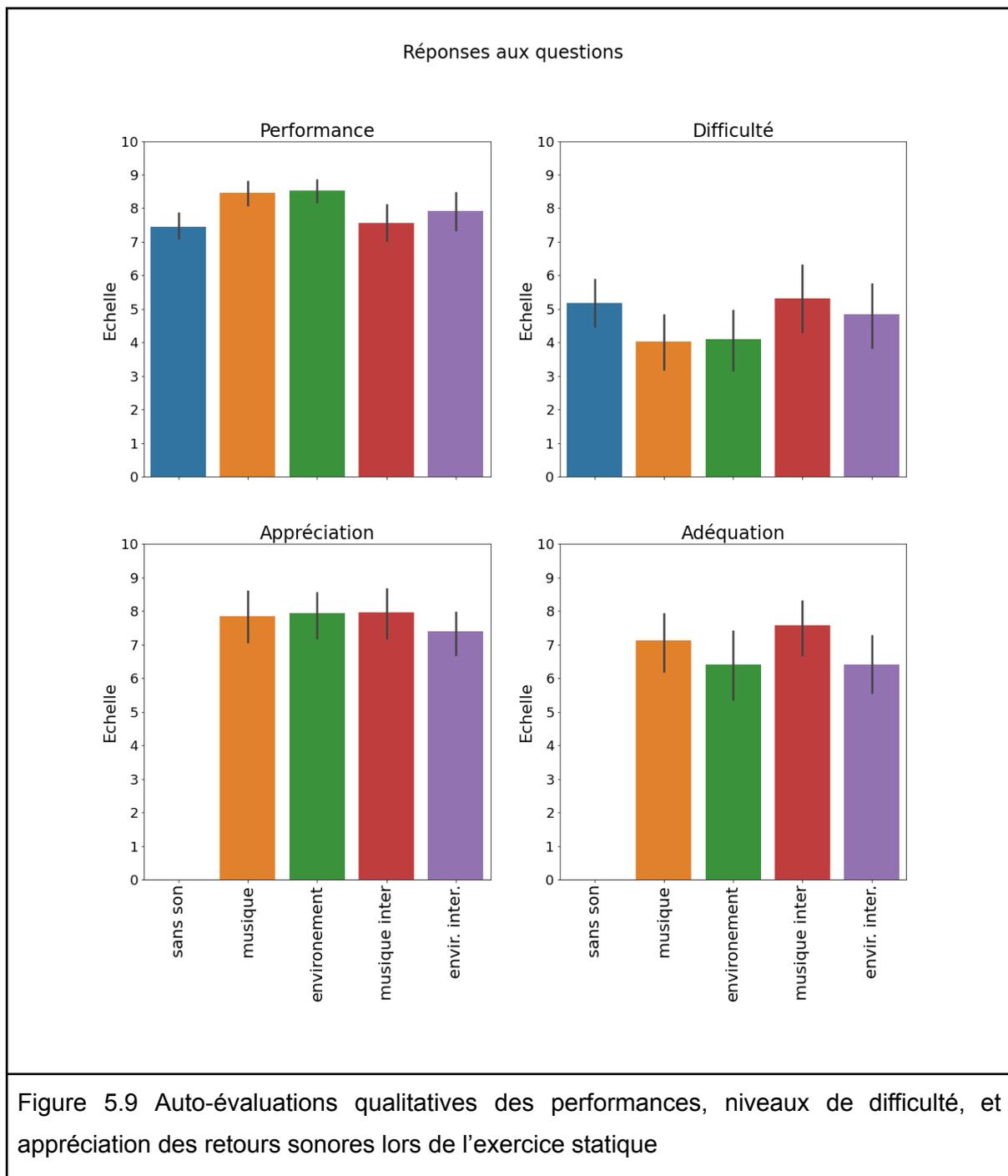


Figure 5.8 Médiane et quartiles pour le log des erreurs moyennes pour les différentes conditions, en groupant les conditions interactive et non-interactive, et en séparant les groupes d'âge.

Les résultats des évaluations qualitatives réalisées par les participants à l'issue de chaque exercice sont représentés dans la Figure 5.10.

Les participants ont majoritairement mentionné avoir préféré réaliser la tâche de maintien de posture en présence d'un retour sonore, et plus particulièrement en présence de l'extrait musical rythmé.

En présence d'un retour sonore dont le volume n'est pas indexé à la déviation de la posture (condition non interactive, "sham") les participants ont perçu la tâche comme moins difficile, et ont jugé leur performance meilleure. Pour autant, concernant l'extrait musical, la condition (interactivité ou non) ne semble pas modifier l'appréciation des participants.



2.5.5 Discussion

La présence d'un retour sonore interactif permet une diminution significative du logarithme de l'erreur moyenne (déviation par rapport à la posture de référence) à 2 minutes d'expérience pour les participants de la catégorie 20-40 ans.

Cette diminution de l'erreur en présence d'un retour sonore interactif n'est pas retrouvée avec les autres catégories de participants.

Face à ce résultat surprenant plusieurs hypothèses peuvent être formulées:

(1) les variations de volume sonore n'ont pas été "perçues" (au regard des logarithmes d'erreurs moyennes mesurées les diminutions de volume étaient en moyenne de 20 dB, aussi par perception il est ici entendu non pas une absence de perception auditive mais l'absence d'attention portée à l'information); (2) le lien entre les variations de volume sonore et la position relative par rapport à la référence n'a pas été compris (3) la position de référence n'a pas été retrouvée malgré la perception des variations de volume sonore et la compréhension de l'association entre le volume sonore et le maintien de la posture.

Dans le cas présent, la modalité de couplage gestes-sons a été orientée par le choix de soutenir le maintien de posture avec un retour sonore en indexant son volume à la référence de position enregistrée, plutôt que de proposer un système basé sur un retour sonore désagréable telle qu'une alarme en cas de déviation. Ainsi, la déviation de posture n'est pas génératrice d'inconfort, néanmoins la limite pourrait donc être que certains participants réalisent la tâche sans prêter attention aux fluctuations de volume sonore.

Afin de déterminer les raisons pour lesquelles les déviations de posture des participants des catégories d'âge supérieures à 41 ans n'ont pas significativement diminuées en présence du retour sonore interactif, des évaluations complémentaires sont nécessaires.

Il pourrait notamment être intéressant de modifier la consigne, en demandant aux participants non pas de "maintenir une posture pendant une durée de deux minutes" mais plutôt de "maintenir le volume sonore de l'extrait musical jusqu'à sa fin en gardant la même position". A l'issue de chaque exercice, il serait également utile de demander aux participants s'ils ont perçu des fluctuations de volume sonore.

Selon les résultats obtenus des modifications de la modalité de couplage pourront être envisagées si nécessaire.

2.6 Conclusion

L'étude menée permet de confirmer les résultats obtenus précédemment concernant l'effet de la présence de retours sonores sur la durée moyenne de cycles de mouvement répétés d'extension du coude, avec un ralentissement du geste en présence des retours sonores.

Par ailleurs, les résultats obtenus suggèrent un effet de la modalité de couplage utilisée sur la durée moyenne des cycles et l'amplitude moyenne d'oscillations par rapport aux points de références enregistrés lors d'une tâche de répétition de geste. Plus précisément, le *mapping* "Move" développé se distingue de la situation sans retour sonore du *mapping* "All" concernant l'amplitude moyenne des oscillations par rapport au point d'arrivée de référence, et concernant la temporalité des cycles (plus lent que lors de la condition sans son, mais plus rapide qu'en présence d'une modalité de sonification n'incitant pas au déplacement).

Par ailleurs, la sonification permet de réduire significativement la déviation d'une posture par rapport à une référence lors des 10 dernières secondes du maintien d'une posture du membre supérieur chez des participants d'âge compris entre 20 et 40 ans comparativement à une situation sans retour sonore.

Des investigations complémentaires doivent être menées afin d'explicitier l'absence de différences significatives entre les conditions sonores pour des participants plus âgés, avec pour objectif d'adapter en conséquence la formulation de la consigne, la modalité de couplage gestes-sons, ou d'envisager de nouvelles modalités de sonification d'une tâche statique.

3. Évaluations thérapeutes

3.1 Contexte et objectifs

Suite à l'évaluation de la fonctionnalité du β prototype auprès d'un petit échantillon d'utilisateurs non experts, une étude a été initiée auprès de rééducateurs de différentes professions afin d'évaluer l'utilisabilité du dispositif dans un contexte réel proche de celui auquel il est destiné.

L'objectif principal est d'évaluer l'utilisabilité du dispositif, ses attributs pragmatiques, définis comme l'ensemble des qualités intrinsèques au produit permettant de réaliser des tâches précises (clarté, efficacité, réactivité), et ses attributs hédoniques, définis comme l'ensemble des qualités permettant à l'utilisateur d'exprimer son identité à travers le dispositif et d'être stimulé lors de l'interaction avec le produit (Hassenzahl, 2003).

Ainsi, les critères de jugement principaux sont les scores attribués aux deux échelles standardisées les plus couramment utilisées dans le domaine de l'expérience utilisateur (User Experience, UX): la version française du questionnaire *System Usability Scale* concernant l'utilisabilité ou acceptabilité du dispositif (F-SUS) (Gronier, 2021), et la version française de l'*Attrakdiff* concernant les attributs pragmatiques et hédoniques du dispositif (Lallemand, 2015).

Le questionnaire F-SUS permet l'attribution de scores compris entre 0 et 100, à l'aide de 10 questions sous forme d'une échelle de Likert en 5 propositions. Plus le score obtenu est élevé, plus le degré d'acceptabilité du système évalué est important. L'acceptabilité d'un système est jugée bonne à partir d'un score de 71,4 sur 100.

Le questionnaire Attrakdiff est quant à lui constitué de 28 items, sous forme d'une échelle de Likert avec 7 propositions (score compris entre -3 et 3 pour chaque item). Les scores aux différents items permettent de définir un score de qualité pragmatique et un score de qualité hédonique, et ainsi de situer le système entre une orientation vers la tâche (qualité pragmatique) et une orientation vers le soi (qualité hédonique), entre système superflu et système désiré.

L'objectif secondaire est de recueillir auprès des thérapeutes des informations plus spécifiques au dispositif conçu, afin de déterminer les avantages et inconvénients qu'ils ont pu remarquer, et envisager d'éventuelles améliorations à prévoir. Pour cela, des entretiens enregistrés par dictaphone sont transcrits et soumis à une analyse thématique.

Par ailleurs, cette étude permettra de compléter les données obtenues concernant la fonctionnalité du dispositif, à l'aide des carnets de bords établis préalablement.

Les questionnaires et l'entretien semi-directif élaborés à l'occasion de ce travail sont présentés en annexes.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Participants

Les critères d'inclusion sont les suivants: Rééducateurs Diplômés d'Etat (kinésithérapeutes, ergothérapeutes, psychomotriciens, et orthophonistes), et neuropsychologues; Travaillant avec des patients adultes présentant des séquelles notamment motrices de lésions cérébrales acquise ou ayant une expérience préalable supérieure à 6 mois avec cette population; Volontaires pour participer à l'évaluation du dispositif développé dans la perspective d'une utilisation en autonomie supervisée par des patients adultes présentant des séquelles motrices aux membres supérieurs suite à une lésion cérébrale acquise.

Les critères de non inclusion sont les suivants: Epilepsie audiogène ; Port d'un pacemaker, conformément aux recommandations d'usage de ces appareils sensibles aux champs électromagnétiques tel que le WIFI; Refus de participer.

Le critère d'exclusion de l'étude est le retrait du consentement.

3.2.2 Déroulement de l'évaluation

Les formalités initiales sont identiques à celles mises en œuvre pour les tests de fonctionnalité du β prototype. Après réception de la note d'information et transmission d'un accord préalable, les rééducateurs volontaires pour participer à l'étude sont conviés individuellement à une visite d'inclusion. Lors de la visite d'inclusion l'ensemble des informations utiles sont récapitulées et des réponses sont apportées aux questionnements des participants avant la signature du consentement de participation. Suite au recueil écrit du consentement, une présentation détaillée du dispositif et une démonstration de son utilisation sont effectuées, avant de proposer une prise en main par le participant. A l'issue de cette visite un carnet de bord à remplir quotidiennement est remis aux participants avec le dispositif.

Les participants ont pour consigne de réaliser quotidiennement des séances de sonification du mouvement pendant une durée d'une semaine. Au cours des séances ils choisissent librement les exercices, leur nombre, durée, ordre, niveaux, et les retours sonores associés,

avec pour seule instruction d'effectuer à chaque séance au minimum une fois chaque exercice avec chaque niveau de difficulté (soit un minimum de 9 exercices par séance).

A l'issue de la semaine, les participants restituent la boîte lors d'une visite de fin de participation. Au cours de cette visite, les questionnaires et l'entretien sont réalisés.

Afin de garantir une certaine neutralité, la séance de démonstration et les questionnaires et entretiens sont réalisés avec une ingénieure n'ayant pas participé au processus de conception du dispositif.

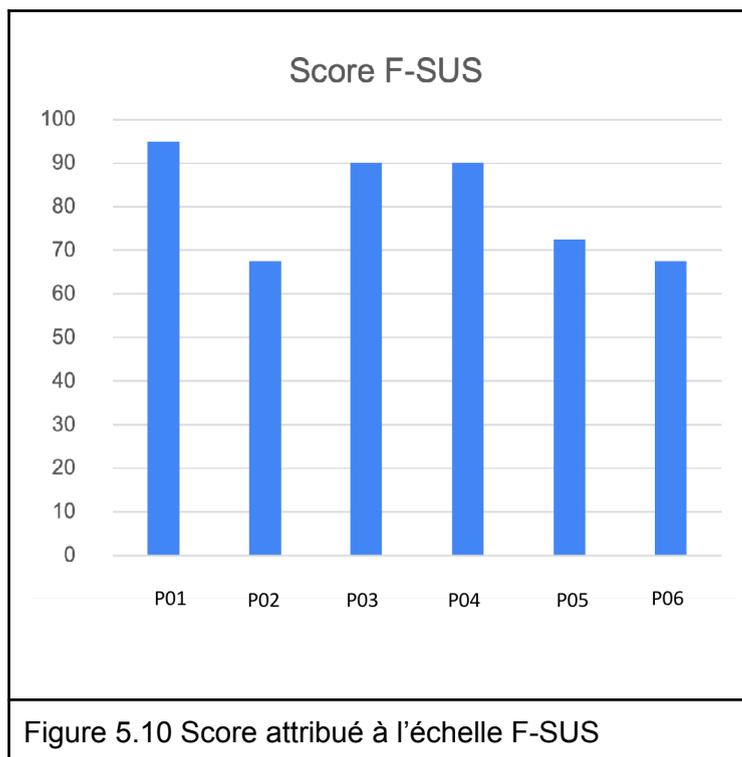
3.2.3 Résultats préliminaires

A ce jour, 6 rééducateurs ont été inclus, dont les profils sont récapitulés dans le tableau 5.III.

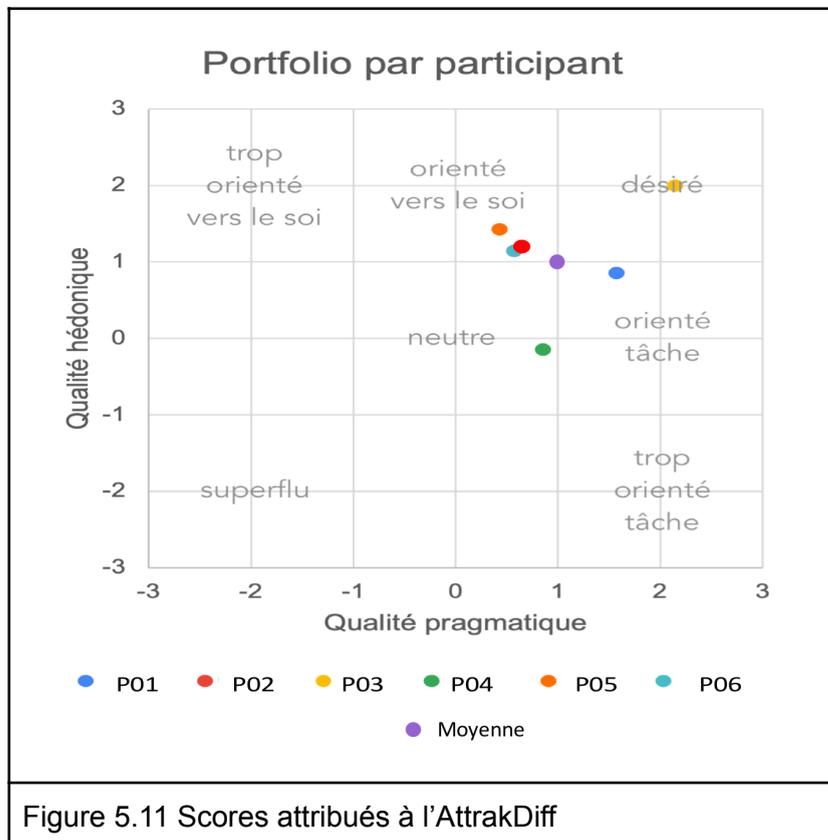
Participant	Genre	Âge	Profession	Lieu exercice	Nombre d'années d'exercice	Rapport à la musique	Rapport aux nouvelles technologies
01	Femme	25 ans	Kinésithérapeute	Libéral	2 ans	Ecoute quotidienne et pratique instrumentale	Appétence
02	Femme	25 ans	Psychomotricien	Libéral	2 ans	Ecoute quotidienne et pratique vocale	Réserve
03	Femme	26 ans	Kinésithérapeute	Libéral	2 ans	Ecoute quotidienne	Utilisatrice
04	Homme	26 ans	Psychomotricien	Centre rééducation	1 an	Ecoute quotidienne	Réserve
05	Femme	24 ans	Ergothérapeute	Hôpital	2 ans	Ecoute régulière et pratique instrumentale	Utilisatrice
06	Homme	25 ans	Ergothérapeute	Hôpital	3 ans	Ecoute régulière	Appétence

Tableau 5.III Tableau récapitulatif rééducateurs volontaires

Les scores attribués à l'échelle F-SUS par les participants sont compris entre 67,5 et 90 sur 100, avec une moyenne de 78,75 correspondant ainsi à une bonne acceptabilité.



Les scores attribués à l'échelle AttrakDiff permettent de définir une orientation équilibrée entre les qualités pragmatiques et hédoniques. Le dispositif n'est pas jugé superflu, trop orienté tâche ou trop orienté soi. La moyenne des scores situe le dispositif à la lisière entre zone de neutralité et zone dite désirée.



Les entretiens réalisés sont en cours d'analyse.

3.2.4 Discussion

Les premiers résultats obtenus avec les thérapeutes concernant l'utilisabilité, l'acceptabilité et l'attractivité du dispositif sont très encourageants.

Toutefois, l'effectif de thérapeutes interrogés est très restreint et nécessite d'être complétés. Par ailleurs, si une diversité équilibrée de professions a pu être représentée parmi les participants, ceux-ci appartiennent tous à une même catégorie d'âge, inférieure à 30 ans, susceptible d'influencer le degré d'acceptabilité attribué à de nouveaux outils technologiques.

La poursuite de l'étude avec le recrutement d'autres participants d'âges variés est prévue.

Par ailleurs, l'analyse des entretiens permettra d'apporter des précisions sur les points forts et limites observés par les thérapeutes.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Le premier objectif de cette thèse était d'évaluer l'effet de différents types de retours sonores (caractéristiques sonores et modalités d'interactions gestes-sons) sur deux tâches gestuelles : un mouvement d'antépulsion (extension du coude), et un maintien postural, avec des participants de différents profils.

La première étude, menée avec 30 participants adultes (15 patients présentant des séquelles motrices au membre supérieur suite à une lésion cérébrale acquise, et 15 participants sans troubles moteurs) concernant une tâche de répétition de gestes d'extension du coude, a permis de mettre en évidence à l'aide d'une méthodologie mixte un effet de la sonification du mouvement sur la temporalité de réalisation des gestes, et sur le vécu des participants. La comparaison des durées moyennes des cycles d'extension-retrait de l'avant-bras en fonction de la condition sonore met en évidence une augmentation significative de la durée des cycles en présence de retours sonores interactifs par rapport à la situation sans son. La présence de retours sonores interactifs est une situation préférée par les participants comparativement à une situation sans retour sonore. Outre une fonction de repère, notamment temporel, la présence de retours sonores interactifs crée une situation d'expérimentation du geste inédite pour les participants. Au cours de cette interaction gestes-sons leurs ressentis varient en fonction des caractéristiques spécifiques à chaque type de retour sonore. Ainsi, des retours sonores environnementaux (paysages sonores) et musicaux sont préférés par les participants par rapport à des retours reposant sur l'évolution d'un paramètre sonore isolé (telle que la hauteur ou le tempo) bien que ces derniers semblent plus simples à appréhender.

La deuxième étude, constituée de deux tâches réalisées avec 24 participants ne présentant pas de troubles moteurs, a permis de confirmer les résultats obtenus précédemment concernant l'effet de la sonification sur la temporalité de réalisation de gestes répétés d'extension du coude. En présence de retours sonores les durées moyennes des cycles répétés d'extension-retrait du membre supérieur (antépulsion) sont significativement augmentées comparativement à une situation sans retour sonore, et ce quelque soit la modalité de couplage considérée. De plus, les résultats obtenus suggèrent que la modalité d'interaction gestes-sons est susceptible d'influencer cette temporalité. La comparaison de la durée moyenne des cycles en fonction de la modalité de couplage choisie met en évidence une différence significative entre deux modalités d'interactions gestes-sons: en

présence d'une modalité de couplage incitant à la mise en mouvement, la durée moyenne des cycles est significativement inférieure à celle obtenue avec une modalité où le retour sonore est présent constamment.

Par ailleurs, dans certaines conditions, la modalité d'interaction gestes-sons pourrait également être susceptible de limiter la déviation par rapport à une référence, lors d'un geste répété, ou d'une tâche de maintien de posture. Néanmoins, s'agissant d'une tâche de maintien de posture, cet effet significatif de la sonification du mouvement par rapport à une situation sans retour sonore ne semble pas concerner tous les profils de participants, et intervenir seulement après un certain délai.

Ainsi, les deux premières études réalisées dans le cadre de ce travail de thèse contribuent aux réflexions actuelles concernant l'effet de la sonification du mouvement utilisée dans un contexte à visée rééducative, et plus particulièrement concernant le design des modalités d'interaction gestes-sons. A ce jour, à notre connaissance, aucune étude comparative de différents types de retours sonores et modalités d'interaction gestes-sons n'avait été menée avec une méthodologie mixte pour des tâches motrices du membre supérieur en lien avec des exercices de rééducation adaptés à des troubles survenant après une lésion cérébrale acquise. De surcroît, les tâches de maintien de posture du membre supérieur à visée rééducative n'avaient pas fait l'objet de modalités de sonification jusqu'à présent.

Cependant, outre des effectifs assez restreints, les limites des études présentées doivent être considérées.

En premier lieu, la deuxième étude a été menée avec des participants ne présentant pas de séquelles motrices consécutives d'une lésion cérébrale acquise, et doit donc être réitérée avec la population d'intérêt.

Par ailleurs, ces deux études portent sur l'effet immédiat de la sonification du mouvement. Les phénomènes liés à l'apprentissage ne sont donc pas étudiés. Dans cette perspective, l'évaluation de l'effet de la sonification du mouvement avec des échelles fonctionnelles habituellement utilisées ne semblaient pas adéquates. Ainsi, même si des effets significatifs de la présence de retours sonores interactifs sur les gestes ont été mis en évidence, des investigations complémentaires reposant sur un usage répété des différentes modalités de sonification du mouvement sont nécessaires afin d'envisager l'étude d'éventuels effets fonctionnels.

Si des pistes de réflexions ont été proposées, les études réalisées, portant sur les comportements moteurs et les propos des participants, ne permettent pas d'établir des modèles explicatifs des mécanismes sous-jacents impliqués afin d'explicitier les différences de temporalité et de vécu des participants mises en évidence. Des questionnements

concernant les processus attentionnels mobilisés, et d'éventuelles spécificités du traitement perceptif auditif et sensori-moteur dans le cas de la sonification du mouvement nécessitent des investigations. Ces investigations sont notamment nécessaires au regard de la variabilité inter-subjective des comportements moteurs observés. Cette variabilité amène notamment à s'interroger concernant le choix des méthodologies d'études adaptées. Si la calibration de références individuelles et le recours à certains modèles statistiques permettent une prise en considération des différences individuelles dans les analyses de groupe, il pourrait être intéressant d'envisager des méthodologies de cas uniques (Single Case Experimental Design, SCED) (Krasny-Pacini, 2018), dans lesquelles chaque individu est son propre contrôle, pour évaluer les effets de la sonification du mouvement. Concernant les aspects méthodologiques, comme évoqué dans la discussion de l'article présenté dans le chapitre 3, l'évaluation des effets de la sonification du mouvement du membre supérieur convoque des questionnements sur l'adaptation des formulations de consignes et instructions données aux participants. En effet, s'agissant de mouvements sous contrôle moteur volontaire, l'évaluation de l'effet implicite ou subconscient de retours sonores interactifs sur les gestes impose des précautions quant aux consignes verbales transmises aux participants.

Par ailleurs, des investigations doivent être menées concernant l'exercice memory, qui n'a pas fait l'objet d'une évaluation spécifique contrairement aux deux autres types d'exercices. Cet exercice ludique ouvre de nombreuses perspectives de réflexions concernant la mobilisation des ressources attentionnelles et la défocalisation du geste.

Le deuxième objectif était de définir les critères de conception et de sélectionner les solutions adaptées pour la création d'un dispositif de sonification du mouvement répondant aux caractéristiques et besoins de patients présentant des séquelles motrices aux membres supérieurs suite à une lésion cérébrale acquise, dans la perspective d'un usage en autonomie supervisée.

A partir des 5 critères sélectionnés (sécurité, fiabilité, flexibilité, simplicité et attractivité) les différentes étapes du processus de co-conception centré utilisateurs mises en œuvre avec des experts de plusieurs domaines ont permis la création d'un dispositif de sonification du mouvement original par le choix de s'adresser aux binômes patients-thérapeutes dans la perspective d'un usage en autonomie supervisée pour l'accompagnement au long cours de la rééducation du membre supérieur après une lésion cérébrale acquise.

Le dispositif conçu est fonctionnel, et son architecture en 3 strates (socle robuste, interface intermédiaire de réglages des paramètres, et interface graphique assurant une navigation facilitée) permet de remplir les critères fixés.

La limite principale du processus de conception mis en œuvre réside dans la définition par des tiers des critères permettant de répondre aux besoins d'une partie des utilisateurs, à savoir les patients, plutôt qu'une implication directe de ceux-ci. Cette limite a toutefois été prise en considération au cours du processus, et a orienté vers le choix de maximiser la flexibilité du dispositif. Ainsi, l'avantage principal du dispositif créé réside dans son adaptabilité. L'un des défis majeurs relevés a été de formuler des propositions, nécessitant de fixer certains paramètres, tout en assurant le maximum de flexibilité afin d'envisager des ajustements spécifiques à chaque contexte individuel.

Outre sa fonction d'outil d'accompagnement de la rééducation de patients adultes présentant des séquelles de lésions cérébrales acquises, le dispositif, polymorphe, peut également revêtir une fonction d'outil d'expérimentations afin de mener des études fondamentales sur la sonification du mouvement à partir des exercices développés.

Le troisième objectif était d'initier une évaluation du dispositif conçu, afin de disposer d'éléments formels permettant d'envisager une étude clinique à grande échelle.

Des évaluations du dispositif sont actuellement menées. Les premiers résultats obtenus mettent en évidence sa fonctionnalité, son utilisabilité, et son attractivité. Très encourageants, ceux-ci incitent à poursuivre les investigations et constituent l'étape préalable indispensable pour envisager une étude incluant des patients. Peu onéreux, la duplication en 10 exemplaires du dispositif permet notamment d'envisager des études longitudinales.

L'enjeu futur concerne l'évaluation de l'usage effectif du dispositif en pratique courante.

En effet, si dans un cadre expérimental les qualités d'un dispositif peuvent être mises en lumière, de nombreux freins peuvent ensuite faire obstacle à son usage réel dans la pratique quotidienne.

Les perspectives à court terme sont donc la poursuite de l'étude d'utilisabilité avec les thérapeutes, et l'élaboration d'un protocole de recherche clinique qui sera soumis à un Comité de Protection des Personnes afin d'évaluer l'utilisabilité du dispositif avec des patients.

Par ailleurs, un article est en préparation pour présenter la deuxième étude réalisée.

Un troisième article sera rédigé pour présenter le processus de conception et les résultats des évaluations du dispositif avec les thérapeutes.

CONCLUSION

L'accomplissement de ce travail est le fruit d'ajustements, dans une recherche d'équilibre permettant de conjuguer réel, symbolique et imaginaire, à travers les 3 domaines réunis: santé, art et sciences.

L'interdisciplinarité, rencontre et fusion entre des disciplines différentes portées par l'expertise de représentants, suppose le dépassement ou le contournement d'obstacles sémantiques reflétant des représentations du monde, à la fois issues et déterminants des perceptions subjectives.

Le dispositif créé, sujet à des remodelages futurs, porte ainsi l'empreinte de ces rencontres.

Parmi les enjeux convoqués par la conception de nouveaux outils technologiques pour la rééducation après une lésion cérébrale acquise, et plus généralement pour la santé, les visées implicites se doivent d'être questionnées.

En effet, si les incitations sont nombreuses: utilité apparente, curiosité intellectuelle, attrait pour la nouveauté, finalité socialement valorisée, soutiens financiers ciblés, avant toute initiative il est absolument nécessaire d'explicitier les besoins réels auxquels les dispositifs créés sont susceptibles de répondre: besoin normatif d'autonomie ? Besoin sociétal de réduire la charge de la dépendance (tant financièrement qu'humainement) ? Besoin partagé par les individus directement concerné par cette technologie (déclaré ou implicite, et répondant à quels modèles et représentations) ?

Afin d'assurer l'accès à une "autonomie éclairée" face à ces dispositifs dédiés à l'autonomie, quelles alternatives propose-t-on et quel accompagnement décisionnel prévoit-on ?

Au-delà de potentiels bénéfiques fonctionnels ou motivationnels, l'intérêt des dispositifs de sonification du mouvement, adaptés à un contexte d'usage en rééducation, peut être la situation d'expérimentation inédite du mouvement qu'ils impliquent. En effet, plutôt que d'attribuer une visée fonctionnelle aux gestes, nécessairement recherchée dans le cadre rééducatif, ces dispositifs, qui tendent de plus en plus vers la musification du mouvement, ouvrent la perspective d'une visée esthétique ou ludique du geste, adaptée à la capacité individuelle instantanée. En offrant une exploration nouvelle du corps-instrument, et en décentrant la finalité du geste de la fonctionnalité vers le plaisir, ils pourraient ainsi être susceptibles de venir soutenir le processus de réappropriation identitaire en jeu suite à une lésion cérébrale acquise.

BIBLIOGRAPHIE

Abenavoli, L. (2017). Le son plastique : Empreindre le flux et l'inouï : Sonification et audification dans l'art de l'installation. 308.

Aho, K., Harmsen, P., Hatano, S., Marquardsen, J., Smirnov, V.E., & Strasser, T. (1980). Cerebrovascular disease in the community : Results of a WHO Collaborative Study. *Bulletin of the World Health Organization*, 58 (1), 113-130.

Allain, S., Naouri, D., de Peretti, C. (2022). En France, les AVC sont plus fréquents, plus graves et moins souvent pris en charge en unité spécialisée pour les personnes les plus modestes. DREES.

Altenmüller, E., Marco-Pallares, J., Münte, T.F., Schneider, S. (2009) Neural Reorganization Underlies Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1):395-405.

Altenmüller, E., Schlaug, G. (2015) Apollo's gift. In: *Progress in Brain Research*. Elsevier, 237-52. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079612314000302>

Amengual, J.L., Rojo, N., Veciana de las Heras, M., Marco-Pallarés, J., Grau-Sánchez, J., Schneider, S., et al. (2013) Sensorimotor Plasticity after Music-Supported Therapy in Chronic Stroke Patients Revealed by Transcranial Magnetic Stimulation. *Balasubramaniam R*, éditeur. PLoS ONE, 8(4):e61883.

Annoni, J.M., & Colombo, F. (2011). [Return to work after brain lesions : Cognitive and behavioral factors]. *Revue médicale suisse*, 7(293), 944-947.

Arias, P., & Cudeiro, J. (2010). Effect of Rhythmic Auditory Stimulation on Gait in Parkinsonian Patients with and without Freezing of Gait. *PLoS ONE*, 5(3), e9675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009675>

Avanzini, F., Spagnol, S., Götzen, A., & Roda, A. (2013). Designing interactive sound for motor rehabilitation tasks. In Serafin, S., Franinovic, K, *Sonic Interaction Design*. MIT Press, Cambridge. Chapter 12, 273-283.

Ayerbe, L., Ayis, S., Crichton, S., Wolfe, C.D.A., & Rudd, A.G. (2014). The long-term outcomes of depression up to 10 years after stroke; the South London Stroke Register. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 85(5), 514-521. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2013-306448>

Azouvi, P., Vallat-Azouvi, C., Couillet, J., & Pradat-Diehl, P. (2009). Traitement des troubles dysexécutifs et attentionnels. *Revue de neuropsychologie*, 1(1), 71. <https://doi.org/10.3917/rne.011.0071>

Azouvi, P. (2017). Évaluation clinique et écologique de la négligence spatiale unilatérale. In M. Roussel, X. de Boissezon, & O. Godefroy, *Troubles neurocognitifs vasculaires et post-AVC: de l'évaluation à la prise en charge*. De Boeck Supérieur.

Baker, F., Tamplin, J., & Kennelly, J. (2006). Music therapy methods in neurorehabilitation : A clinician's manual. J. Kingsley Publishers.

Barbay, M., Diouf, M., Roussel, M., Godefroy, O., & GRECOGVASC study group. (2018). Systematic Review and Meta-Analysis of Prevalence in Post-Stroke Neurocognitive Disorders in Hospital-Based Studies. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 46(5-6), 322-334. <https://doi.org/10.1159/000492920>

Bauchet, L. (2018). Épidémiologie des tumeurs cérébrales primitives. *La Lettre du Neurologue*, MISE AU POINT, Vol XXII, 5, 124-128.

Baumard, J., & Le Gall, D. (2021). The challenge of apraxia : Toward an operational definition? *Cortex*, 141, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.04.001>

Bayen, É., Jourdan, C., Azouvi, P., Weiss, J.-J., & Pradat-Diehl, P. (2012). Prise en charge après lésion cérébrale acquise de type traumatisme crânien. *L'information psychiatrique*, 88(5), 331. <https://doi.org/10.3917/inpsy.8805.0331>

Béjot, Y. (2011). Infarctus cérébral et plasticité : Focus sur le BDNF. 144.

Berner, K., Cockcroft, J., Morris, L.D., Louw, Q. (2020) Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 24(4):251-60.

Bernhardt, J., Hayward, K.S., Kwakkel, G., Ward, N.S., Wolf, S.L., Borschmann, K., Krakauer, J.W., Boyd, L.A., Carmichael, S.T., Corbett, D., & Cramer, S.C. (2017). Agreed definitions and a shared vision for new standards in stroke recovery research : The Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable taskforce. *International Journal of Stroke*, 12(5), 444-450. <https://doi.org/10.1177/1747493017711816>

Bertrand-Gauvin, C., Faucher, L., Bocti, C., Gagnon, M.-J., & Joanne, Y. (2014). Cognition sociale et accident vasculaire cérébral : Perspective neuropsychologique. *Revue de neuropsychologie*, 6(2), 99. <https://doi.org/10.3917/rne.062.0099>

Bevilacqua, F., Guédy, F., Schnell, N., Fléty, E., Leroy, N. (2007) Wireless sensor interface and gesture-follower for music pedagogy. *Proceedings of the 7th International Conference on New Interfaces for Musical Expression - NIME '07*, 124. <https://doi.org/10.1145/1279740.1279762>

Bevilacqua, F., Zamborlin, B., Sypniewski, A., Schnell, N., Guédy, F., Rasamimanana, N. (2010) Continuous Realtime Gesture Following and Recognition. In: Kopp S, Wachsmuth I, éditeurs. *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 73-84. (Hutchison D, Kanade T, Kittler J, Kleinberg JM, Mattern F, Mitchell JC, et al. *Lecture Notes in Computer Science*; vol. 5934). http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12553-9_7

Bevilacqua, F., Boyer, E.O., Françoise, J., Houix, O., Susini, P., Roby-Brami, A., & Hanneton, S. (2016). Sensori-Motor Learning with Movement Sonification : Perspectives from Recent

Billot, M. M. (2013). La réadaptation des victimes d'anoxie cérébrale n'est pas une utopie ! Réflexion, autour d'un cas, sur la mise en place d'un outil neuropsychologique adapté. *Journal de Réadaptation Médicale : Pratique et Formation en Médecine Physique et de Réadaptation*, 33(1), 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.jrm.2013.01.001>

Bobin, M. (2018). *Étude et conception d'objets de rééducation instrumentés pour le suivi de l'activité motrice des membres supérieurs des patients après un AVC*. Université Paris Saclay.

Bonan, I., Yelnik, A., Laffont, I., Vitte, E., & Freyss, G. (1996). Sélection des afférences sensorielles dans l'équilibration de l'hémiplégique après accident vasculaire cérébral. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 39(3), 157-163. [https://doi.org/10.1016/0168-6054\(96\)80221-2](https://doi.org/10.1016/0168-6054(96)80221-2)

Bonnyaud, C., & Roche, N. (2017). *Livret d'auto-rééducation pour les personnes hémiplégiques*. Fondation Garches_Allergan.

Bourgeois, A.-L., Guay, V., Laroudie, F., Marsal, C., Thevenin-Lemoine, E., & Tommy-Martin, C. (2010). Informations et programme d'exercices dans les suites d'un AVC. CEERRF.

Boyer, E.O., Bevilacqua, F., Guigon, E., Hanneton, S., & Roby-Brami, A. (2020). Modulation of ellipses drawing by sonification. *Experimental Brain Research*, 238(4), 1011-1024. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05770-6>

Brackelaire, J.L., Frankard, A.-C., Janssen, C., & Tortolano, S. (2011). *Objet transitionnel et objet-lien : Regards croisés*. Harmattan-Academia.

Braun, V., Clarke, V. (2006) Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2):77-101.

Brazil, E., & Fernström, M. (2011). Auditory Icons. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis : The Perceptual Organization of Sound*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/1486.001.0001>

Brennan, D., Tindall, L., Theodoros, D., Brown, J., Campbell, M., Christiana, D., Smith, D., Cason, J., & Lee, A. (2010). A Blueprint for Telerehabilitation Guidelines. *International Journal of Telerehabilitation*, 31-34. <https://doi.org/10.5195/ijt.2010.6063>

Brihmat, N. (2019). Récupération motrice du membre supérieur post-AVC: recherche de mesures adaptées pour l'évaluation et étude de l'efficacité de stratégies thérapeutiques. 330.

Brock, H., Schmitz, G., Baumann, J., & Effenberg, A. O. (2012). If motion sounds : Movement sonification based on inertial sensor data. *Procedia Engineering*, 34, 556-561. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.095>

- Broussy, S., Rouanet, F., Lesaine, E., Domecq, S., Kret, M., Maugeais, M., Aly, F., Dehail, P., Bénard, A., Wittwer, J., Salamon, R., Sibon, I., & Saillour-Glenisson, F. (2019a). Post-stroke pathway analysis and link with one year sequelae in a French cohort of stroke patients : The PAPASePA protocol study. *BMC Health Services Research*, 19(1), 770. <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4522-2>
- Broussy, S., Saillour-Glenisson, F., García-Lorenzo, B., Rouanet, F., Lesaine, E., Maugeais, M., Aly, F., Glize, B., Salamon, R., & Sibon, I. (2019b). Sequelae and Quality of Life in Patients Living at Home 1 Year After a Stroke Managed in Stroke Units. *Frontiers in Neurology*, 10, 907. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00907>
- Brown, C. (2019). Machine Tango : An Interactive Tango Dance Performance. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 565-569. <https://doi.org/10.1145/3294109.3301263>
- Buisine, S., Boisadan, A., & Richir, S. (2018). L'innovation radicale par la méthode de l'utilisateur extraordinaire. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 24(4), 374-386. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2017.11.001>
- Caramiaux, B., Françoise, J., Schnell, N., & Bevilacqua, F. (2014). Mapping Through Listening. *Computer Music Journal*, 38(3), 34-48. https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00255
- Caremel, R., Phe, V., Scheiber-Nogueira, C., De Sèze, M., Karsenty, G., & Game, X. (2012). Sémiologie et exploration des troubles urinaires chez les patients avec AVC. Elsevier Masson. Communication orale, Association française d'urologie.
- Cavuoto, L.A., Subryan, H., Stafford, M., Yang, Z., Bhattacharjya, S., Xu, W., & Langan, J. (2018). Understanding User Requirements for the Design of a Home-Based Stroke Rehabilitation System. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 1037-1041. <https://doi.org/10.1177/1541931218621239>
- Cébula, H., Turc, G., & Proust, F. (2018). Traitement chirurgical des hémorragies cérébrales. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 153-163). Doin.
- Cecchini, M.P., Bojanowski, V., Bodechtel, U., Hummel, T., & Hähner, A. (2012). Olfactory function in patients with ischemic stroke : A pilot study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(4), 1149-1153. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1819-0>
- Cerniauskaite, M., Quintas, R., Koutsogeorgou, E., Meucci, P., Sattin, D., Leonardi, M., et al. (2012) Quality-of-Life and Disability in Patients with Stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 91(13):S39-47.
- Cha, Y., Kim, Y., & Chung, Y. (2014). Immediate Effects of Rhythmic Auditory Stimulation with Tempo Changes on Gait in Stroke Patients. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(4), 479-482. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.479>
- Chan, V., Zagorski, B., Parsons, D., Colantonio, A. (2013) Older adults with acquired brain injury: a population based study. *BMC Geriatr*, 13(1):97.

Chapireau, F. (2001). La classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé. *Gérontologie et société*, 24 / n° 99(4), 37. <https://doi.org/10.3917/gq.099.0037>

Chazot-Balcon, M., Salle, J.-Y., Henry, É., & Bouchard, J.-P. (2019). Les accidents vasculaires cérébraux et la prise en charge psychologique à domicile des personnes qui en sont victimes. *Annales Médico- psychologiques, revue psychiatrique*, 177(10), 1017-1024. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2019.10.001>

Chen, J.L., Fujii, S., & Schlaug, G. (2015). The use of augmented auditory feedback to improve arm reaching in stroke : A case series. *Disability and Rehabilitation*, 38(11), 1115-1124. <https://doi.org/10.3109/09638288.2015.1076530>

Chen, M.-H., Huang, L.-L., & Wang, C.-H. (2015). Developing a Digital Game for Stroke Patients' Upper Extremity Rehabilitation – Design, Usability and Effectiveness Assessment. *Procedia Manufacturing*, 3, 6-12. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.101>

Chen, Y., Baran, M., Sundaram, H., & Rikakis, T. (2011). A low cost, adaptive mixed reality system for home-based stroke rehabilitation. 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1827-1830. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090520>

Chen, Y., Abel, K.T., Janecek, J.T., Chen, Y., Zheng, K., & Cramer, S.C. (2019). Home-based technologies for stroke rehabilitation : A systematic review. *International Journal of Medical Informatics*, 123, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2018.12.001>

Chen, Y., Chen, Y., Zheng, K., Dodakian, L., See, J., Zhou, R., Chiu, N., Augsburger, R., McKenzie, A., & Cramer, S.C. (2020). A qualitative study on user acceptance of a home-based stroke telerehabilitation system. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 27(2), 81-92. <https://doi.org/10.1080/10749357.2019.1683792>

Cho, Y.S., Jang, S.H., Cho, J.S., Kim, M.J., Lee, H.D., Lee, S.Y., et al. (2018) Evaluation of Validity and Reliability of Inertial Measurement Unit-Based Gait Analysis Systems. *Ann Rehabil Med*, 42(6):872-83.

Chokron, S. (2013). La cécité corticale : Sémiologie, étiologie et perspectives de prise en charge neuropsychologique. *Revue de neuropsychologie*, 5(1), 38. <https://doi.org/10.3917/rne.051.0038>

Clay, A., Couture, N., Nigay, L., de la Riviere, J.-B., Martin, J.-C., Courgeon, M., Desainte-Catherine, M., Orvain, E., Girondel, V., & Domengero, G. (2012). Interactions and systems for augmenting a live dance performance. 2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH), 29-38. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-AMH.2012.6483986>

Coleman, E.R., Moudgal, R., Lang, K., Hyacinth, H.I., Awosika, O.O., Kissela, B. M., & Feng, W. (2017). Early Rehabilitation After Stroke : A Narrative Review. *Current Atherosclerosis Reports*, 19(12), 59. <https://doi.org/10.1007/s11883-017-0686-6>

Colombo, R., Raglio, A., Panigazzi, M., Mazzone, A., Bazzini, G., Imarisio, C., Molteni, D., Caltagirone, C., & Imbriani, M. (2019). The SonicHand Protocol for Rehabilitation of Hand

Motor Function : A Validation and Feasibility Study. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(4), 664-672.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2905076>

Conan, S., Thoret, E., Aramaki, M., Derrien, O., Gondre, C., Ystad, S., and Kronland-Martinet, R. (2014). An intuitive synthesizer of continuous-interaction sounds: Rubbing, scratching, and rolling. *Computer Music Journal*, 38(4):24–37.
https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00266

Connolly, T., & Mahoney, E. (2018). Stroke survivors' experiences transitioning from hospital to home. *Journal of Clinical Nursing*, 27(21-22), 3979-3987.
<https://doi.org/10.1111/jocn.14563>

Cook, P. (2011). Sound Synthesis for Auditory Display. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Cooke, E.V., Mares, K., Clark, A., Tallis, R.C., Pomeroy, V.M. (2010). The effects of increased dose of exercise-based therapies to enhance motor recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis. *BMC Medicine*, 8, 60.
<https://doi.org/10.1186/1741-7015-8-60>

Cosin, C. (2016). Troubles de l'humeur post-AVC, caractérisation et détection précoce. 136.

Coupland, A.P., Thapar, A., Qureshi, M.I., Jenkins, H., & Davies, A.H. (2017). The definition of stroke. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 110(1), 9-12.
<https://doi.org/10.1177/0141076816680121>

Crété, M. (2007). Hand in cap : Tous dans le même chapeau ? : Le handicap ne peut-il plus être fruit du hasard ? *Journal français de psychiatrie*, 31(4), 11.
<https://doi.org/10.3917/jfp.031.0011>

Croarkin, E., Danoff, J., Barnes C. (2004) Evidence-Based Rating of Upper-Extremity Motor Function Tests Used for People Following a Stroke. *Physical Therapy*, 84(1):62-74.

Dai, S., Piscicelli, C., Clarac, E., Baci, M., Hommel, M., & Pérennou, D. (2021). Balance, Lateropulsion, and Gait Disorders in Subacute Stroke. *Neurology*, 96(17), e2147-e2159.
<https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000011152>

Danna, J., Paz-Villagrán, V., Gondre, C., Aramaki, M., Kronland-Martinet, R., Ystad, S., & Velay, J.-L. (2015). "Let Me Hear Your Handwriting!" Evaluating the Movement Fluency from Its Sonification. *PLOS ONE*, 10(6), e0128388. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128388>

Daunoraviciene, K., Adomaviciene, A., Grigonyte, A., Griškevičius, J., & Juocevicius, A. (2018). Effects of robot- assisted training on upper limb functional recovery during the rehabilitation of poststroke patients. *Technology and Health Care*, 26, 533-542.
<https://doi.org/10.3233/THC-182500>

David, L. (2020). *Conception et évaluation d'un système de réalité virtuelle pour l'assistance à l'auto-rééducation motrice du membre supérieur post-AVC*. Université Paris Saclay.

Daviet, J.C., Dudognon, P.J., Salle, J.Y., Munos, M., Lissandre, J.P., Rebeyrotte, I., Borie, M.J. (2002). Rééducation des accidentés vasculaires cérébraux. Bilan et prise en charge. Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Kinésithérapie-Médecine physique-Réadaptation, Elsevier Masson, 26-455-A-10.

Delleci, C., Gassie, P., Glize, B., & Cugy, E. (2015). Les troubles vésicosphinctériens après un accident vasculaire cérébral. *La Lettre du Neurologue*, MISE AU POINT, Vol XIX, 6, 252-257.

Denier, C., Luauté, J., & Azouvi, P. (2018). Rééducation du langage et de l'héminégligence spatiale. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 581-596). Doin.

de Dreu, M.J., van der Wilk, A.S.D, Poppe, E., Kwakkel, G., van Wegen, E.E.H. (2012) Rehabilitation, exercise therapy and music in patients with Parkinson's disease: a meta-analysis of the effects of music-based movement therapy on walking ability, balance and quality of life. *Parkinsonism & Related Disorders*. 18:S114-9.

de Peretti, C., Grimaud, O., Tuppin, P., Chin, F., Woimant, F. (2012). Prévalence des accidents vasculaires cérébraux et de leurs séquelles et impact sur les activités de la vie quotidienne : Apports des enquêtes déclaratives Handicap-santé-ménages et Handicap-santé-institution, 2008-2009. 12.

De Renzi, E. (1989). Apraxia. In F. Boller, & J. Grafman (Eds.), *Handbook of neuropsychology* (pp. 245–263). Amsterdam: Elsevier.

De Sèze, M. (2012). Prise en charge médicale des troubles vésico-sphinctériens post accident vasculaire cérébral. Elsevier Masson. Communication orale, Association française d'urologie.

Desrosiers, J., Bravo, G., Hébert, R., Dutil, É., Mercier, L. (1994) Validation of the Box and Block Test as a measure of dexterity of elderly people: Reliability, validity, and norms studies. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 75(7):751-5.

Detante, O. (2014). Biotherapies in stroke. *Revue neurologique*.
<https://doi.org/10.1016/j.neurol.2014.10.005>

Dodakian, L., McKenzie, A.L., Le, V., See, J., Pearson-Fuhrhop, K., Burke Quinlan, E., Zhou, R.J., Augsberger, R., Tran, X.A., Friedman, N., Reinkensmeyer, D.J., & Cramer, S.C. (2017). A Home-Based Telerehabilitation Program for Patients With Stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 31(10-11), 923-933. <https://doi.org/10.1177/1545968317733818>

Dombois, F., & Eckel, G. (2011). Audification. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Donnan, G.A. (2007). *The ischemic penumbra : Pathophysiology, imaging and therapy*. Informa Healthcare.

Donoso Brown, E.V., Nolfi, D., Wallace, S.E., Eskander, J., & Hoffman, J.M. (2019). Home program practices for supporting and measuring adherence in post-stroke rehabilitation : A

scoping review. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 27(5), 377-400. <https://doi.org/10.1080/10749357.2019.1707950>

Douglass-Kirk, P., Grierson, M., Ward, N. S., Brander, F., Kelly, K., Chegwidan, W., Shivji, D., & Stewart, L. (2022). Real-time auditory feedback may reduce abnormal movements in patients with chronic stroke. *Disability and Rehabilitation*, 1-7. <https://doi.org/10.1080/09638288.2022.2037751>

Dubus, G. (2012). Evaluation of four models for the sonification of elite rowing. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 5(3-4), 143-156. <https://doi.org/10.1007/s12193-011-0085-1>

Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *PLoS ONE*, 8(12), e82491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082491>

Dunn, J., & Clark, M.A. (1999). *The Sonification of Proteins*. Leonardo, 8.

Dupagne, D. (2011). E-santé. *Communications*, 88(1), 57-65. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/commu.088.0057>

Dyer, J., Stapleton, P., & W. M. Rodger, M. (2015). Sonification as Concurrent Augmented Feedback for Motor Skill Learning and the Importance of Mapping Design. *The Open Psychology Journal*, 8(1), 192-202. <https://doi.org/10.2174/1874350101508010192>

Dyer, J., Stapleton, P., & Rodger, M. (2017). Transposing musical skill : Sonification of movement as concurrent augmented feedback enhances learning in a bimanual task. *Psychological Research*, 81(4), 850-862. <https://doi.org/10.1007/s00426-016-0775-0>

Dyer JF. Human movement sonification for motor skill learning [PhD Thesis]. (2017) Queen's University Belfast. Faculty of Engineering and Physical Sciences.

Edwards, A. (2011). Auditory Display in Assistive Technology. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Edwards, J.D., Kapoor, A., Linkewich, E., & Swartz, R. H. (2017). Return to work after young stroke : A systematic review. *International Journal of Stroke*, 13(3), 243-256. <https://doi.org/10.1177/1747493017743059>

Effenberg, A.O. (2005). Movement Sonification : Effects on Perception and Action. *IEEE Multimedia*, 12(2), 53-59. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2005.31>

Effenberg A,O., Fehse U, Weber A. (2011) Movement Sonification: Audiovisual benefits on motor learning. *BIO Web of Conferences*, 1:00022.

Effenberg, A.O., Fehse, U., Schmitz, G., Krueger, B., & Mechling, H. (2016). Movement Sonification : Effects on Motor Learning beyond Rhythmic Adjustments. *Frontiers in Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00219>

Egglestone, S.R., Axelrod, L., Nind, T., Turk, R., Wilkinson, A., Burrige, J., Fitzpatrick, G., Mawson, S., Robertson, Z., Hughes, A. M., Ng, K. H., Pearson, W., Shublaq, N., Probert-

Smith, P., Ricketts, I., & Rodden, T. (2009). A design framework for a home-based stroke rehabilitation system : Identifying the key components. *Proceedings of the 3d International ICST Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. 3d International ICST Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, London, UK. <https://doi.org/10.4108/ICST.PERVASIVEHEALTH2009.6049>

Ertelt, D., Small, S., Solodkin, A., Dettmers, C., McNamara, A., Binkofski, F., & Buccino, G. (2007). Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. 10.

Eysenbach, G. (2001). What is e-health? *Journal of Medical Internet Research*, 3(2), e20. <https://doi.org/10.2196/jmir.3.2.e20>

Fan, J., & Topel, S. (2014). SONICTAIJI: A MOBILE INSTRUMENT FOR TAIJI PERFORMANCE. ICAD.

Favre, I., Zeffiro, T.A., Detante, O., Krainik, A., Hommel, M., & Jaillard, A. (2014). Upper Limb Recovery After Stroke Is Associated With Ipsilesional Primary Motor Cortical Activity. *Stroke*, 45, 1077-1083.

Feigin, V.L., Barker-Collo, S., Krishnamurthi, R., Theadom, A., & Starkey, N. (2010). Epidemiology of ischaemic stroke and traumatic brain injury. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 24(4), 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2010.10.006>

Ferguson, S. (2006). Learning Musical Instrument Skills Through Interactive Sonification. NIME. 6.

Fernando, C.K., & Basmajian, J.V. (1978). Biofeedback in physical medicine and rehabilitation. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 21.

Ferrel-Chapus, C., & Tahej, P.K. (2010). Processus attentionnels et apprentissage moteur. *Movement & Sport Sciences*, n° 71(3), 71. <https://doi.org/10.3917/sm.071.0071>

Ferro, J. M., Caeiro, L., & Santos, C. (2009). Poststroke Emotional and Behavior Impairment : A Narrative Review. *Cerebrovascular Diseases*, 27(Suppl. 1), 197-203. <https://doi.org/10.1159/000200460>

Ferro, J. M., & Santos, A. C. (2019). Emotions after stroke : A narrative update. *International Journal of Stroke*, 15(3), 256-267. <https://doi.org/10.1177/1747493019879662>

Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., Schön, D. (2015) Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. *Amitay S, éditeur. PLoS ONE*, 10(9):e0138715.

Fourtassi, M., Boumahraz, A., Lemsiah, M., Merabti, M., Hajjioui, A. (2014). Les troubles de la posture et de l'équilibre après AVC Evaluation et rééducation. *Espérance Médicale*, Tome 21, Numéro 200, 112-118.

Françoise, J., Fdili Alaoui, S., Schiphorst, T., & Bevilacqua, F. (2014). Vocalizing dance movement for interactive sonification of laban effort factors. *Proceedings of the 2014*

Conference on Designing Interactive Systems, 1079-1082.
<https://doi.org/10.1145/2598510.2598582>

Frid, E., Elblaus, L., & Bresin, R. (2019). Interactive sonification of a fluid dance movement : An exploratory study. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 13(3), 181-189.
<https://doi.org/10.1007/s12193-018-0278-y>

Friedman, N., Chan, V., Zondervan, D., Bachman, M., & Reinkensmeyer, D.J. (2011). MusicGlove : Motivating and quantifying hand movement rehabilitation by using functional grips to play music. 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2359-2363. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090659>

Friedman, N., Chan, V., Reinkensmeyer, A.N., Beroukhim, A., Zambrano, G.J., Bachman, M., & Reinkensmeyer, D.J. (2014). Retraining and assessing hand movement after stroke using the MusicGlove : Comparison with conventional hand therapy and isometric grip training. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1), 76.
<https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-76>

Gaser, C., Schlaug, G. (2003) Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians. *J Neurosci*, 23(27):9240-5.

Gauthier, L.V., Kane, C., Borstad, A., Strahl, N., Uswatte, G., Taub, E., Morris, D., Hall, A., Arakelian, M., & Mark, V. (2017). Video Game Rehabilitation for Outpatient Stroke (VIGoROUS) : Protocol for a multi-center comparative effectiveness trial of in-home gamified constraint-induced movement therapy for rehabilitation of chronic upper extremity hemiparesis. *BMC Neurology*, 17(1), 109. <https://doi.org/10.1186/s12883-017-0888-0>

Gelineau, A., Landais, H., Perrochon, A., Bernache-Assollant, I., & Mandigout, S. (2021). Motivation des personnes victimes d'un accident vasculaire cérébral dans l'auto-rééducation à domicile par le jeu vidéo. *Trayectorias Humanas Trascontinentales*, 11. <https://doi.org/10.25965/trahs.3926>

Ghai, S., Ghai, I., Schmitz, G., & Effenberg, A.O. (2018a). Effect of rhythmic auditory cueing on parkinsonian gait : A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 8(1), 506. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16232-5>

Ghai, S. (2018b). Effects of Real-Time (Sonification) and Rhythmic Auditory Stimuli on Recovering Arm Function Post Stroke : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Neurology*, 9, 488. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00488>

Ghai, S., & Ghai, I. (2019). Effects of (music-based) rhythmic auditory cueing training on gait and posture post- stroke : A systematic review & dose-response meta-analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 2183. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38723-3>

Ghorbel, E., Baptista, R., Shabayek, A., Aouada, D., Oramaeché, M.G., Lago, J.O., & Fernandez, L.O. (2020). Home-Based Rehabilitation System for Stroke Survivors : A Clinical Evaluation. *Journal of Medical Systems*, 44(12), 203.
<https://doi.org/10.1007/s10916-020-01661-z>

Giomi, A. (2018). La pensée sonore du corps : Pour une approche écologique à la médiation technologique, au mouvement et à l'interaction sonore. 453.

Giomi, A. (2020). Somatic Sonification in Dance Performances. From the Artistic to the Perceptual and Back. Proceedings of the 7th International Conference on Movement and Computing, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3401956.3404226>

Giomi, A., & Leonard, J. (2020). Towards an Interactive Model-Based Sonification of Hand Gesture for Dance Performance. NIME. 6.

Giomi, A. (2021). Recherches en danse, 10 | 2021. Recherches en danse, 16.

Godefroy, O. (2017). Troubles dysexécutifs et ralentissement de l'action dans la pathologie vasculaire cérébrale. In M. Roussel, O. Godefroy, & X. de Boissezon, Troubles neurocognitifs vasculaires et post-AVC: de l'évaluation à la prise en charge. De Boeck Supérieur.

Godøy, R.I., & Leman, M. (Éds.). (2010). Musical gestures : Sound, movement, and meaning. Routledge.

Gonzalez-Hoelling, S., Bertran-Noguer, C., Reig-Garcia, G., & Suñer-Soler, R. (2021). Effects of a Music-Based Rhythmic Auditory Stimulation on Gait and Balance in Subacute Stroke. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(4), 2032. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042032>

Gorgas, A.-M., Schön, L., Dlapka, R., Doppler, J., Iber, M., Gradl, C., Kiselka, A., Siragy, T., & Horsak, B. (2017). Short-Term Effects of Real-Time Auditory Display (Sonification) on Gait Parameters in People with Parkinson's Disease—A Pilot Study. In J. Ibáñez, J. González-Vargas, J. M. Azorín, M. Akay, & J. L. Pons (Éds.), Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II (Vol. 15, p. 855-859). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46669-9_139

Gracies, J.-M. (2016). Contrat d'autorééducation guidée dans la Parésie Spastique. 73.

Grond, F., & Berger, J. (2011). Parameter Mapping Sonification. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), The sonification handbook. Logos Verlag.

Gronier, G., & Baudet, A. (2021). Psychometric Evaluation of the F-SUS : Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. International Journal of Human-Computer Interaction, 37(16), 1571-1582. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828>

Grosshauser, T., & Hermann, T. (2009). The Sonified Music Stand - An Interactive Sonification System for Musicians. In F. Gouyon & X. S. Álvaro Barbosa (Eds.), SMC 2009 - Proceedings of the 6th Sound and Music Computing Conference (Vol. 1, pp. 233-238). Porto, Portugal: Casa da Musica.

Grosshauser, T., Spieth, C., & Hermann, T. (2011). WEARABLE SENSOR BASED REAL-TIME SONIFICATION OF MOTION AND FOOT PRESSURE IN DANCE TEACHING AND TRAINING. J. Audio Eng. Soc., 1(1), 10.

Gustafsson, L., & Bootle, K. (2013). Client and carer experience of transition home from inpatient stroke rehabilitation. *Disability and Rehabilitation*, 35(16), 1380-1386. <https://doi.org/10.3109/09638288.2012.740134>

Guédy, F., Bevilacqua, F., Fober, D., Robert, L. (2013) Etudier et jouer une œuvre musicale en manipulant des objets. Journées d'Informatique Musicale.

Hamonet, C. (2022). Les personnes en situation de handicap. 9e édition. PUF.

Hasegawa, S., Ishijima, S., Kato, F., Mitake, H., & Sato, M. (2012). Realtime sonification of the center of gravity for skiing. Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference on - AH '12, 1-4. <https://doi.org/10.1145/2160125.2160136>

Hassenzahl, M. (2003). The Thing and I : Understanding the Relationship Between User and Product. In M. A. Blythe, K. Overbeeke, A. F. Monk, & P. C. Wright (Éds.), *Funology* (Vol. 3, p. 31-42). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4

Hausdorff, J.M., Lowenthal, J., Herman, T., Gruendlinger, L., Peretz, C., & Giladi, N. (2007). Rhythmic auditory stimulation modulates gait variability in Parkinson's disease : Effects of RAS on gait variability in PD. *European Journal of Neuroscience*, 26(8), 2369-2375. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2007.05810.x>

Haute Autorité de Santé. (2012). Accident vasculaire cérébral: méthodes de rééducation de la fonction motrice chez l'adulte. Recommandation de Bonne Pratique.

Haute Autorité de Santé. (2020). Parcours de rééducation réadaptation des patients après la phase initiale de l'AVC. Fiche Recommandation de Bonne Pratique.

Haute Autorité de Santé. (2022). Rééducation à la phase chronique de l'AVC de l'adulte: pertinence, indications et modalités. Recommandation de Bonne Pratique.

Hermann, T., & Hunt, A. (2004). *The Discipline of Interactive Sonification*. 9.

Hermann, T. (2011). Model-Based Sonification. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Hermann, T., Hunt, A., Neuhoff, J. G., & Cook, P. (Éds.). (2011). Sound Synthesis for Auditory Display. In *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Hermann T, Hunt A, Neuhoff JG. (2011) *The Sonification Handbook*. Logos Verlag. Berlin.

Hermann, T., Ungerechts, B., Toussaint, H., & Grote, M. (2012). SONIFICATION OF PRESSURE CHANGES IN SWIMMING FOR ANALYSIS AND OPTIMIZATION. 8.

Hirel, C., Lévêque, Y., Deiana, G., Richard, N., Cho, T.-H., Mechtouff, L., Derex, L., Tillmann, B., Caclin, A., & Nighoghossian, N. (2014). Amusie acquise et anhédonie musicale. *Revue Neurologique*, 170(8-9), 536-540. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2014.03.015>

Hogan, C., Cornwell, P., Fleming, J., Man, D.W.K., & Shum, D. (2021). Self-reported prospective memory after stroke. *Neuropsychological Rehabilitation*, 31(8), 1190-1206. <https://doi.org/10.1080/09602011.2020.1769686>

Höner, O. (2011). Aiding Movement with Sonification in “Exercise, Play and Sport”. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Hunt, A. and Wanderley, M.M. (2002). Mapping performer parameters to synthesis engines. *Organised Sound*, 7(2):97–108. <https://doi.org/10.1017/S1355771802002030>

Hunt, A., & Hermann, T. (2004). THE IMPORTANCE OF INTERACTION IN SONIFICATION. 8.

INSERM-CTNERHI. (1988). *Classification internationale des handicaps : Déficiences, incapacités et désavantages : un manuel de classification des conséquences des maladies*. Diffusion P.U.F.

Jehkonen, M., Laihosalo, M., & Kettunen, J. E. (2006a). Impact of neglect on functional outcome after stroke – a review of methodological issues and recent research findings. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 24, 209-2015.

Jehkonen, M., Laihosalo, M., & Kettunen, J. (2006b). Anosognosia after stroke : Assessment, occurrence, subtypes and impact on functional outcome reviewed. *Acta Neurologica Scandinavica*, 114(5), 293-306. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.2006.00723.x>

Jessen, S., Mirkovic, J., & Ruland, C.M. (2018). Creating Gameful Design in mHealth : A Participatory Co-Design Approach. *JMIR MHealth and UHealth*, 6(12), e11579. <https://doi.org/10.2196/11579>

Johansson, B.B. (2011). Current trends in stroke rehabilitation. A review with focus on brain plasticity. *Acta Neurol Scand*, 123, 147-159. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.2010.01417.x>

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.

Kantan, P.R., Spaich, E.G., & Dahl, S. (2021). A Metaphor-Based Technical Framework for Musical Sonification in Movement Rehabilitation. *Proceedings of the 26th International Conference on Auditory Display (ICAD 2021)*, 176-183. <https://doi.org/10.21785/icad2021.008>

Kessner, S.S., Schlemm, E., Cheng, B., Bingel, U., Fiehler, J., Gerloff, C., & Thomalla, G. (2019). Somatosensory Deficits After Ischemic Stroke : Time Course and Association With Infarct Location. *Stroke*, 50(5), 1116-1123. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.023750>

Kim, S.-S., & Lee, B.-H. (2015). Motor imagery training improves upper extremity performance in stroke patients. *Journal of Physical Therapy Science*, 27(7), 2289-2291. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.2289>

Kim, S.A, Ryu, Y.U, Shin, H.K. (2019) The effects of different attentional focus on poststroke gait. *J Exerc Rehabil*, 15(4):592-6.

Klockenbring, F. (2021). Impact fonctionnel des troubles sensitifs au membre inférieur après un AVC. Proposition d'un protocole de prise en charge en phase subaiguë basé sur la thérapie miroir.

Kramer, G. (1994). Auditory Display : Sonification, Audification, and Auditory Interfaces. *Computer Music Journal*, 19(2), 110. <https://doi.org/10.2307/3680606>

Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J., Miner, N., Neuhoff, J., Bargar, R., Barrass, S., Berger, J., Evreinov, G., Fitch, W., Grohn, M., Handel, S., Kaper, H., Levkowitz, H., Lodha, S., Shinn-Cunningham, B., Simoni, M., & Tipei, S. (1999). The sonification report : Status of the field and research agenda. Report prepared for the National Science Foundation by members of the International Community for Auditory Display.

Krasny-Pacini, A., & Evans, J. (2018). Single-case experimental designs to assess intervention effectiveness in rehabilitation : A practical guide. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61(3), 164-179. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.12.002>

Laënnec, R.T.H. (1819). De l'auscultation médiate ou Traité du diagnostic des maladies des poumons et du cœur, fondé principalement sur ce nouveau moyen d'exploration. Gallica BnF.

Lallemand, C., Koenig, V., Gronier, G., & Martin, R. (2015). Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *European Review of Applied Psychology*, 65(5), 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2015.08.002>

Lamouroux, A., Magnan, A., & Vervloet, D. (2005). Compliance, observance ou adhésion thérapeutique : De quoi parlons-nous ? *Revue des Maladies Respiratoires*, 22(1), 31-34. [https://doi.org/10.1016/S0761-8425\(05\)85433-6](https://doi.org/10.1016/S0761-8425(05)85433-6)

Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *The Lancet*, 377(9778), 1693-1702. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5)

Langhorne, P., Ramachandra, S., & Stroke Unit Trialists' Collaboration. (2020). Organised inpatient (stroke unit) care for stroke : Network meta-analysis. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000197.pub4>

Larkin, O., Koerselman, T., Ong, B., Ng, K. (2008). SONIFICATION OF BOWING FEATURES FOR STRING INSTRUMENT TRAINING. ICAD.

Laska, A. C., Hellblom, A., Murray, V., Kahan, T., & Von Arbin, M. (2001). Aphasia in acute stroke and relation to outcome. *Journal of Internal Medicine*, 249(5), 413-422. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2796.2001.00812.x>

Laskowski, E.R., Newcomer-Aney, K., & Smith, J. (2000). Proprioception. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 11(2), 323-340.
[https://doi.org/10.1016/S1047-9651\(18\)30132-3](https://doi.org/10.1016/S1047-9651(18)30132-3)

Laver, K.E., Lange, B., George, S., Deutsch, J.E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2018(1).
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>

Laver, K.E., Adey-Wakeling, Z., Crotty, M., Lannin, N.A., George, S., & Sherrington, C. (2020). Telerehabilitation services for stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2020(1). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010255.pub3>

Le Gall, D., Etcharry-Bouyx, F., & Osiurak, F. (2012). Les apraxies : Synthèse et nouvelles perspectives. *Revue de neuropsychologie*, 4(3), 174. <https://doi.org/10.3917/rne.043.0174>

Lecoffre, C., de Peretti, C., Gabet, A., Grimaud, O., Woimant, F., Giroud, M., Béjot, Y., & Olié, V. (2017). National Trends in Patients Hospitalized for Stroke and Stroke Mortality in France, 2008 to 2014. *Stroke*, 48(11), 2939-2945.
<https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.117.017640>

Lee, H., Lee, Y., Choi, H., & Pyun, S.-B. (2015). Community Integration and Quality of Life in Aphasia after Stroke. 9.

Lemaitre G, Grimault N, Suied C. (2018) Acoustics and Psychoacoustics of Sound Scenes and Events. *Computational Analysis of Sound Scenes and Events*. Book Chapter.

Leman, M. (2007). *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*. The MIT Press.
<https://doi.org/10.7551/mitpress/7476.001.0001>

Ley-Flores, J., Turmo Vidal, L., Berthouze, N., Singh, A., Bevilacqua, F., & Tajadura-Jiménez, A. (2021). SoniBand : Understanding the Effects of Metaphorical Movement Sonifications on Body Perception and Physical Activity. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-16.
<https://doi.org/10.1145/3411764.3445558>

Ley-Flores, J., Alshami, E., Singh, A., Bevilacqua, F., Bianchi-Berthouze, N., Deroy, O., & Tajadura-Jiménez, A. (2022). Effects of pitch and musical sounds on body-representations when moving with sound. *Scientific Reports*, 12(1), 2676.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-06210-x>

Lim, C., & Alexander, M. P. (2009). Stroke and episodic memory disorders. *Neuropsychologia*, 47(14), 3045–3058.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.002>

Liu, W., Magalhaes, M.A., Mackay, W.E., Beaudouin-Lafon, M., Bevilacqua, F. (2022) Motor Variability in Complex Gesture Learning: Effects of Movement Sonification and Musical Background. *ACM Trans Appl Percept*, 19(1):1-21.

- Lo, S.H.S., Chau, J.P.C., & Chang, A.M. (2021). Strategies adopted to manage physical and psychosocial challenges after returning home among people with stroke : A qualitative study. *Medicine*, 100(10), e25026. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000025026>
- Loiseau, H., Huchet, A., Rué, M., Cowppli-Bony, A., & Baldi, I. (2009). Épidémiologie des tumeurs cérébrales primitives. *Revue Neurologique*, 165(8-9), 650-670. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2009.04.002>
- Lorenzoni, V., Van den Berghe, P., Maes, P.-J., De Bie, T., De Clercq, D., & Leman, M. (2018). Design and validation of an auditory biofeedback system for modification of running parameters. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 13(3), 167-180. <https://doi.org/10.1007/s12193-018-0283-1>
- Lugtmeijer, S., Lammers, N.A., de Haan, E.H.F., de Leeuw, F.-E., & Kessels, R.P.C. (2021). Post-Stroke Working Memory Dysfunction : A Meta-Analysis and Systematic Review. *Neuropsychology Review*, 31(1), 202-219. <https://doi.org/10.1007/s11065-020-09462-4>
- Maier, M., Ballester, B.R., & Verschure, P.F.M.J. (2019). Principles of Neurorehabilitation After Stroke Based on Motor Learning and Brain Plasticity Mechanisms. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 13, 74. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2019.00074>
- Mainka, S., Wissel, J., Völler, H., & Evers, S. (2018). The Use of Rhythmic Auditory Stimulation to Optimize Treadmill Training for Stroke Patients : A Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Neurology*, 9, 755. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00755>
- Marcelli, D. (2016). *Les nouveaux objets transitionnels : Du doudou de Winnicott à l'iPhone de Jobs*. Érés éditions.
- Martínez-Molina, N., Siponkoski, S.T., Kuusela, L., Laitinen, S., Holma, M., Ahlfors, M., et al. (2021) Resting-State Network Plasticity Induced by Music Therapy after Traumatic Brain Injury. *Garraghty PE*, éditeur. *Neural Plasticity*, 2021:1-18.
- Masson, M. (2011). Rééducation des processus attentionnels : Approche sur simulateur de conduite : Application au traumatisme crânien et au vieillissement normal. 354.
- Matuszewski, B. (2019). *Soundworks—A Framework for Networked Music Systems on the Web—State of Affairs and New Developments*. 7.
- Maulucci, R.A., & Eckhouse, R.H. (2001). Retraining reaching in chronic stroke with real-time auditory feedback. *NeuroRehabilitation*, 16(3), 171-182. <https://doi.org/10.3233/NRE-2001-16306>
- Mazighi, M., & Bracard, S. (2018). Thrombectomie mécanique. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 111-118). Doin.
- McGookin, D., & Brewster, S. (2011). Earcons. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Mertel, K. (2016). Therapeutical Instrumental Music Performance (TIMP). In M. Thaut & V. Hoemberg (Éds.), *Handbook of neurologic music therapy* (First published in paperback). Oxford University Press.

Mezzarobba, S., Grassi, M., Pellegrini, L., Catalan, M., Krüger, B., Stragapede, L., et al. (2020) Action observation improves sit-to-walk in patients with Parkinson's disease and freezing of gait. Biomechanical analysis of performance. *Parkinsonism & Related Disorders*, 80:133-7.

Middelkamp, W., Moolaert, V.R., Verbunt, J.A., van Heugten, C.M., Bakx, W.G., & Wade, D.T. (2007). Life after survival : Long-term daily life functioning and quality of life of patients with hypoxic brain injury as a result of a cardiac arrest. *Clinical Rehabilitation*, 21(5), 425-431. <https://doi.org/10.1177/0269215507075307>

Miller, A.S., Cafazzo, J.A., & Seto, E. (2014). A game plan : Gamification design principles in mHealth applications for chronic disease management. *Health Informatics Journal*, 22(2), 184-193. <https://doi.org/10.1177/1460458214537511>

Ministère de la Santé et des Sports. (2009). La prévention et la prise en charge des accidents vasculaires cérébraux en France: Rapport à Madame la ministre de la santé et des sports.

Montero-Odasso, M., Verghese, J., Beauchet, O., Hausdorff, J.M. (2012) Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. *J Am Geriatr Soc*, 60(11):2127-36. doi: 10.1111/j.1532-5415.2012.04209.x. PMID: 23110433; PMCID: PMC3498517.

Moo, L., & Wityk, R.J. (1999). Olfactory and taste dysfunction after bilateral middle cerebral artery stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 8(5), 353-354. [https://doi.org/10.1016/S1052-3057\(99\)80011-1](https://doi.org/10.1016/S1052-3057(99)80011-1)

Moore, B.C.J. (1997). *An introduction to the psychology of hearing* (4th ed). Academic Press.

Morand, A. de. (2014). Chapitre 1 : Le patient hémiparétique. In J. BARBE (Éd.), *Pratique de la rééducation neurologique* (2nd éd.). Elsevier Masson.

Morin, C. (2009). *Le retour à domicile après un accident vasculaire cérébral : [Guide pour le patient et sa famille]*. John Libbey Eurotext.

Moumdjian, L., Särkämö, T., Leone, C., Leman, M., Feys, P. (2016) Effectiveness of music-based interventions on motricity or cognitive functioning in neurological populations: A systematic review. *Eur J Phys Rehabil Med*.

Mubin, O., Alnajjar, F., Al Mahmud, A., Jishtu, N., & Alsinglawi, B. (2020). Exploring serious games for stroke rehabilitation : A scoping review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 17(2), 159-165. <https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1768309>

Münste, T.F., Altenmüller, E., Jäncke, L. (2002) The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nat Rev Neurosci*, 3(6):473-8.

Newbold, J., Gold, N.E., & Bianchi-Berthouze, N. (2020). Movement sonification expectancy model: Leveraging musical expectancy theory to create movement-altering sonifications. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 14(2), 153-166.

<https://doi.org/10.1007/s12193-020-00322-2>

Nikmaram, N., Scholz, D.S., Großbach, M., Schmidt, S.B., Spogis, J., Belardinelli, P., Müller-Dahlhaus, F., Remy, J., Ziemann, U., Rollnik, J.D., & Altenmüller, E. (2019). Musical Sonification of Arm Movements in Stroke Rehabilitation Yields Limited Benefits. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1378. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01378>

Nohales, L., & Iceta, S. (2015). L'altération de la prise de décision dans l'impulsivité : Facteur de risque de résistances aux soins en hôpital général.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11460.88963>

Norman, D.A. (2013). *The design of everyday things* (Revised and expanded edition). Basic Books.

Nown, T.H., Upadhyay, P., Kerr, A., Andonovic, I., Tachtatzis, C., & Greal, M.A. (2022). A Mapping Review of Real-Time Movement Sonification Systems for Movement Rehabilitation. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1109/RBME.2022.3187840>

Nunes-Silva, M., & Haase, V.G. (2013). Amusias and modularity of musical cognitive processing. *Psychology & Neuroscience*, 6(1), 45-56.

<https://doi.org/10.3922/j.psns.2013.1.08>

Oldfield, R.C. (1971) The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1):97-113.

Organisation Mondiale de la Santé. (2001). Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé : CIF.

Oujamaa, L., Relave, I., Froger, J., Mottet, D., & Pelissier, J.-Y. (2009). Rehabilitation of arm function after stroke. Literature review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 52(3), 269-293. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2008.10.003>

Parmentier, F.B.R. (2014) The cognitive determinants of behavioral distraction by deviant auditory stimuli: a review. *Psychological Research*, 78(3):321-38.

Park, J., & Kim, T.-H. (2019). The effects of balance and gait function on quality of life of stroke patients. *NeuroRehabilitation*, 44(1), 37-41. <https://doi.org/10.3233/NRE-182467>

Parker, J. (2016). Composing [De]Composition : Data Sonification for Sound Art and Music Composition. *Leonardo*, 51(5), 528-528. https://doi.org/10.1162/leon_a_01664

Parsehian, G. (2013). Sonification binaurale pour l'aide à la navigation. 206.

- Parseihian, G., Gondre, C., Aramaki, M., Ystad, S., & Kronland-Martinet, R. (2016). Comparison and Evaluation of Sonification Strategies for Guidance Tasks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 18(4), 674-686. <https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2531978>
- Paul, M., Cariou, A. (2019). Arrêt Cardiocirculatoire. *La Revue du praticien*, Item 327, 69(4);e117-125.
- Pereira, A.P.S, Marinho, V., Gupta, D., Magalhães, F., Ayres, C., Teixeira, S. (2019) Music Therapy and Dance as Gait Rehabilitation in Patients With Parkinson Disease: A Review of Evidence. *J Geriatr Psychiatry Neurol*, 32(1):49-56.
- Peretz, I., Champod, A.S., Hyde, K. (2003) Varieties of Musical Disorders The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann. N. Y. Acad. Sci*, 999:58-75.
- Perroy, A.-C. (2016). La m-santé, à l'ère de la e-santé. Promesses, enjeux et responsabilités. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, 74(6), 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.pharma.2016.03.002>
- Peskine, A., Picq, C., & Pradat-Diehl, P. (2004). Cerebral anoxia and disability. *Brain Injury*, 18(12), 1243-1254. <https://doi.org/10.1080/02699050410001719899>
- Peskine, A., Rosso, C., Picq, C., Caron, E., & Pradat-Diehl, P. (2010). Neurological sequelae after cerebral anoxia. *Brain Injury*, 24(5), 755-761. <https://doi.org/10.3109/02699051003709581>
- Peurala, S.H., Kantanen, M.P., Sjögren, T., Paltamaa, J., Karhula, M., & Heinonen, A. (2012). Effectiveness of constraint-induced movement therapy on activity and participation after stroke : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Rehabilitation*, 26(3), 209-223. <https://doi.org/10.1177/0269215511420306>
- Pinoit, J.-M., Bejot, Y., Rouaud, O., Benatru, I., Osseby, G.-V., Bonin, B., Gisselmann, A., & Giroud, M. (2006). Dépression après un accident vasculaire cérébral, un handicap supplémentaire. *La Presse Médicale*, 35(12), 1789-1793. [https://doi.org/10.1016/S0755-4982\(06\)74903-X](https://doi.org/10.1016/S0755-4982(06)74903-X)
- Platel, H., Lechevalier, B., Lambert, J., & Eustache, F. (2009). Agnosies auditives et syndromes voisins : Étude clinique, cognitive et psychopathologique. *EMC - Neurologie*, 6(3), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0246-0378\(09\)49967-6](https://doi.org/10.1016/S0246-0378(09)49967-6)
- Pollock, A., Baer, G., Campbell, P., Choo, P.L., Forster, A., Morris, J., Pomeroy, V.M., & Langhorne, P. (2014). Physical rehabilitation approaches for the recovery of function and mobility following stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2014(4). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD001920.pub3>
- Pollock, A., Farmer, S.E., Brady, M.C., Langhorne, P., Mead, G.E., Mehrholz, J., et al. (2014) Interventions for improving upper limb function after stroke (Review). *Cochrane Database of Systematic Reviews*.

Pradat-Diehl, P., Crop, S., Poncet, F., Jégard, S., Weiss, J.-J., & Charanton, J. (2018). Vie quotidienne après un accident vasculaire cérébral. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 633-648). Doin.

Proctor, R.W. (2011). Playing the Simon game : Use of the Simon task for investigating human information processing. *Acta Psychologica*, 136(2), 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.06.010>

Quintaine, V., & Yelnik, A. (2018). Rééducation de la motricité après un AVC récent. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique*. Doin.

Raghavan, P. (2015). Upper Limb Motor Impairment After Stroke. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 26(4), 599-610. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.06.008>

Raglio, A., Oasi, O., Gianotti, M., Rossi, A., Goulene, K., Stramba-Badiale, M. (2016) Improvement of spontaneous language in stroke patients with chronic aphasia treated with music therapy: a randomized controlled trial. *International Journal of Neuroscience*, 126(3):235-42.

Raglio, A., Panigazzi, M., Colombo, R., Tramontano, M., Iosa, M., Mastrogiacomo, S., Baiardi, P., Molteni, D., Baldissarro, E., Imbriani, C., Imarisio, C., Eretti, L., Hamedani, M., Pistarini, C., Imbriani, M., Mancardi, G.L., & Caltagirone, C. (2021). Hand rehabilitation with sonification techniques in the subacute stage of stroke. *Scientific Reports*, 11(1), 7237. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86627-y>

Ramachandran, V.S., & Altschuler, E.L. (2009). The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain*, 132(7), 1693-1710. <https://doi.org/10.1093/brain/awp135>

Rammsayer, T.H., Bortner, N., & Troche, S.J. (2015). Visual-auditory differences in duration discrimination of intervals in the subsecond and second range. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01626>

Rauschecker, J.P. (2011) An expanded role for the dorsal auditory pathway in sensorimotor control and integration. *Hearing Research*, 271(1-2):16-25.

Rensink, M., Schuurmans, M., Lindeman, E., & Hafsteinsdóttir, T. (2009). Task-oriented training in rehabilitation after stroke : Systematic review. *Journal of Advanced Nursing*, 65(4), 737-754. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2008.04925.x>

Rialle, V. (2015). Quelle autonomie peut apporter la technologie ? De l'aide à la personne âgée à la naissance d'une nouvelle société. *Ethics, Medicine and Public Health*, 1(2), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.jemep.2015.03.008>

Rizzo, F. (2010). Co-design versus User Centred Design: Framing the Differences," in *Notes on Doctoral Research in Design: Contributions from the Politecnico di Milano*, ed. Luca Guerrini, Milan: FrancoAngeli, 132.

Robaszekiewicz, S., & Schnell, N. (2015). *Soundworks – A playground for artists and developers to create collaborative mobile web performances*. 4.

Robertson, J.V., Hoellinger, T., Lindberg, P., Bensmail, D., Hanneton, S., Roby-Brami, A. (2009) Effect of auditory feedback differs according to side of hemiparesis: a comparative pilot study. *J NeuroEngineering Rehabil*, ;6(1):45.

Roddy, S. (2020) Mapping for meaning: the embodied sonification listening model and its implications for the mapping problem in sonic information design. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 9.

Rojo, N., Amengual, J., Juncadella, M., Rubio, F., Camara, E., Marco-Pallares, J., et al. (2011) Music-Supported Therapy induces plasticity in the sensorimotor cortex in chronic stroke: A single-case study using multimodal imaging (fMRI-TMS). *Brain Injury*, 25(7-8):787-93.

Rosso, C., Sibon, I., & Olivot, J.-M. (2018). Thrombolyse intraveineuse. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 87-109). Doin.

Roussel, M., Martinaud, O., Hénon, H., Vercelletto, M., Bindschadler, C., Joseph, P.-A., Robert, P., Labauge, P., Godefroy, O., & on behalf of the GREFEX study group. (2016). The Behavioral and Cognitive Executive Disorders of Stroke : The GREFEX Study. *PLOS ONE*, 11(1), e0147602. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147602>

Roussel, M., Godefroy, O., & Boissezon, X. de. (2017). Troubles neurocognitifs vasculaires et post-AVC : De l'évaluation à la prise en charge. *De Boeck supérieur*.

Roussel, M., & Godefroy, O. (2019). Les troubles dysexécutifs après accident vasculaire cérébral. *REVUE DE NEUROPSYCHOLOGIE*, 7.

Ruffion, A., Chartier-Kastler, E. (2007). Troubles vésico-sphinctériens des accidents vasculaires cérébraux. *Progrès en Urologie*, 17, 399-402.

Ryan, R.M., & Deci, E.L. (2000). Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. *American Psychologist*, 11.

Santé Publique France. (2019).Épidémiologie des traumatismes crâniens en France et dans les pays occidentaux—Synthèse bibliographique, avril 2016.

Sanders, E. (2002). From user-centered to participatory design approaches. In J. Frascara (Éd.), *Design and the social sciences : Making connections* (1. publ). Taylor & Francis.

Särkämö, T., Tervaniemi, M., Soinila, S., Autti, T., Silvennoinen, H. M., Laine, M., Hietanen, M., & Pihko, E. (2010). Auditory and Cognitive Deficits Associated with Acquired Amusia after Stroke : A Magnetoencephalography and Neuropsychological Follow-Up Study. *PLoS ONE*, 5(12), e15157. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015157>

Sarrazin, J.-L., Bonneville, F., & Martin-Blondel, G. (2012). Infections cérébrales. *Journal de Radiologie Diagnostique et Interventionnelle*, 93(6), 503-520. <https://doi.org/10.1016/j.jradio.2012.03.003>

Schaffert, N., & Mattes, K. (2015). Interactive Sonification in Rowing : Acoustic Feedback for On-Water Training. *IEEE MultiMedia*, 22(1), 58-67. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2015.9>

Schaffert, N., Godbout, A., Schlueter, S., & Mattes, K. (2017). Towards an application of interactive sonification for the forces applied on the pedals during cycling on the Wattbike ergometer. *Displays*, 50, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2017.09.004>

Schaffert, N., Engel, A., Schlüter, S., & Mattes, K. (2019). The sound of the underwater dolphin-kick : Developing real-time audio feedback in swimming. *Displays*, 59, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2019.08.001>

Schaffert, N., Janzen, T.B., Mattes, K., & Thaut, M.H. (2019). A Review on the Relationship Between Sound and Movement in Sports and Rehabilitation. *Frontiers in Psychology*, 10, 244. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00244>

Schaffert, N. (2022). The Design of Interactive Real-Time Audio Feedback Systems for Application in Sports. In V. Tzankova & M. Filimowicz (Éds.), *Interactive sports technologies : Performance, participation, safety*. Routledge.

Schedel, M., Weymouth, D., Pinkhasov, T., Loomis, J., Berger Morris, I., Vasudevan, E., & Muratori, L. (2016). Interactive Sonification of Gait : Realtime BioFeedback for People with Parkinson's Disease. *ISon2016 Proceedings*, 4.

Schmitz, G., Kroeger, D., & Effenberg, A. O. (2014). A mobile sonification system for stroke rehabilitation. *New York*, 7.

Schmitz, G., Bergmann, J., Effenberg, A.O., Krewer, C., Hwang, T.-H., & Müller, F. (2018). Movement Sonification in Stroke Rehabilitation. *Frontiers in Neurology*, 9, 389. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00389>

Schnell, N., Röbel, A., Schwarz, D., Peeters, G., Borghesi, R. MuBu & Friends (2009) *Assembling Tools for Content Based Real-Time Interactive Audio Processing in Max/MSP*.

Schnitzler, A. (2006). Reprise du travail après un accident vasculaire cérébral—Return to work after stroke.

Scholz, D.S., Rhode, S., Großbach, M., Rollnik, J., & Altenmüller, E. (2015). Moving with music for stroke rehabilitation : A sonification feasibility study: Musical sonification in stroke rehabilitation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1), 69-76. <https://doi.org/10.1111/nyas.12691>

Scholz, D.S., Rohde, S., Nikmaram, N., Brückner, H.-P., Großbach, M., Rollnik, J. D., & Altenmüller, E.O. (2016). Sonification of Arm Movements in Stroke Rehabilitation – A Novel Approach in Neurologic Music Therapy. *Frontiers in Neurology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00106>

Seibert, G., & Hug, D. (2013). Bringing musicality to movement sonification : Design and evaluation of an auditory swimming coach. *Proceedings of the 8th Audio Mostly Conference on - AM '13*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/2544114.2544127>

Sethi, A., Ting, J., Allen, M., Clark, W., Weber, D. (2020) Advances in motion and electromyography based wearable technology for upper extremity function rehabilitation: A review. *Journal of Hand Therapy*, 7.

Shoval, S., Borenstein, J., & Koren, Y. (1998). Auditory guidance with the Navbelt-a computerized travel aid for the blind. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 28(3), 459-467. <https://doi.org/10.1109/5326.704589>

Sihvonen, A.J., Särkämö, T., Leo, V., Tervaniemi, M., Altenmüller, E., Soinila, S. (2017) Music-based interventions in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 16(8):648-60.

Silva, G., Gonçalves, R., Taveira, I., Mouzinho, M., Osório, R., & Nzwalo, H. (2021). Stroke-Associated Cortical Deafness : A Systematic Review of Clinical and Radiological Characteristics. *Brain Sciences*, 11(11), 1383. <https://doi.org/10.3390/brainsci11111383>

Sinclair, P. (2012). Sonification : What where how why artistic practice relating sonification to environments. *AI & SOCIETY*, 27(2), 173-175. <https://doi.org/10.1007/s00146-011-0346-2>

Sinclair, P.F. (2013). Using Real-Time Data Flux In Art – The Mediation Of A Situation As It Unfolds : RoadMusic – An Experimental Case Study. 292.

Siponkoski, S.T., Martínez-Molina, N., Kuusela, L., Laitinen, S., Holma, M., Ahlfors, M., Jordan-Kilkkki, P., Ala-Kauhaluoma, K., Melkas, S., Pekkola, J., Rodriguez-Fornells, A., Laine, M., Ylinen, A., Rantanen, P., Koskinen, S., Lipsanen, J., Särkämö T. (2020) Music Therapy Enhances Executive Functions and Prefrontal Structural Neuroplasticity after Traumatic Brain Injury: Evidence from a Randomized Controlled Trial. *J Neurotrauma*. 15;37(4):618-634. doi: 10.1089/neu.2019.6413. PMID: 31642408.

Spalletta, G., Bossù, P., Ciaramella, A., Bria, P., Caltagirone, C., & Robinson, R.G. (2006). The etiology of poststroke depression : A review of the literature and a new hypothesis involving inflammatory cytokines. *Molecular Psychiatry*, 11(11), 984-991. <https://doi.org/10.1038/sj.mp.4001879>

Stahl, J., Mailles, A., Vaillant, V., & Floret, D. (2007). Les encéphalites infectieuses aiguës : Recommandations pour un diagnostic étiologique. *Réanimation*, 16(6), 485-489. <https://doi.org/10.1016/j.reaurg.2007.09.005>

Su, F., & Xu, W. (2020). Enhancing Brain Plasticity to Promote Stroke Recovery. *Frontiers in Neurology*, 11, 554089. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.554089>

Subramanian, S.K., Massie, C.L., Malcolm, M.P., & Levin, M.F. (2010). Does Provision of Extrinsic Feedback Result in Improved Motor Learning in the Upper Limb Poststroke? A Systematic Review of the Evidence. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 24(2), 113-124. <https://doi.org/10.1177/1545968309349941>

Tajadura-Jiménez A. (2016) Action Sounds Modulate Arm Reaching Movements. *Frontiers in Psychology*, 7:14.

- Tajadura-Jiménez, A., Newbold, J., Zhang, L., Rick, P., & Bianchi-Berthouze, N. (2019). As Light as You Aspire to Be : Changing Body Perception with Sound to Support Physical Activity. Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1-14. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300888>
- Taske, A., Oppermann, L., Niemann, K., & Wilken, R. (2015). *Design and Evaluation of a Stroke Rehabilitation Program*. Virtuelle und Erweiterte Realität - 12. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR, DE. <https://doi.org/10.2370/9783844038682>
- Taule, T., Strand, L.I., Skouen, J.S., & Råheim, M. (2014). Striving for a life worth living : Stroke survivors' experiences of home rehabilitation. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*, 29(4), 651-661. <https://doi.org/10.1111/scs.12193>
- Taveggia, G., Borboni, A., Salvi, L., Mulé, C., Fogliaresi, S., Villafaña, J.H., & Casale, R. (2016). Efficacy of robot-assisted rehabilitation for the functional recovery of the upper limb in post-stroke patients : A randomized controlled study. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 52(6), 7.
- Teasdale, G., & Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet (London, England)*, 2(7872), 81-84. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(74\)91639-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(74)91639-0)
- Teasdale, T. W. (2001). Suicide after a stroke : A population study. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 55(12), 863-866. <https://doi.org/10.1136/jech.55.12.863>
- Thant, A.A., Wanpen, S., Nualnetr, N., Puntumetakul, R., Chatchawan, U., Hla, K.M., & Khin, M.T. (2019). Effects of task-oriented training on upper extremity functional performance in patients with sub-acute stroke : A randomized controlled trial. *Journal of Physical Therapy Science*, 31(1), 82-87. <https://doi.org/10.1589/jpts.31.82>
- Thaut, C., & Rice, R. (2016). Rhythmic Auditory Stimulation (RAS). In M. Thaut & V. Hoemberg (Éds.), *Handbook of neurologic music therapy* (First published in paperback). Oxford University Press.
- Thaut, M.H., Rice, R.R., Braun Janzen, T., Hurt-Thaut, C.P., & McIntosh, G.C. (2018). Rhythmic auditory stimulation for reduction of falls in Parkinson's disease : A randomized controlled study. *Clinical Rehabilitation*, 33(1), 34-43. <https://doi.org/10.1177/0269215518788615>
- Thieme, H., Morkisch, N., Mehrholz, J., Pohl, M., Behrens, J., Borgetto, B., & Dohle, C. (2018). Mirror therapy for improving motor function after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2018(7). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008449.pub3>
- Thomas, P. (2017). Dépression post-AVC. In M. Roussel, X. de Boissezon, & O. Godefroy, *Troubles neurocognitifs vasculaires et post-AVC: de l'évaluation à la prise en charge*. De Boeck supérieur.
- Tortuyaux, R., & Cordonnier, C. (2018). Traitement médical des hémorragies cérébrales. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 143-152). Doin.

Turc, G., Girot, M., Vivien, B., & Wiel, É. (2018). Prise en charge préhospitalière et admission. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 15-29). Doin.

Turp, M., González, J. C., Pulido, J. C., & Fernández, F. (2019). Developing a Robot-Guided Interactive Simon Game for Physical and Cognitive Training. *International Journal of Humanoid Robotics*, 16(01), 1950003. <https://doi.org/10.1142/S0219843619500038>

Uginet, M., Stancu, P., Bridel, C., Serratrice, J., Lalive, P. H., & Coen, M. (2021). Encéphalopathie aiguë et Covid- 19 : Hypothèses physiopathologiques. *Revue Médicale Suisse*, 17(736), 810-815. <https://doi.org/10.53738/REVMED.2021.17.736.0810>

van Rheden, V., Grah, T., & Meschtscherjakov, A. (2020). Sonification approaches in sports in the past decade : A literature review. *Proceedings of the 15th International Conference on Audio Mostly*, 199-205. <https://doi.org/10.1145/3411109.3411126>

van Vliet, P.M., & Wulf, G. (2006). Extrinsic feedback for motor learning after stroke : What is the evidence? *Disability and Rehabilitation*, 28(13-14), 831-840. <https://doi.org/10.1080/09638280500534937>

van Zomeren, A.H., & Brouwer, W.H. (1994). *Clinical neuropsychology of attention*. Oxford University Press.

Vauchez, J.-M. (2015). Autonome vs indépendant. *VST - Vie sociale et traitements*, 126(2), 128. <https://doi.org/10.3917/vst.126.0128>

Verfaille, V., Wanderley, M., and Depalle, P. (2006). Mapping strategies for gestural and adaptive control of digital audio effects. *The Journal of New Music Research*, 35(1):71–93. <https://doi.org/10.1080/09298210600696881>

Véron-Delor, L., Pinto, S., Eusebio, A., Azulay, J., Witjas, T., Velay, J., & Danna, J. (2020). Musical sonification improves motor control in Parkinson's disease : A proof of concept with handwriting. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1465(1), 132-145. <https://doi.org/10.1111/nyas.14252>

Vial, S. (2021). *Le design* (3e éd. mise à jour). Que sais-je ?

Vickers, P., Hogg, B., Worrall, D. (2017) Aesthetics of sonification: Taking the subject-position. In C. Wöllner (Éd.), *Body, sound and space in music and beyond: Multimodal explorations*. Routledge.

Vignolo, L.A. (2003). Music agnosia and auditory agnosia. Dissociations in stroke patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 50-57. <https://doi.org/10.1196/annals.1284.005>

Wafa, H.A., Wolfe, C.D.A., Emmett, E., Roth, G.A., Johnson, C.O., & Wang, Y. (2020). Burden of Stroke in Europe : Thirty-Year Projections of Incidence, Prevalence, Deaths, and Disability-Adjusted Life Years. *Stroke*, 51(8), 2418-2427. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.120.029606>

Walker, B., & Nees, M. (2011). Theory of Sonification. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Éds.), *The sonification handbook*. Logos Verlag.

Wan, C.Y., Schlaug, G. (2010) Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span. *Neuroscientist*, 16(5):566-77.

Ward, N. (2011). Assessment of cortical reorganisation for hand function after stroke. *The Journal of Physiology*, 589(23), 5625-5632. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.220939>

Wilson, P.H., Rogers, J.M., Vogel, K., Steenbergen, B., McGuckian, T.B., & Duckworth, J. (2021). Home-based (virtual) rehabilitation improves motor and cognitive function for stroke patients : A randomized controlled trial of the Elements (EDNA-22) system. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1), 165. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00956-7>

Winance, M. (2007). Dépendance versus autonomie... De la signification et de l'imprégnation de ces notions dans les pratiques médicosociales : Commentaire. *Sciences sociales et santé*, 25(4), 83. <https://doi.org/10.3917/sss.254.0083>

Winance, M. (2008). La notion de handicap et ses transformations à travers les classifications internationales du handicap de l'OMS, 1980 et 2001. *Dynamis*, 28, pp.377-406.

Winnicott, D.W., & Harrus-Révidi, G. (2010). *Les objets transitionnels* (Nouvelle éd.). Payot & Rivages.

Woimant, F., & Crassard, I. (2018). Filières de prise en charge. In J.-L. Mas & D. Leys, *Accidents vasculaires cérébraux : Thérapeutique* (p. 3-14). Doin.

Yelnik, A.P. (2004). La rééducation de l'équilibre après accident vasculaire cérébral sur plateforme de force. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 47(4), 177-178. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2004.02.002>

Yelnik, A., Bonan, I.V., Simon, O., Gellez-Leman, M.C. (2008) Rééducation après accident vasculaire cérébral. *EMC - Neurologie*, 5(3):1-15.

Yelnik, A., & Herman, P. (2021a). Rééducation de l'équilibre du patient avec déficit proprioceptif. In *Troubles de l'équilibre : Aspects sensoriels de la physiologie à la rééducation*. Elsevier-Masson.

Yelnik, A., & Herman, P. (2021b). Rééducation de l'équilibre du patient cérébrolésé après AVC. In *Troubles de l'équilibre : Aspects sensoriels de la physiologie à la rééducation*. Elsevier-Masson.

Yoo, G.E., & Kim, S.J. (2016). Rhythmic Auditory Cueing in Motor Rehabilitation for Stroke Patients : Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Music Therapy*, 53(2), 149-177. <https://doi.org/10.1093/jmt/thw003>

Zhang, Y., Cai, J., Zhang, Y., Ren, T., Zhao, M., & Zhao, Q. (2016). Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy : A Systematic Review and Meta-analysis. *Scientific Reports*, 6(1), 38521. <https://doi.org/10.1038/srep38521>

Zondervan, D.K., Friedman, N., Chang, E., Zhao, X., Augsburg, R., Reinkensmeyer, D. J., & Cramer, S. C. (2016). Home-based hand rehabilitation after chronic stroke : Randomized, controlled single-blind trial comparing the MusicGlove with a conventional exercise program. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 53(4), 457-472. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2015.04.0057>

ANNEXES

Chapitre 4

- Annexe I. Evaluation Preuve de concept
- Annexe II. Déclaration de conformité avec les normes européennes des capteurs RIoT
- Annexe III. Notice Dispositif CoMo Rééducation (mise en forme par Suzanne Saint-Cast)

Chapitre 5

- Annexe IV. Carnet de bord, évaluation fonctionnelle du dispositif
- Annexe V. Programme quotidien participants
- Annexe VI. Figures S5.1, S5.2, S5.3 (Etude N°2)
- Annexe VII. Guide d'entretien semi-directif, évaluation thérapeutes
- Annexe VIII. Questionnaire F-SUS, évaluation thérapeutes
- Annexe IX. Questionnaires AttrakDiff, évaluation thérapeutes

Annexe I. Evaluation "Preuve de concept"

Une expérimentation auprès de 8 participants volontaires parmi les membres de l'équipe ISMM et leurs proches a été menée.

Objectifs:

Les deux objectifs conjoints de l'expérimentation étaient d'évaluer la fonctionnalité du système développé dans l'infrastructure *Soundworks*, et de disposer de données préliminaires sur les choix de design sonore, en comparant les performances de maintien de posture (nombre d'oscillations mis en évidence par le suivi au cours du temps de la déviation calculée) et en recueillant les ressentis et préférences des participants.

Population:

Les participants étaient tous volontaires, sans troubles musculo-squelettique, ou séquelles de lésions cérébrales, et tous droitiers. Leur consentement libre et éclairé a été recueilli oralement, après la présentation précise du protocole expérimental, et de ses implications.

Matériel:

Deux capteurs de mouvements (modules RIoT) étaient placés respectivement sur le bras et l'avant-bras des participants à l'aide d'un brassard (Figure 1).



Figure 1. Positionnement des capteurs

Les données étaient transmises par Wifi, à un routeur TP Link permettant d'utiliser l'application sur un ordinateur.

Les six contextes sonores suivants ont été proposé pour réaliser l'exercice de maintien de posture: sans retour sonore, aboiements de chiens (sons discontinus dans un registre de fréquence grave), ronronnement de chat (sons continus avec des variations d'intensité dans un registre de fréquence grave) pépiements et chants d'oiseaux variés (sons discontinus dans un registre de fréquences aiguës), écoulement d'une rivière (sons continus), chant

grégorien (musique vocale caractérisée par des sons continus interprétés par des voix d'hommes). Les extraits sonores choisis étaient disponibles en open source.

Protocole:

Les participants devaient réaliser quotidiennement, pendant 5 jours, des maintiens de posture d'une durée de deux minutes, en alternant entre leurs bras. Deux contextes sonores étaient proposés à chaque session quotidienne pour réaliser le maintien de posture: sans retour sonore et avec un retour sonore tiré au sort, variant chaque jour.

L'ordre de présentation des retours sonores au cours des 5 jours était randomisé pour chaque participant. De même, les ordres de présentation quotidienne des situations sans retour sonore / avec retour sonore, et d'alternance entre les bras, ont fait l'objet d'une randomisation unique pour chaque participant.

La consigne était de maintenir la posture en bougeant le moins possible.

A l'issue de la séance quotidienne d'exercice, les participants devaient répondre à un bref questionnaire visant à évaluer leurs ressentis.

A l'issue de leur participation, un questionnaire complémentaire visant à évaluer la pénibilité de la tâche, l'évolution de leur ressentis, et leur préférence sonore était proposé.

Résultats:

L'expérimentation a permis de mettre en évidence que le dispositif était fonctionnel. En effet, la passation quotidienne des sessions d'exercices a été possible pour l'ensemble des participants sans que des difficultés ou imprévus techniques surviennent. Les retours sonores suivaient les oscillations de posture des participants conformément au calcul de déviation réalisé en temps réel. Par ailleurs, l'ensemble des données ont été correctement enregistré.

Concernant le maintien de posture, la figure 2 représente pour chaque participant l'indice de déviation ("erreur") en fonction du temps (à savoir de 0 à 1 minute, puis de 1 à 2 minutes de maintien de posture), du bras considéré et du contexte sonore (sans son versus avec son, les sons variant quotidiennement).

Lorsque l'on compare le niveau d'erreur en présence des retours sonores par rapport à la situation sans son, il est possible de remarquer qu'en fonction de l'individu un même retour sonore peut induire un effet inverse sur le maintien de posture (Figure 3).

Par exemple, les oscillations de posture ont tendance à être moins importantes avec le retour sonore "Rivière" par rapport à la situation sans retour sonore pour les participants 1,2,3 et 5, tandis qu'elles ont tendance à être plus importantes pour le participant 7.

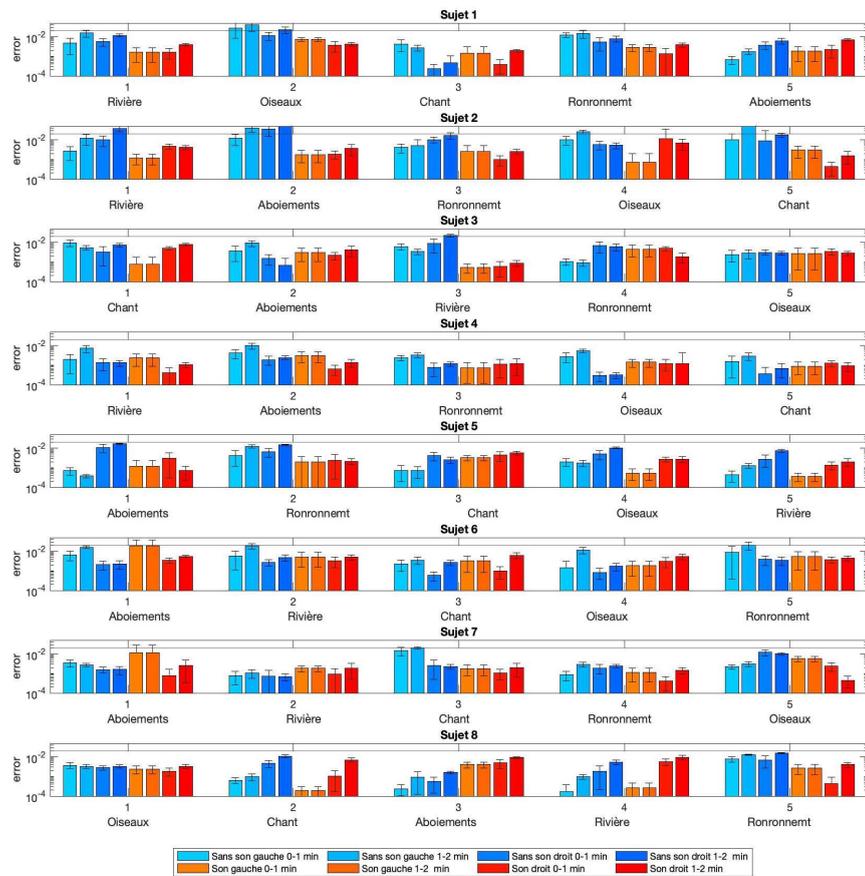


Figure 2. Erreur suivie au cours du temps, en fonction du retour sonore

Retour Sonore / Sans Son	Participants	Tendance oscillations ↘	Tendance oscillations ↗	Similaires	Variable selon bras ou temporalité
Rivière	1	X			
	2	X			
	3	X			
	4				X
	5	X			
	6				X
	7			X	
	8				X
Oiseaux	1	X			
	2				X
	3			X	
	4				X
	5	X			
	6				X
	7				X
	8			X	
Chant	1				X
	2	X			
	3				X
	4				X
	5			X	
	6			X	
	7				X
	8	X			
Ronronnements	1	X			
	2	X			
	3				X
	4				X
	5	X			
	6				X
	7				X
	8				X
Aboiements	1				X
	2	X			
	3				X
	4	X			
	5				X
	6			X	

Figure 3. Tableau récapitulatif analyse des oscillations en fonction des retours sonores

Si l'on met en regard ces observations avec les classements des préférences exprimées par les participants (Figure 4), celles-ci mettent en évidence une préférence pour réaliser le maintien de posture avec un retour sonore (sauf pour le participant 8), à l'exception du retour sonore "Aboiements" non apprécié par la majorité des participants.

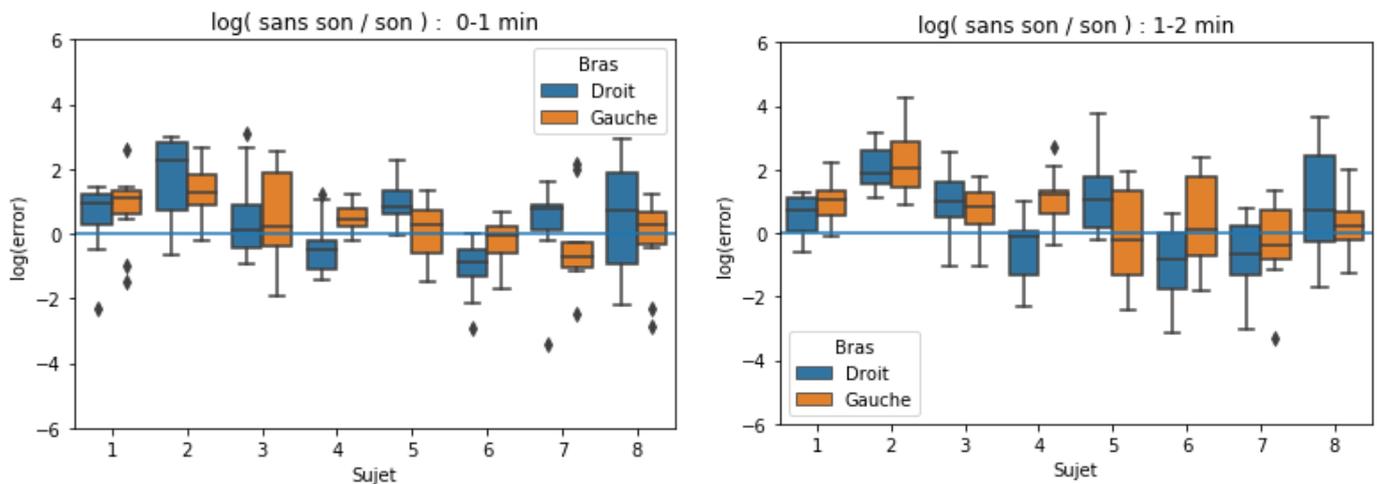
On remarque néanmoins que les participants ont eu majoritairement une préférence pour le retour sonore "Chant" alors que les oscillations de posture avec celui-ci ne sont pas toujours améliorées, tandis que les oscillations avec le retour sonore "Aboiements" contexte sonore majoritairement non apprécié, à l'exception du participant 7, ont dans certains cas eu tendance à diminuer (participants 2 et 4).

	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5	Sujet 6	Sujet 7	Sujet 8
Oiseaux	2	3	4	3	1	5	2	3
Ronronnement	3	4	3	4	3	3	3	5
Sans son	4	5	5	6	6	4	6	1
Aboiements	5	6	6	5	5	6	1	6
Chant	1	1	2	1	4	2	4	2
Rivière	6	2	1	2	2	1	5	4

Figure 5. Classement des retours sonores par ordre de préférence

Ainsi, les préférences sonores ne semblent pas toujours nécessairement en lien avec les performances réalisées.

Si l'on s'intéresse strictement à la comparaison des performances réalisées sans son par rapport à celles réalisées avec un retour sonore, on remarque qu'il y a moins d'oscillations de posture en présence de retours sonores dans la majorité des cas (Figures 6a et 6b). Néanmoins, ce constat n'est pas retrouvé pour l'ensemble des participants (notamment le participant 6), et peut varier en fonction du bras ou de la temporalité considéré (participants 4 et 7).



Annexe II. Déclaration de conformité avec les normes européennes Capteurs RIoT

Declaration of Conformity

Plux-Wireless Biosignals, SA

Zona industrial das Corredouras, Lt. 14, 1º
2630-369 Arruda dos Vinhos – Portugal
Tel: +351 263 978 572 | Fax: +351 263 240 902

Declare under our sole responsibility that the Brand:

Product Name: BITalino R-IoT

Is designed for life science research and educational purposes.

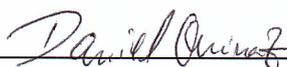
Is not intended for the diagnosis, mitigation, treatment, or prevention of diseases.

It is not a medical device.

BITalino R-IoT is complying the essential requirements of the following directives, if applied in accordance with the manufacturer specifications:

- Radio Equipment Directive 2014/53/EU Article 3.1(a) Safety e Health Standards
- Radio Equipment Directive 2014/53/EU Article 3.1(b) Electromagnetic Compatibility
- Radio Equipment Directive 2014/53/EU Article 3.2 Efficient use of Spectrum Standards
- Rohs Directive 2011/65/EU

Submitted July 24, 2020



Daniel Quinaz
Operation, Production and Quality Director
PLUX – Wireless Biosignals, SA

Headquarters

Zona Ind. das Corredouras, Lote 14 - 1º
2630-369 Arruda dos Vinhos | PORTUGAL
T +351 263 978 572 | F +351 263 240 902

Lisbon Office

Av. 5 de Outubro, 70 - 2º
1050-059 Lisboa | PORTUGAL
T +351 211 956 542 | F +351 211 956 546

Annexe III. Notice Dispositif CoMo Rééducation (mise en forme par Suzanne Saint-Cast)



CoMo Rééducation

Notice d'utilisation

Introduction

CoMo Rééducation est un dispositif d'auto-rééducation du membre supérieur par la sonification du mouvement. Le dispositif propose trois types d'exercices :

1. Des exercices de maintien de posture (exercice « Statique »)
2. Des exercices de répétition de mouvements d'un point de départ à un point d'arrivée (exercice « Dynamique »)
3. Des exercices de reproduction d'une séquence sonore (exercice « Memory ») en vous déplaçant sur un support

Pour chacun de ces trois types d'exercices, il est possible de choisir différents retours sonores pour accompagner le geste, ainsi que différents niveaux de difficulté. Le choix des exercices, des retours sonores et de la difficulté peut être libre, ou décidé par le thérapeute référent.

Les données de mouvement font l'objet d'un enregistrement, permettant ainsi d'observer les évolutions dans la rééducation.

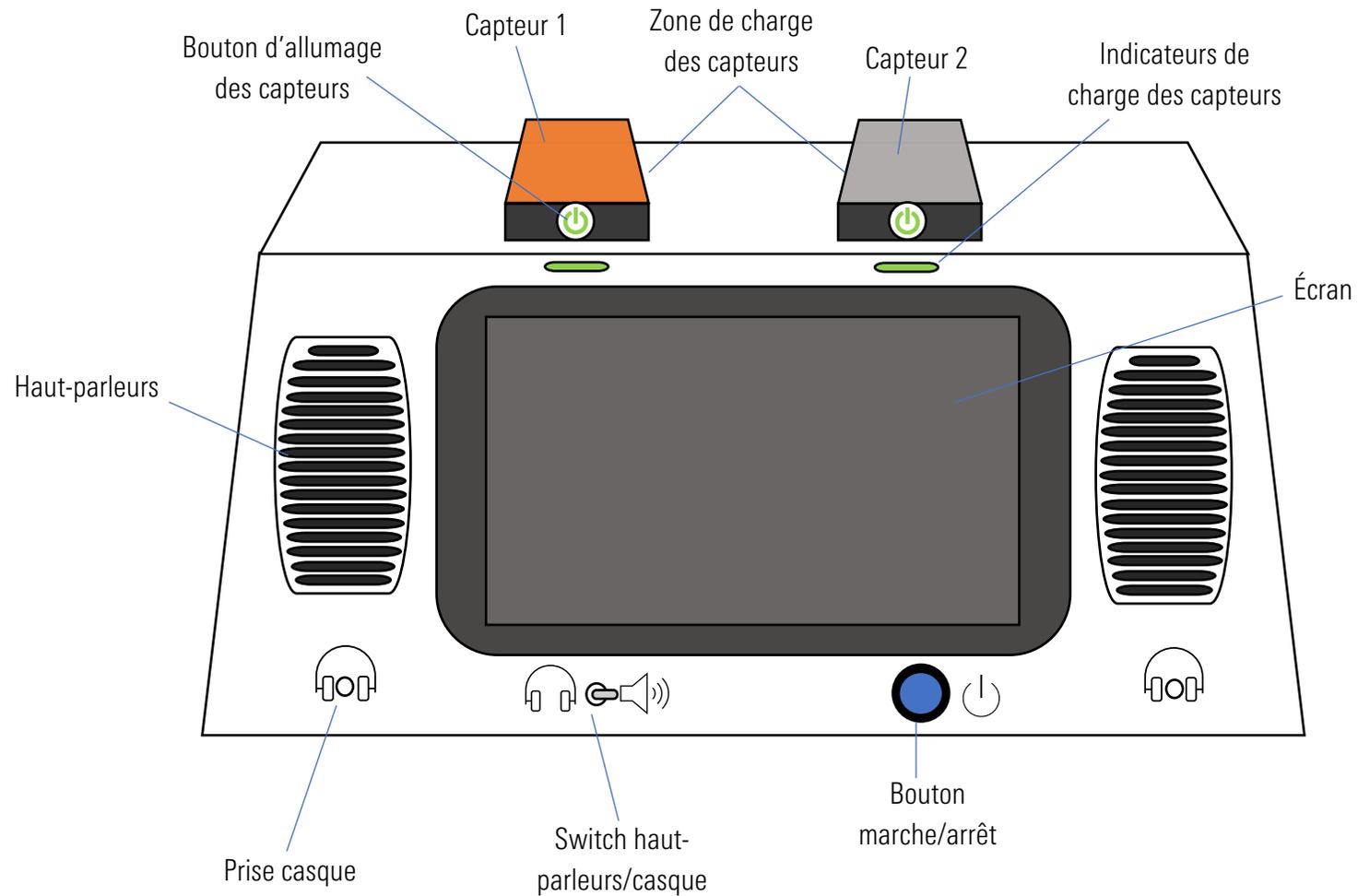
Sommaire

Introduction	2
Sommaire	3
Matériel	4
Description	5
Mise en place	6
Cotations de début et fin de session	7
Menu principal	8
Choix de l'exercice	9
Choix du son	10
Niveaux de difficulté	11
Calibration	12
Déroulé des exercices	14
Cotations	15
Terminer la session	16

Matériel

- 1 boîte CoMo Rééducation avec câble d'alimentation
- 1 rallonge électrique
- 1 boîtier orange (capteur de mouvement 1)
- 1 boîtier gris (capteur de mouvement 2)
- 2 brassards auto-agrippant
- 1 support plastifié pour l'exercice de memory

Description



Mise en place

Disposer la boîte sur une table ou un plan de travail, dans un espace suffisamment spacieux pour effectuer différents mouvements.

Brancher le câble d'alimentation de la boîte. Au bout de quelques secondes, celle-ci s'allume automatiquement.

A l'écran, le message « Jour 1 » apparaît, ainsi qu'un symbole ▷. Pour commencer une séance, cliquer sur l'écran.

Allumage et positionnement des capteurs

Appuyer sur le bouton poussoir ☺ pour allumer les capteurs : les voyants des boutons s'allument en vert. Sur l'écran, les indicateurs passent du rouge au vert, signe que les capteurs ont bien été détectés par la boîte. Appuyer sur « Continuer ».

Pour mettre en place les capteurs, enfiler les brassards :

- Le capteur 1, **orange**, se positionne sur le haut du bras.
- Le capteur 2 : **gris**, se positionne sur l'avant-bras

Les capteurs doivent être positionnés face colorée visible, et les LED (boutons poussoir) vers l'épaule. Ils doivent être alignés l'un avec l'autre.

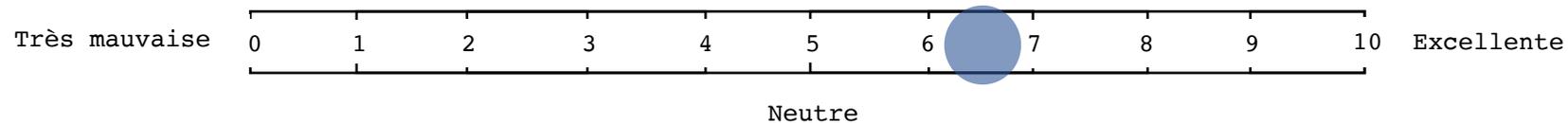
Un tutoriel vidéo peut être consulté (cf. coin supérieur droit de l'écran). Une fois les capteurs fixés, appuyer sur « Continuer ».

Cotations de début et fin de session

Au début et à la fin de chaque nouvelle séance de travail, plusieurs questions vous seront posées, notamment sous la forme d'échelles de 0 à 10. Elles visent à évaluer votre humeur et état émotionnel du moment, votre fatigue, et vos douleurs.

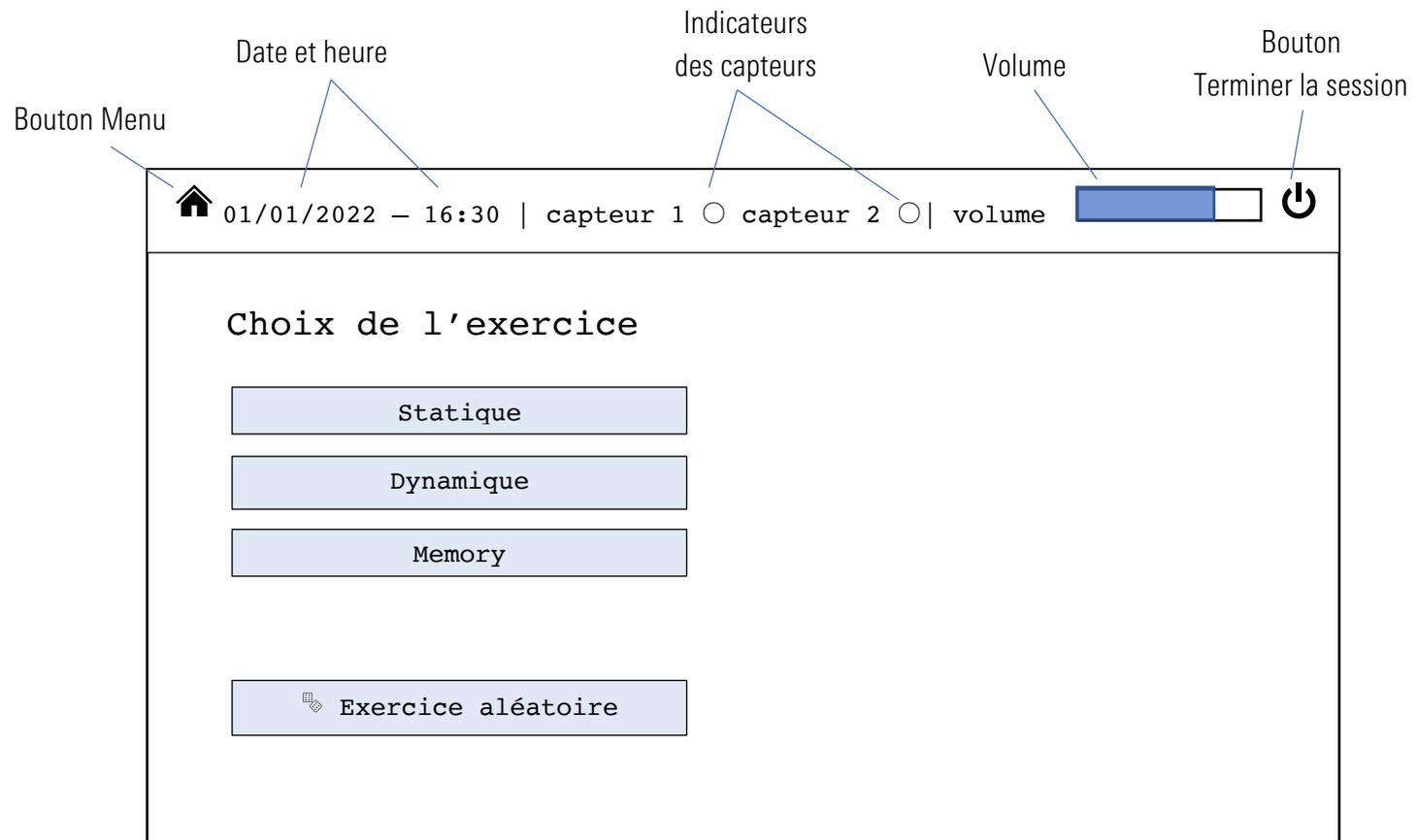
Pour transmettre votre ressenti, cliquez sur l'échelle à la valeur qui vous semble représentative de votre état. Il est possible de cliquer entre deux nombre entiers (par exemple 6,5), l'échelle prend en compte les valeurs décimales.

Évaluez votre humeur à cet instant



Si vous ressentez une douleur, vous pouvez la localiser dans une partie du corps en cliquant sur le pictogramme  sur la zone concernée.

Menu principal



Choix de l'exercice

Trois types d'exercices vous sont proposés :

- L'**exercice statique** est un exercice de maintien d'une posture de référence. Le volume du retour sonore choisi pour accompagner l'exercice pourra varier en fonction de vos oscillations de posture par rapport à la référence enregistrée avant de démarrer chaque exercice (calibration). L'importance de la variation de volume sonore dépendra de la sensibilité du dispositif aux oscillations de posture, variable en fonction du niveau de difficulté choisi (facile, moyen, difficile).
- L'**exercice dynamique** est un exercice de répétition de mouvements d'un point de départ à un point d'arrivée. Le déclenchement et l'apparition des sons associés aux points de départ et d'arrivée dépendront de la modalité d'interaction geste-son. Il existe trois modalités : (1) la présence permanente des sons 1 (point de départ) et 2 (point d'arrivée) alternant en fonction de votre position (**Son 1 >< Son 2**), (2) la présence du son avec un volume fort seulement à l'approche de la position d'arrivée (**son 1 < SON 2**), (3) la présence de sons uniquement lorsque vous bougez et le silence en cas d'arrêt (**Mvt ↔ Son**).
- Le **memory** est un exercice de reproduction d'une séquence sonore par le déplacement du bras sur un support. Le niveau de difficulté dépend de la longueur de la séquence à reproduire.

En cliquant sur l'une des trois options, un aperçu vidéo s'affiche sur la droite de l'écran. Le bouton « Exercice aléatoire » sélectionne aléatoirement un des trois exercices. Pour valider votre choix, cliquer sur « Continuer ».

Choix du son

Une fois l'exercice choisi, vous pouvez sélectionner le retour sonore souhaité. Les retours sonores sont organisés en catégories. En cliquant sur l'une de ces catégories, les sons proposés s'affichent. Cliquer sur ► pour entendre un aperçu du son.

Voici la liste des musiques et sons disponibles pour chaque exercice :

Statique

- **Musique d'ambiance** : Électro 1 | Électro 2 | Ambient | Instrumental
- **Nature** : Forêt | Mer | Nuit
- **Urbain** : Gare | Marché
- **Extraits musicaux** : Classique | Jazz | Pop | Latino | Relaxation

Dynamique

- **Mono-thématique** : Electro1/Electro2 | Forêt | Mer
- **Bi-thématique** : Ambiance/Nature | Forêt/Électro | Gare/Mer

Memory

- **Électro** : Électro
- **Nature** : Forêt | Nuit | Mer
- **Urbain** : Gare | Marché

Pour chaque exercice, il est possible de cliquer sur « Son aléatoire » – un retour sonore sera sélectionné aléatoirement – ou de choisir l'option « Sans son ».

Niveaux de difficulté

Une fois le type d'exercice et le retour sonore choisis, il reste à déterminer le niveau de difficulté – dans le cas de l'exercice statique et du memory – et la modalité d'interaction geste-son dans le cas de l'exercice dynamique. Chaque niveau ou modalité sont détaillés ci-dessous :

Statique

- Facile :
- Moyen :
- Difficile :

Dynamique

- **Son 1 >< Son 2** : Les sons 1 (point de départ) et 2 (point d'arrivée) alternent en fonction de votre position
- **son 1 < SON 2** : Les sons 1 (point de départ) et 2 (point d'arrivée) alternent en fonction de votre position ; en position de départ, le volume est minimal et n'atteint son maximum qu'à l'approche de la position d'arrivée. Ce mode encourage à aller au bout de **l'amplitude du mouvement**.
- **Mvt ↔ son** : Les sons 1 (point de départ) et 2 (point d'arrivée) alternent en fonction de votre position, uniquement lorsque vous êtes en mouvement. En cas d'interruption du mouvement, il y a du silence. Ce mode encourage le **mouvement continu**.

Memory

- **Facile** : la séquence à mémoriser comporte **3** sons
- **Moyen** : la séquence à mémoriser comporte **5** sons
- **Difficile** : la séquence à mémoriser comporte **7** sons

Les niveaux de difficultés peuvent être paramétrés par le thérapeute et donc différer des valeurs par défaut présentées ci-dessus.

Calibration

Exercice statique

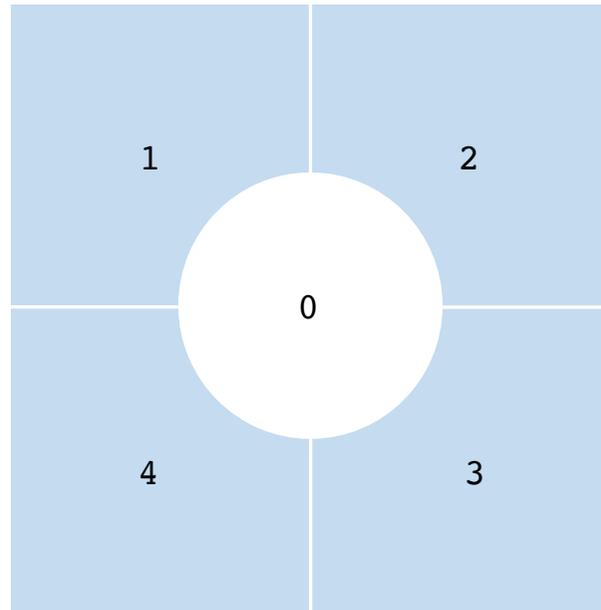
1. Choisissez votre posture.
2. Pour enregistrer la posture de référence, positionnez votre bras comme souhaité, cliquez sur « Enregistrer la posture », et maintenez la position pendant l'enregistrement.
3. Vous pouvez évaluer la calibration avant de commencer l'exercice. Si besoin, cliquez sur « Recommencer la calibration ». Si elle vous convient, cliquez sur « Démarrer l'exercice ».

Exercice dynamique

1. Choisissez votre mouvement. Vous pouvez effectuer un geste de la vie quotidienne, par exemple porter votre main à votre bouche.
2. Pour la calibration, il faut enregistrer à la fois la position de départ du mouvement (par exemple, main sur la table) et la position d'arrivée du mouvement (par exemple, main devant la bouche). Positionnez votre bras en position de départ, cliquez sur « Enregistrer la position de départ », et maintenez la posture pendant l'enregistrement. Répétez l'opération avec la position d'arrivée.
3. Vous pouvez évaluer la calibration avant de commencer l'exercice. Si besoin, cliquez sur « Recommencer la calibration ». Si elle vous convient, cliquez sur « Démarrer l'exercice ».

Exercice memory

1. Munissez-vous du support du memory, et positionnez-le à plat sur une surface. Il est aussi possible de l'installer sur un plan vertical, accroché à un mur par exemple.
2. Placez votre main sur la position 0 du support, dans le cercle central, cliquez sur « Enregistrez votre position 0 » et maintenez la position. Répéter l'opération avec les positions 1 à 4.
3. Vous pouvez évaluer la calibration avant de commencer l'exercice, en déplaçant votre main sur chaque zone. Si besoin, cliquez sur « Recommencer l'enregistrement ». Si la calibration vous convient, cliquez sur « Jouer ».



Déroulé des exercices

Statique

Objectif : maintenir la posture de référence, notamment à l'aide du retour sonore. Si le son diminue, vous vous éloignez de votre position de référence.

Un chronomètre affiche la durée écoulée. Une fois arrivé à la durée souhaitée, cliquez sur « Fin de l'exercice ».

Dynamique

Objectif : répéter un mouvement entre deux positions, entendre successivement le son 1 et le son 2

Un chronomètre affiche la durée écoulée. Une fois arrivé à la durée souhaitée, cliquez sur « Fin de l'exercice ».

Memory

Objectif : reproduire une séquence de sons en se déplaçant sur un support.

Cotations

Après chaque exercice, plusieurs questions vous sont posées sous forme de cotations (échelles de 0 à 10). Il s'agit d'évaluer :

- Votre performance à l'exercice : pensez-vous avoir atteint l'objectif de l'exercice ?
- Le niveau de difficulté de cet exercice : trouvez-vous cet exercice simple ou difficile, indépendamment de votre performance ?
- Votre appréciation du retour sonore : que pensez-vous du son, indépendamment de l'exercice ?
- L'adéquation du retour sonore avec l'exercice : pensez-vous que le son accompagne bien l'exercice ?

Terminer la session

1. Lorsque la séance est terminée, cliquer sur « Terminer la session ». Un récapitulatif des exercices réalisés est affiché à l'écran. Si besoin, il est possible de cliquer sur « Commentaires » pour écrire des remarques, sinon cliquer sur « Terminer ».
2. Répondre aux cotations d'humeur, de fatigue et de douleur (cf. page 7) et cliquer sur « Continuer ».
3. Éteindre les capteurs en appuyant sur le bouton presseur .
4. Placer les capteurs sur leurs plateformes de chargement. Les voyants indicateurs de charge deviennent verts.
5. Cliquer sur « Éteindre ».

Annexe IV. Carnets de bord, évaluation fonctionnelle du dispositif

Validation technique dispositif sonification du mouvement à domicile

Carnet de bord

Vous allez réaliser pendant 6 jours une séance quotidienne constituée de 8 exercices :

- Deux exercices de maintien de posture (exercice « statique ») : avec un extrait musical, et un extrait sonore
- Trois exercices de répétition de mouvements (exercice « dynamique ») : avec le même extrait sonore mais 3 modalités d'interactions différentes entre le geste et le son, à savoir la présence de sons uniquement lorsque vous bougez et le silence en cas d'arrêt (« Moove »), la présence des sons 1 et 2 en fonction de la position (« All »), ou la présence du son avec un volume fort seulement à la position d'arrivée (« Max »)
- Trois exercices de mémorisation d'une séquence sonore (exercice « memory ») : avec le même extrait sonore mais 3 niveaux de difficultés différents, à savoir une séquence de 3 sons à reproduire pour le niveau facile, une séquence de 5 sons à reproduire pour le niveau intermédiaire, et une séquence de 7 sons à reproduire pour le niveau difficile.

L'ordre de présentation des exercices est tiré au sort et va varier quotidiennement, de même que les retours sonores proposés.

Vous réaliserez les exercices avec votre bras GAUCHE.

Mode d'emploi :

0. Noter le jour, et l'heure de début de séance
1. Brancher la boîte et l'allumer
2. Suivre les indications inscrites sur l'écran (allumage des capteurs, placement sur le bras/avant-bras, cotations de début de séance, exercice)
3. Pour chaque exercice : réaliser les calibrations (= enregistrement des références de positions) puis les exercices pendant **1 minute**. Arrêter l'exercice une fois la minute écoulée, réaliser les cotations sur l'écran et compléter le carnet avant de réaliser l'exercice suivant.
4. Lorsque les 8 exercices quotidiens ont été réalisés : terminer la session, remplissez les cotations, et suivez les instructions (éteindre les capteurs, les placer sur les plateformes de chargement, éteindre la boîte, laisser les capteurs se recharger environ 20 minutes avant de débrancher la boîte).
5. Noter vos éventuelles remarques / commentaires et l'heure de fin de séance

Un problème pendant la séance ? Reporter le code alphabétique dans votre carnet de bord pour connaître sa nature, et donner quelques précisions sur ce que vous observez.

Eventuels problèmes rencontrés pendant la séance / Remarques :

- A. Allumage Boîte
- B. Erreur Jour indiqué sur la page de démarrage
- C. Date et heures affichées ne correspondant pas à la date du jour
- D. Allumage Capteurs / Reconnaissance statut ON-OFF
- E. Placement Capteurs sur le membre
- F. Problème chargement exercice
- G. Absence de son (après ajustement volume et vérification du mode audio utilisé : switch en façade)
- H. Bug / Crash : préciser le moment de survenu (horaire et sur quelle page de navigation) et la nature (navigation bloquée, « socket error », relancer l'application, ou « Actualiser »)
- I. Plateforme rechargement des capteurs
- J. Autres, préciser

JOUR 1

Date :

Heure Début :

Exercices réalisés : Préciser l'exercice (statique, dynamique, mémoire), le retour sonore et si possible le niveau de difficulté (sensibilité aux oscillations pour l'exercice statique, longueur de la séquence pour le memory) ou modalité de couplage pour le dynamique (sons présents seulement lorsque bouge, son 1 et son 2 présents, volume son du point de départ faible)

1)

2)

3)

4)

5)

6)

7)

8)

Eventuels problèmes rencontrés pendant la séance :

Commentaires / Remarques :

Heure Fin séance :

Evaluation dispositif sonification du mouvement à domicile

Carnet de bord_Utilisation Libre

Vous allez réaliser pendant 5 jours une séance quotidienne constituée de trois types d'exercices :

- Des exercices de maintien de posture (exercice « statique »), au cours desquels le volume du retour sonore choisi pour accompagner l'exercice pourra varier en fonction de vos oscillations de posture par rapport à une référence que vous enregistrerez avant de démarrer chaque exercice (calibration).
L'importance de la variation de volume sonore dépendra de la sensibilité du dispositif aux oscillations de posture, variable en fonction du niveau de difficulté que vous sélectionnerez (facile, moyen, difficile).
- Des exercices de répétition de mouvements d'un point de départ à un point d'arrivée (exercice « dynamique »), au cours desquels le déclenchement et l'apparition des sons associés aux points de départ et d'arrivée dépendront de la modalité d'interaction geste-son. Les modalités d'interactions geste-son sont les suivantes : la présence de sons uniquement lorsque vous bougez et le silence en cas d'arrêt (Mvt→Son), la présence permanente des sons 1 (point de départ) et 2 (point d'arrivée) alternant en fonction de votre position (Son 1 >< Son 2), ou la présence du son avec un volume fort seulement à l'approche de la position d'arrivée (son 1 < SON 2).
- Des exercices de reproduction d'une séquence sonore (« Memory ») en vous déplaçant sur un support. Le niveau de difficulté dépend de la longueur de la séquence à reproduire (Facile : séquence de 3 sons, Moyen : séquence de 5 sons, Difficile : séquence de 7 sons).

Vous réaliserez les exercices dans l'ordre de votre choix avec votre **bras NON DOMINANT**.

Pour l'exercice statique : chaque jour, vous choisirez la posture et le retour sonore de votre choix, et réaliserez l'exercice au moins une fois avec chaque niveau de difficulté.

Vous pourrez répéter autant de fois que vous le souhaitez cet exercice.

Pour l'exercice dynamique : vous pourrez faire varier chaque jour le geste que vous réaliserez et le son associé, et réaliserez l'exercice au moins une fois avec chaque modalité d'interaction geste-son. Vous pourrez répéter autant de fois que vous le souhaitez cet exercice.

Pour l'exercice Memory : chaque jour vous réaliserez l'exercice avec le retour sonore de votre choix avec chaque niveau de difficulté.

Mode d'emploi :

0. Noter le jour, et l'heure de début de séance
1. Brancher la boîte (celle-ci s'allume seule après un délai après branchement)
2. Suivre les indications inscrites sur l'écran (allumage des capteurs, placement sur le bras/avant-bras, cotations de début de séance, exercice)
3. Pour chaque exercice : réaliser les calibrations (= enregistrement des références de positions) puis les exercices pendant **1 minute**. Arrêter l'exercice une fois la minute écoulée, réaliser les cotations sur l'écran et compléter le carnet avant de réaliser l'exercice suivant.
4. Lorsque les exercices quotidiens ont été réalisés : terminer la session, remplissez les cotations, et suivez les instructions (éteindre les capteurs, les placer sur les plateformes de chargement dans le sens indiqué sur la photo : coque colorée visible, éteindre la boîte, laisser les capteurs se recharger environ 20 minutes avant de débrancher la boîte).
5. Noter vos éventuelles remarques / commentaires et l'heure de fin de séance

Un problème pendant la séance ? Reporter le code alphabétique dans votre carnet de bord pour connaître sa nature, et donner quelques précisions sur ce que vous observez.

Eventuels problèmes rencontrés pendant la séance / Remarques :

- A. Allumage Boîte
- B. Erreur Jour indiqué sur la page de démarrage
- C. Date et heures affichées ne correspondant pas à la date du jour
- D. Allumage Capteurs / Reconnaissance statut ON-OFF
- E. Placement Capteurs sur le membre
- F. Problème chargement exercice
- G. Absence de son (après ajustement volume et vérification du mode audio utilisé : switch en façade)
- H. Bug / Crash : préciser le moment de survenu (horaire et sur quelle page de navigation) et la nature (navigation bloquée, « socket error », relancer l'application, ou « Actualiser »)
- I. Plateforme rechargement des capteurs
- J. Autres, préciser

NOM :

Evaluation Dispositif de sonification du mouvement à domicile

Journal de Bord

Date : Heure début séance :	Activités réalisées	Observations/Remarques/Commentaires (Difficultés rencontrées, crash dispositif, navigation interface, utilisation capteurs, exercices, retour sonore, appréciation,...)
Heure fin séance :	<p>Exercice Statique réalisé fois SON CHOISI :</p> <p>DESCRIPTION DE LA POSTURE :</p> <p>Niveau Facile réalisé fois Moyen réalisé fois Difficile réalisé fois</p> <p>Exercice Dynamique réalisé fois SON CHOISI :</p> <p>DESCRIPTION DU MOUVEMENT :</p> <p>Niveau Son 1 >< Son 2 réalisé fois son 1 < SON 2 réalisé fois Mvt→Son réalisé fois</p> <p>Exercice Memory réalisé Fois SON CHOISI :</p> <p>Niveau Facile réalisé fois Moyen réalisé fois Difficile réalisé fois</p>	

Annexe V. Programme quotidien participants

Programme Utilisateur 1

	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3	Exercice 4
JOUR 1	Statique Elec Difficile	Dynamique MonoForêt Moove, All, Max	Mémory Marché (F/D/M)	Statique Tracks Reggae Facile
JOUR 2	Statique Tracks Latino Moyen	Statique Amb Difficile	Mémory Foret (D/M/F)	Dynamique MonoMer Max, All, Moove
JOUR 3	Mémory Elec (M/F/D)	Dynamique Mono Elec Moove, Max, All	Statique Tracks Jazz Facile	Statique Sound Gare Facile
JOUR 4	Statique Tracks Classique Facile	Statique Forêt Difficile	Mémory Mer (M/D/F)	Dynamique Bi-thématique Amb Max, All, Moove
JOUR 5	Statique Mer Difficile	Mémory Nuit (F/D/M)	Dynamique Bi-Thématique ForElec All, Max, Moove	Statique Tracks Relax Moyen
JOUR 6	FREE	FREE	FREE	FREE
JOUR 7	Statique Tracks Pop Facile	Dynamique Bi-Thématique Gare-Mer Moove, Max, All	Mémory Gare (F/D/M)	Statique Nuit Moyen

Programme Utilisateur 2

	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3	Exercice 4
JOUR 1	Dynamique Bi-Thématique Gare-Mer Max, All, Moove	Statique Tracks Jazz Moyen	Statique Gare Facile	Mémoire Marché D/F/M
JOUR 2	Mémoire Elec D/F/M	Statique Mer Difficile	Statique Tracks Reggae Difficile	Dynamique Mono-Thém. Forêt Moove, Max, All
JOUR 3	Statique Tracks Classique Difficile	Dynamique Mono-Thém. Mer All, Moove, Max	Statique Amb Moyen	Memory Forêt D/M/F
JOUR 4	Statique Tracks Latino Moyen	Statique Elec1 Difficile	Memory Gare M/F/D	Dynamique Bi-Thém. Forêt-Elec Moove, All, Max
JOUR 5	Dynamique Bi-Thém. Amb All, Max, Moove	Mémoire Nuit D/F/M	Statique Tracks Pop Facile	Statique Nuit Facile
JOUR 6	Statique Forêt Moyen	Statique Tracks Relax Moyen	Mémoire Mer F/D/M	Dynamique Mono-Thém. Elec Max, Moove, All

Programme Utilisateur 3

	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3	Exercice 4
JOUR 1	Statique Gare Facile	Dynamique Mono-Thém Elec Moove/Max/All	Statique Tracks Pop Facile	Memory Gare Fac/Diff/Moy
JOUR 2	Statique Elec Facile	Memory Elec Fac/Moy/Diff	Dynamique Bi-Thématique Forêt-Elec Max/Moove/All	Statique Tracks Classique Moyen
JOUR 3	Dynamique Mono-Thém Mer All/Moove/Max	Statique Tracks Jazz Moyen	Memory Nuit Fac/Diff/Moy	Statique Amb Moyen
JOUR 4	Memory Mer Fac/Moye/Diff	Statique Tracks Relaxation Difficile	Dynamique Bi-Thém Ambiance Moove/All/Max	Statique Nuit Facile
JOUR 5	Dynamique Bi-Thém Gare-Mer All/Moove/Max	Statique Tracks Latino Facile	Statique Mer Facile	Memory Forêt Moy/Fac/Diff
JOUR 6	Statique Tracks Reggae Difficile	Statique Forêt Moyen	Memory Marché Moy/Fac/Diff	Dynamique Mono-Thém Forêt Moove/Max/All

Exercices dynamiques

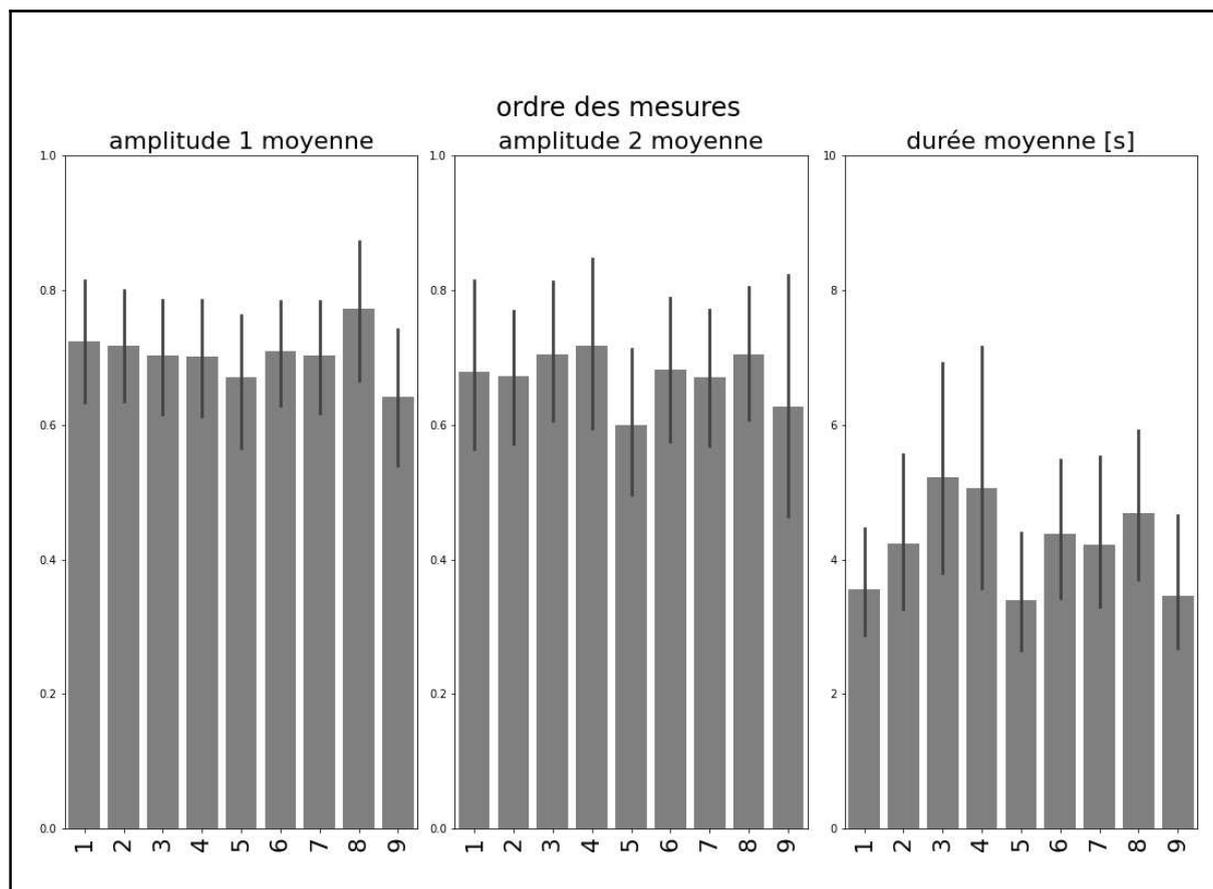


Figure S5.1 Représentation de la durée moyenne et des amplitudes par rapport au point de départ (1) et d'arrivée (2) au cours des cycles de répétition de mouvements, en fonction de l'ordre de présentation des contextes sonores (modalités d'interactions et retour sonore).

Les mesures des contextes 1, 5 et 9 correspondent aux situations sans retour sonore.

Les contextes 2, 3, 4, 6, 7, 8 varient en fonction de la randomisation des conditions pour chaque participant.

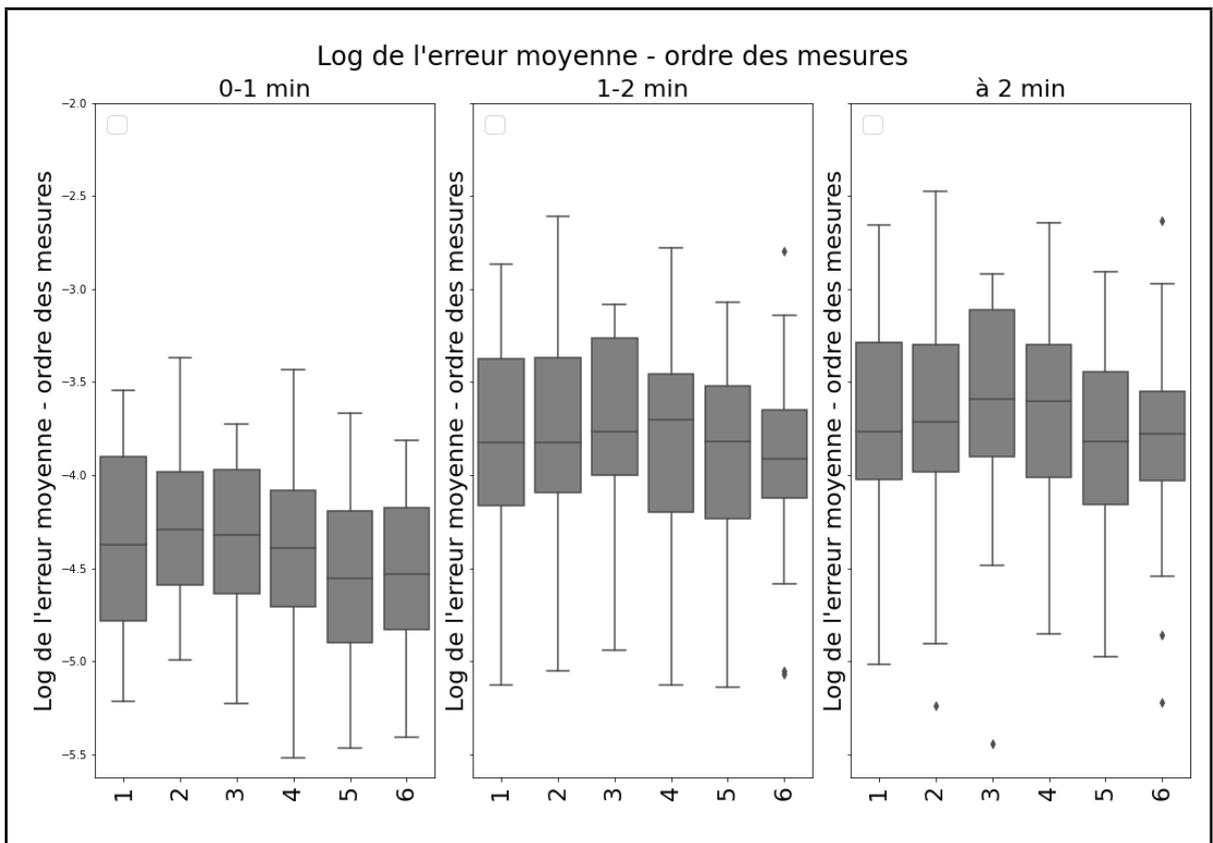


Figure S5.2 Médiane et quartiles pour le log des erreurs moyennes en fonction de l'ordre des mesures



Bien que le coefficient de corrélation de Pearson soit faible ($R = 0.32$), la pente n'est pas nulle ($p=0.00011$, pente = 0.00980, ordonnée à l'origine = -4.21), confirmant la significativité de l'effet de l'âge sur le logarithme de l'*Erreur* moyenne (à savoir la déviation par rapport à la posture de référence).

Annexe VII. Guide d'entretien semi-directif, évaluations thérapeute

Guide d'entretien

Identifiant sujet :

Date et heure :

Présentation et objectifs :

Entretien proposé dans le cadre de recherches menées par l'équipe ISMM de l'IRCAM, qui vise à évaluer un dispositif de sonification du mouvement pour la rééducation des membres supérieurs de patients atteints de troubles moteurs (post AVC). L'entretien abordera les axes suivants :

- Qualité et évaluation générale du dispositif
- Mise en œuvre pratique (maniabilité de la boîte et des capteurs, navigation dans l'interface, réalisation des exercices, sonification)
- Utilité, adéquation et cohérence avec les besoins, compétences, attentes •
Améliorations, propositions complémentaires, perspectives

Cet entretien sera enregistré à des fins de retranscription et d'analyse.

Questions :

- Pour commencer, que voudriez-vous me dire à propos de ce dispositif ? (Que vous évoque ce projet ?)
- Quel(s) élément(s) du projet vous ont intéressé ? ont retenu votre attention ? •

Comment qualifieriez-vous le projet/l'expérience ?

QUESTIONNAIRE F-SUS

Boîte :

- Pourriez-vous proposer des qualificatifs pour décrire cet objet ?
- Avez-vous des remarques concernant le transport, le maniement, l'installation de la boîte ? (Avez-vous rencontré des difficultés ?)
- Avez-vous laissé la boîte à un endroit fixe durant toute la semaine de test ? L'avez-vous rangée lorsque vous ne l'utilisiez pas ? (Quel encombrement a-t-elle représenté ?)

Capteurs :

- Que pensez-vous du mode d'attache des capteurs ? (Quel intérêt avez-vous trouvé à ce mode d'attache ?)
- Avez-vous rencontré des difficultés pour positionner/fixer les capteurs ? / Trouvez-vous que les capteurs se fixent facilement ?
- Pensez-vous que les patients rencontreraient des difficultés à positionner/fixer les capteurs ?
- Envisagez-vous d'autres modes d'attache possibles ?
- Qu'avez-vous pensé de l'aspect des capteurs ? de leur forme ? des couleurs ?
- Les capteurs vous ont-ils gêné lors des exercices/de la séance ? / (Pensez-vous que les capteurs soient adaptés à la réalisation des exercices ?)

• Instructions/interface :

- L'interface de navigation vous a-t-elle semblé agréable/attractive ou à l'inverse fade/rebutante ? (fastidieuse ?)
- Avez-vous rencontré des difficultés dans la navigation sur l'interface ?
- Avez-vous remarqué des incohérences ? des redondances ?
- Le délai de réponse de l'interface vous a-t-il semblé correct ?
- Les instructions d'utilisation présentées dans l'interface vous ont-elles paru claires ? / Avez-vous rencontré des difficultés pour comprendre les instructions ? Avez-vous rencontré des problèmes pour lire les instructions ?
- Pensez-vous que vos patients rencontreraient des difficultés à saisir les instructions ?

• Retours sonores :

- Avez-vous préféré certains retours sonores ?
- Certains retours sonores vous ont-ils déplu ? gêné ?
- Auriez-vous aimé entendre certains sons/extraits musicaux ?
- Trouvez-vous que les sons accompagnent bien les exercices ? (Pensez-vous que les types de retours sonores sont adaptés aux exercices ?)
- Avez-vous trouvé que certains retours sonores aidaient à la réalisation de l'exercice ? (de quelle manière ? → attention ? motivation ? volition ?) / La présence de certains sons a-t-elle rendu l'exercice plus difficile ? Vous a-t-elle gêné ?
- Préciser pour chaque exercice, en particulier dynamique : (Qu'avez-vous pensé des modalités d'interactions entre vos gestes et les sons ? Dans certains cas, la modalité d'interaction était-elle inadaptée ? ou à l'inverse le son suivait naturellement votre geste ?)
- Que pensez-vous de la qualité des retours sonores de façon générale ?
- Avez-vous utilisé les différentes modalités d'écoute (casque et haut-parleurs) ? Si oui, avez-vous préféré l'une ou l'autre de ces modalités ?

• Exercices :

- Avez-vous préféré un ou plusieurs exercice(s), et pourquoi ?
- Certains exercices vous ont-ils gêné / semblé pénibles ? Pourquoi ?
- A l'inverse, certains exercices vous ont-ils semblé bien adaptés ? amusants/ludiques ?
- Avez-vous trouvé les consignes claires ? Avez-vous rencontré des difficultés pour comprendre les consignes des exercices ?
- Trouvez-vous les consignes trop contraignantes ? Pas assez contraignantes ?
- Qu'avez-vous pensé des niveaux de difficulté proposés ? Vous ont-ils semblé adaptés ? trop facile ? trop difficile ?
- Avez-vous rencontré des difficultés dans la réalisation des exercices ?
- Que pensez-vous des échelles à renseigner après chaque exercice ?
- Auriez-vous aimé avoir un feedback (en dehors du retour sonore) sur les performances ? Pensez-vous qu'il soit pertinent de proposer à vos patients un feedback sur leurs performances ?

• Utilité/Usages :

- Avez-vous trouvé les exercices pertinents pour la rééducation motrice de patients atteints d'hémiplégie ? pour des patients victimes d'autres troubles ?
- Proposeriez-vous d'autres exercices ?
- Auriez-vous envie d'utiliser la boîte avec vos patients dans le cadre de séances de rééducation ? Dans quel contexte vous semblerait-il pertinent, utile et intéressant de l'utiliser ? (environnement hospitalier ? à domicile ? autres cadres thérapeutiques ?)
- Pensez-vous que des patients auraient envie d'utiliser ce dispositif ? (conviendrait/plairait à un profil spécifique de patients ?)
- Quelle place (spatiale, temporelle, fonctionnelle, symbolique) pourrait occuper le dispositif dans le parcours de soin ?
- Que pensez-vous être les effets de l'utilisation de ce dispositif ? Concernant quel(s) aspect(s) pourrait-il être bénéfique ? A quelle(s) étape(s) de la rééducation ?
- Pensez-vous que le dispositif convienne pour un usage en autonomie des patients ?
- Pensez-vous qu'une bonne utilisation du dispositif nécessite un temps d'apprentissage ?
- Pensez-vous que l'utilisation du dispositif évolue avec le temps ?
- Quels éléments voudriez-vous pouvoir paramétrer ?
- Avez-vous des améliorations à proposer ?
- Quel intérêt trouvez-vous à utiliser un objet comme celui-ci plutôt qu'un smartphone ?
- Voyez-vous un intérêt particulier au fait que le dispositif soit présenté sous forme de boîte ?
- Quelles défauts/limites avez-vous constaté ?

• Synthèse :

- Comment parleriez-vous de ce dispositif à votre entourage ? Comment le présenteriez-vous à vos collègues ?
- Conseilleriez-vous la boîte à des professionnels de santé ? à des patients ?
- D'autres remarques/commentaires ?

Annexe VIII. Questionnaire F-SUS, évaluation thérapeutes

F-SUS

Identifiant Participant :

Date :

	pas du tout d'accord			tout à fait d'accord	
1. Je voudrais utiliser ce dispositif fréquemment.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Ce dispositif est inutilement complexe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Ce dispositif est facile à utiliser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce dispositif.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Les différentes fonctionnalités de ce dispositif sont bien intégrées.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. Il y a trop d'incohérences dans ce dispositif.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. La plupart des gens apprendront à utiliser ce dispositif très rapidement.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Ce dispositif est très lourd à utiliser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Je me suis senti·e très en confiance en utilisant ce dispositif.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce dispositif.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Annexe IX. Questionnaire AttrakDiff, évaluation thérapeutes

