

AXE SON/MUSIQUE & SANTÉ de l'UMR STMS

Effectif		Diffusion scientifique		Projets et contrats		Collaborations scientifiques	Collaborations cliniques
Chercheurs et ingénieurs statutaires	12	Revue à comité de lecture	N	Nationaux et régionaux PSYSON, PHRIP (2022-2023) ELEMENT, ANR (2018-2022) Fondation pour la Vision et l'Audition INSPECTSYN, ANR JCJC / E. Ponsot (2022-2025) AVATARS, ANR-PRC (2023-2027)	N	Marine Taffou, Clara Suied, Guillaume Andéol, IRBA (FR) Lise Hobeika, Séverine Samson, UNIV. Lille (FR) Ana Tajadura-Jiménez, Universidad Carlos III de Madrid (ES) Arnaud Norena, CNRS (FR) Agne Roby Brami, ISIR (FR)	Dr Alain Londero, HEGP (FR) Pr Paul Avan, Institut de l'Audition (FR) Pr Hung Thai-Van, Institut de l'Audition (FR)
Chercheurs et ingénieurs non statutaires, invités	2	Conférences avec comité de sélection	N	Internationaux	N	Véronique Marchand-Pauvert, LIB (FR) Jean-Julien Aucouturier (FEMTO-ST, Univ. Franche-Comté) Roland Cahen (CRD ENS Paris Saclay – Ensci-Les Ateliers) Carine Delanoë-Vieux, Marie Coirie (GHU Paris Psy&Neuro, Lab-ah)	Prof Pascale Paradat-Diejl, APHP Salpetriere (FR) Elena Karpinski (psychomotricienne, GHU Paris Psy&Neuro)
Doctorants	6	Ouvrages et chapitres	N	Conventions Sounds4Care entre GHU Paris Psych.&Neurosc. (Lab-ah), Ircam, CRD ENS Paris Saclay, Institut FEMTO-ST (Cnrs) – Carine Delanoë-Vieux, co-directrice du Lab-ah – 2021-26 Contrat cadre IRBA Convention d'accueil 'doctorante invitée' entre CHU Lille (Frederic Boiron) et Ircam – 2021-23	N	Prof. Guillaume Vaiva (CHU Lille) Aude Lagier (chirurgienne) du CHU de Liège, Belgique	
Stagiaires	N	Thèses de doctorat / HDR	N			Thierry Legou (IR CNRS, LPL) - Nathalie Henrich-Bernardoni (GIPSA-Lab) Lucie Bailly (3SR) Fabrice Silva (LMA) Institut des humanités en médecine (Lausanne) IHRIM (CNRS, Lyon).	

- *Chercheurs et ingénieurs statutaires (12) : Benoit Alary (CR-IRCAM, EAC), Thibaut Carpentier (IR-CNRS, EAC), Isabelle Viaud-Delmon (DR-CNRS, EAC), Olivier Warusfel (CR-IRCAM, EAC), Frédéric Bevilacqua (DR-IRCAM, ISMM), Benjamin Matuszewski (CR-IRCAM), Nicolas Misdariis (DR-IRCAM, PDS), Patrick Susini (DR-IRCAM, PDS), Emmanuel Ponsot (CR-CNRS, PDS), Olivier Houix (CR-Ircam, PDS), Arnaud Recher (T-CNRS, PIP), Coralie Vincent (IE-CNRS, EAC/ISMM/PDS).*
- *Chercheurs et ingénieurs non statutaires, chercheurs invités (2) : Suzanne Saint-Cast (vacation Ministère de la Culture, 2022), Iseline Peyre (Ingénieure de Recherche, Collegium Musicae, SU, 2023)*
- *Doctorants (6) : Franck Elizabeth (Sorbonne Université, EAC, 2018-2022), Iseline Peyre (Sorbonne Université, ISMM, 2019-2023), Claire Richards (Sorbonne Université, PDS, 2019-2023), Nadia Guerouaou (Univ. Franche-Comté, PDS), Judith Guadalupe Ley Flores (Universidad Carlos III de Madrid, co-encadrement ISMM), Thomas Risse (Sorbonne Université, S3AM, co-encadrement LMA et LaSIE, 2022-2025).*

Contexte général : liens art et santé	4
Introduction.....	4
■ 1. Le son et la musique pour la prévention en santé et le mieux-être.....	5
1.1 Environnement auditif : travail sur l'environnement auditif pour faciliter la possibilité du soin et pour le mieux-être	5
1.1.1 Chambres acoustiques de réanimation.....	5
1.1.2 Alarmes sonores.....	6
1.2 Le son et la musique pour le mieux-être : faciliter la cohésion et les interactions sociales et favoriser les mouvements du corps.....	7
1.2.1 Cohésion et interaction sociales.....	7
1.2.2 Sonification du mouvement pour la prévention et le mieux-être.....	7
■ 2. Le son et la musique pour la prise en charge du patient.....	8
2.1 Evaluation	8
2.1.1 Troubles auditifs périphérique et/ou central	8
2.1.2 Troubles de la phonation.....	9
2.1.3 La voix comme biomarqueur.....	9
2.1.4 Troubles psychiatriques dont la symptomatologie intègre une sensibilité auditive	9
2.2 Traitement.....	10
2.2.1 Le soin / l'intervention en environnement clinique	10
2.2.2 Le soin à domicile.....	13
■ 3. Caractérisation des mécanismes neurophysiologiques, physiologiques et psychoacoustiques impliqués par l'utilisation du son et de la musique pour la santé et le mieux-être	13
3.1 Modalité sensorielle auditive	13
3.1.1 Relation entre asymétrie en sonie et force tonale (depuis 2019).....	13
3.1.2 Traitement temporel local-global en audition et ASA (depuis 2019).....	13
3.2 Intégration multisensorielle	14
3.2.1 Audition et motricité	14
3.2.2 Sonification du mouvement	15
3.2.3 Audition et vision.....	15
3.2.4 Audition et perception tactile.....	16
3.3 Modélisation de l'appareil phonatoire humain	17
3.4 Les effets de l'écoute	17
3.5 Aspect historique et musicologique.....	18
■ 4. Recensement et description des moyens techniques	18
4.2 Dispositifs	18
4.2.1 Capture du geste.....	18
4.2.2 Spatialisation.....	18
4.2.3 Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée	19
4.2.4 Dispositifs commerciaux disponibles	19
4.2 Moyens d'expérimentation / évaluation.....	19
4.2.1 Expertises méthodologiques	19
4.2.2 Infrastructures	19
■ 5. Aspects éthiques	19
Conclusion	19

Contexte général : liens art et santé

Un rapport récent de l'OMS (Fancourt & Finn 2019) sur le rôle des arts pour la santé et le bien-être propose d'observer celui-ci autour de 2 grands thèmes : l'art comme moyen de prévention et l'art comme moyen d'amélioration. Dans le domaine de la prévention, le rapport relate des travaux qui indiquent que les arts peuvent affecter les déterminants sociaux de la santé, favoriser le développement de l'enfant, encourager les comportements bénéfiques pour la santé, soutenir le soin aux personnes. Dans le domaine de l'amélioration de la santé, les travaux cités soulignent que les arts peuvent aider les patients atteints de troubles mentaux, venir en support des soins aux patients dans des états aigus, aider la prise en charge de personnes souffrant de troubles neurologiques et développementaux, assister la prise en charge de maladies chroniques et assister les soins de fin de vie.

Dans la région européenne de l'OMS, de nombreux développements politiques relatifs aux arts et à la santé ont vu le jour depuis le début des années 2000. Par exemple, au Royaume-Uni, des publications conjointes entre l'Arts Council England et le National Health Service sont produites depuis 2007 ; le Department of Culture, Media and Sport a inclus la santé dans le nouveau Livre blanc sur la culture ; et un rapport du All-Party Parliamentary Group intitulé Creative Health a formulé une série de recommandations politiques à l'intention du gouvernement britannique et d'autres organismes. En Finlande, le gouvernement a adopté en 2007 un programme politique d'amélioration de la santé axé sur le renforcement de la contribution de l'art et de la culture à la santé et au bien-être. En Irlande, l'Arts Council Ireland et le Health Service Executive collaborent depuis la fin des années 1990 et ont produit des documents politiques et stratégiques sur le potentiel de collaboration entre les secteurs des arts et de la santé. En Norvège, le gouvernement a institué une loi sur la santé publique et une loi sur la culture, qui soulignent toutes deux l'importance des arts pour l'amélioration de la santé et des soins. En Suède, le Parlement a créé un groupe pour la culture et la santé et une commission sur la politique culturelle.

En France, le programme Culture et Santé existe depuis plus de 20 ans. Il est mis en place au niveau régional par les agences régionales de santé (ARS). On note également une volonté plus récente de développer l'impact de l'art chez le jeune enfant, en témoigne le rapport au ministère de la culture de Sophie Marinopoulos (2019) « Promouvoir et pérenniser l'éveil culturel et artistique de l'enfant de la naissance à 3 ans dans le lien à son parent (ECA-LEP) », dans lequel un recensement des structures et interventions est proposé, regroupant les activités ayant trait à la musique, la lecture, et l'art vivant d'une façon plus générale. Plus que d'un partenariat entre culture et santé, ce rapport s'inscrit dans un partenariat entre le ministère de la Culture et le ministère des Familles, de l'Enfance et des Droits des femmes (protocole d'accord entre le ministère de la Culture et de la Communication et le ministère des Familles, de l'Enfance et des Droits des femmes, 20 mars 2017).

Le ministère des Solidarités et de la Santé et le ministère de la Culture conduisent une politique commune d'accès à la culture pour tous les publics en milieu hospitalier. Il repose sur une volonté interministérielle qui vise la meilleure prise en compte possible du fait artistique et culturel dans les établissements de santé. Les actions peuvent relever des divers domaines artistiques, pour les établissements hospitaliers, elles peuvent se décliner sous la forme d'ateliers de pratique artistique, de parcours de sensibilisation à l'art et à la culture, de jumelages, de présences artistiques... Pour le médico-social, elles prennent la forme de résidences d'artistes.

Il semble qu'aucune initiative ne s'intéresse spécifiquement à l'art dans sa forme auditive, et c'est sous l'ombrelle de la culture qui englobe tout objet artistique que sont incluses les interventions reliées à la musique et au son. En conséquence, la peinture par exemple est abordée de la même façon que la musique, alors que cette dernière incorpore le son et des technologies extrêmement sophistiquées, à la pointe des développements informatiques et de l'intelligence artificielle. Regrouper tous les objets artistiques pour s'intéresser à leur rôle sur la santé sous-entend que la finalité artistique est suffisante pour justifier cette approche. Nous prenons ici un autre point de vue. Dans les activités de l'axe que nous présentons, il n'y a pas d'intention artistique et/ou esthétique mais une finalité de soin et de mieux-être. Ces activités sont soutenues par une communauté regroupant un partage d'expertise, de moyens, de matériel et d'applications logicielles. Le son est traité comme un matériau musical parce qu'il est envisagé de façon structurée. Il peut être lié à un geste musical, avec une structure temporelle dont les évolutions sont parties prenantes des interventions proposées. Nous incluons dans notre axe le paradigme de l'écoute, que ce soit des sons du quotidien, de l'hôpital ou de la musique.

L'activité de cet axe est soutenue par le CNRS (soutien en personnel par l'affectation d'une ingénieure d'étude) et bénéficie du contexte créé par le Collegium Musicae de Sorbonne Université, qui a récemment ouvert un nouvel axe programme de l'Alliance Sorbonne Université : "Musique et médecine". Il est à noter que l'aspect spécifique de la santé et du bien-être chez le musicien n'est abordé dans nos recherches actuelles que dans son versant historique et musicologique (travaux de Laurent Feynerou). Il constitue par ailleurs un axe à part entière du Collegium Musicae.

Introduction

Cet axe transversal regroupe les recherches liées au bien-être et à la santé, effectuées dans le cadre du laboratoire STMS. Cet axe a plusieurs objectifs :

- Mutualiser les efforts dans le domaine afin de les rendre plus efficaces,
- Donner une visibilité à ces actions pour obtenir la reconnaissance et la légitimité de celles-ci, notamment en consolidant et en suscitant des collaborations avec le milieu médical,
- Elargir le champ d'action et d'application de ces recherches afin d'enrichir les autres axes du laboratoire, mais également le champ plus vaste de l'importance de l'art dans la société.

Le potentiel de la musique et des interventions basées sur la musique et le son est universellement reconnu. Les études scientifiques souffrent cependant d'une faiblesse méthodologique pour mettre en évidence ce bénéfice (voir par exemple Loui 2020). Afin de justifier la présence des technologies relevant de la musique et du son dans le champ du mieux-être et de la santé, il est nécessaire de considérer au moins 4 approches interdépendantes, se renforçant mutuellement :

1. L'investigation des mécanismes en jeu dans la perception de la musique et du son,
2. L'implémentation d'interventions ciblant des mécanismes précis sous-tendant l'approche thérapeutique, guidés par la connaissance des mécanismes impliqués dans la perception de la musique et du son,
3. La conception d'interventions basées sur les développements scientifiques et technologiques les plus récents alliant musique, informatique et traitement du signal,
4. L'évaluation quantitative du succès des interventions en les comparant avec des thérapies de référence.

Si l'expertise du laboratoire dans les trois premières approches est évidente, la dernière approche est encore peu abordée. Nous souhaitons la développer en systématisant autant que possible les protocoles permettant de mettre en évidence les atouts des connaissances développées. Cette dernière approche repose sur des collaborations étroites et durables avec des établissements de santé. L'ultime objectif doit être une implémentation multisite et à long terme des interventions, permettant de déterminer leur efficacité et leur applicabilité à large échelle.

Cet axe est organisé en 3 activités. La première s'intéresse à la *prévention et la promotion de la santé et du mieux-être*. Elle intègre les activités relevant de l'amélioration de l'environnement sonore, mais également les actions reliées aux aspects développementaux et éducatifs. La deuxième activité regroupe les interventions dans la *prise en charge du patient*, que ce soit au niveau du diagnostic ou celui du traitement. Dans les interventions relevant du traitement, nous intégrons les interventions en milieu clinique et les interventions pouvant être réalisées au domicile du patient. La dernière activité se concentre sur l'étude des *mécanismes de la perception de la musique et du son*, chez l'homme tout venant. Dans ce cadre, nous abordons également l'impact social de la pratique musicale, par l'étude de l'expérience du public. L'enjeu de cette activité est de mettre à jour les cibles à traiter ou à renforcer via la musique et le son en cas de dysfonctionnement, qu'il soit de l'ordre de la déficience (congénitale ou acquise) ou de la défaillance (aigüe ou chronique). Enfin, nous présenterons les outils déployés et à disposition pour les développements technologiques nécessaires à cet axe.

■ 1. Le son et la musique pour la prévention en santé et le mieux-être

Les effets psychosociaux de la musique et du son suscitent de l'intérêt depuis longtemps. Une certaine confusion empêche pourtant l'évaluation systématique des bénéfices de la musique et du son. Non seulement les effets mesurés au niveau comportemental ne sont pas très précis, mais trop souvent la description du matériel musical et/ou sonore utilisé manque de clarté, empêchant un travail théorique reposant sur des méta-analyses. Nos travaux s'attachent à circonscrire avec précision le matériel sonore utilisé ou les interventions effectuées sur les caractéristiques acoustiques du son, afin de contribuer à l'identification de cibles acoustiques et sonores facilitant le soin et de mieux-être. Nos activités dans le cadre de l'utilisation de la musique et du son pour la prévention de la santé et le mieux-être se caractérisent en deux types d'interventions : l'une basée sur la prise en compte de l'environnement sonore pour favoriser le mieux-être et la possibilité de soin, l'autre basée sur la capacité de la musique et du son à favoriser la cohésion sociale et à stimuler la motricité. Les deux interventions se distinguent par le degré d'implication du participant : l'écoute est passive dans le premier cas, alors qu'elle est active dans le deuxième.

1.1 Environnement auditif : travail sur l'environnement auditif pour faciliter la possibilité du soin et pour le mieux-être

Ce versant envisage l'environnement auditif comme facteur contributif à la possibilité de prendre soin et d'améliorer le confort de l'individu en milieu hospitalier. L'environnement auditif du milieu hospitalier peut s'avérer particulièrement aversif et constituer un facteur de stress, peu propice à la mise en place des soins à prodiguer. Des travaux sont menés pour maîtriser l'environnement acoustique dans le cas spécifique des chambres de réanimation, et sur les aspects reliés aux alarmes sonores en milieu clinique.

1.1.1 Chambres acoustiques de réanimation

Une convention 4 partites a été établie entre le GHU Paris Psy&Neuro, l'Ircam, le CRD ENS Paris Saclay et le FEMTO-ST, envisageant les actions communes suivantes :

- Participation à l'élaboration des spécifications acoustiques et audionumériques de chambres permettant de maîtriser et contrôler la stimulation auditive et l'environnement sonore des patients, particulièrement dans le cadre actuel et à venir des besoins du nouveau bâtiment du pôle Neuro Ste Anne ;
- Plus largement, l'élaboration de protocoles, dispositifs et plateformes expérimentales permettant de mesurer et de contrôler la stimulation auditive et l'environnement sonore du patient à diverses étapes de son parcours de soin ;
- Application des technologies acoustiques et audionumériques et des sciences des systèmes pour la stimulation auditive et l'évaluation de la conscience du patient en réanimation ;
- Apports potentiels de ces technologies dans les applications de diagnostic, le monitoring, les approches thérapeutiques et la remédiation des patients ;
- Développement de protocoles expérimentaux permettant de caractériser et d'étudier l'impact du contrôle sonore sur le patient ;
- Définition, collecte et établissement de bibliothèques numériques ou de services logiciels visant à synthétiser des stimuli auditifs et des environnements sonores spécifiques ;
- Développement de projets de résidence artistique et culturelle

Certaines de ces actions ont été initiées dans le cadre de l'ERC Cream (par des projets, des encadrements de thèse, etc. ...) et leur continuité est en cours de réflexion, suite notamment au départ de Jean-Julien Aucouturier.

Résidence artistique SOUNDS4COMA

Une première instance de recherche-action s'est opérée pendant la résidence artistique « Sounds4coma » (Vertigo, ERC Cream, 2016-2019). S'appuyant sur l'expérience des artistes en design audio pour le jeu (Ali Tocher) et en composition musicale (Joe Acheson), l'objectif était de réduire l'anxiété et la douleur des patients en soins intensifs à l'aide d'une composition musicale/soundscape contrôlée à l'aide d'outils audio génératifs non linéaires. Un premier prototype est actuellement testé auprès de patients atteints d'une hémorragie sous-arachnoïdienne et depuis avril 2020, d'une insuffisance respiratoire due au SRAS-CoV-2.

L'influence de l'écoute musicale sur les états affectifs est bien connue (Juslin et Laukka, 2003; Eerola et Vuoskoski, 2013) et beaucoup de travaux ont été entrepris par les musicothérapeutes pour cibler la douleur et l'anxiété dans des contextes cliniques et non cliniques (e.g. Guétin et al. 2014; Panteleeva et al., 2018 ; Howlin & Rooney, 2020). Bon nombre de ces interventions utilisent le genre musical préféré du patient (Guétin et al. 2014), ou même des objets musicaux préférés (Verger et al. 2014) pour assurer le niveau d'attention et les réactions affectives positives. Cependant, ce choix est problématique : non seulement la population des patients en soins intensifs est variée en âge et culture, rendant difficile la présélection d'un genre ou d'un type de composition; mais la plupart des patients sont non réactifs ou inconscients et ne peuvent donc être impliqués dans la sélection musicale. Enfin, la durée médiane de séjour en soins intensifs (5 jours) complique la participation des membres de la famille à la sélection du matériel, qui est plus aisée pour les patients chroniques végétatifs ou peu conscients dans les unités de long séjour (Verger et al. 2014). Pour toutes ces raisons, les artistes se sont tournés vers des sons naturels tels que le vent, les vagues, la pluie, aussi efficaces que la musique dans le contexte de douleur aiguë (Villareal et al. 2012). Les sons des enregistrements naturels non traités ont été traduits vers une composition sonore plus intentionnelle, dans laquelle les éléments compositionnels interagissent avec le caractère aléatoire naturel des sons environnementaux. Les échantillons sont traités dans un logiciel utilisé pour le développement audio de jeu appelé FMOD. Cet environnement permet également d'appliquer la méthode de lecture en forme de U (développée pour le projet Music Care hôpital et musicothérapie). Pour la composition, la forme en U est créée en déclenchant d'abord les coups de vent à leur hauteur d'unité, avec des vagues actives pour capter l'attention de l'auditeur. Au fur et à mesure que nous descendons l'U, le pas est réduit en octaves, ce qui provoque le déclenchement moins souvent des impulsions de collision des carillons. Le contenu tonal diminue également et les ondes deviennent moins actives et plus douces. Ce processus est mis en miroir pour ramener l'auditeur «en haut» à la fin de la pièce. L'application (prototype) permet à l'utilisateur de laisser la forme U se jouer en 9 étapes ayant chacune une durée fixe (par exemple, 5 min pour un temps de jeu total de 45 min), ou de geler la lecture dans son emplacement actuel dans le programme. Le système étant génératif, il peut jouer pseudo-infiniment, avec une variation aléatoire des échantillons.

1.1.2 Alarmes sonores

L'amélioration de l'environnement sonore est un aspect important du mieux-être et de la possibilité de soin. Elle concerne les aspects reliés aux alarmes sonores dans les milieux cliniques et les aspects plus généraux de la qualité de l'environnement sonore, qui sont essentiels pour la possibilité de la mise en place du soin. L'objectif est d'étudier, spécifier et corriger l'environnement sonore dans le domaine hospitalier, en particulier pour ce qui concerne la qualité des signaux sonores en termes d'adéquation aux processus sondés et/ou d'acceptabilité par le patient.

La thèse de Baptiste Bouvier sur la saillance auditive et son influence dans la gêne sonore (2020-23, co-direction Catherine Marquis-Favre /ENTPE Lyon), ainsi que le stage de Clara Chateigner (Ecole Centrale de Lyon – 2021), sur la saillance des alarmes s'inscrivent dans cette activité.

Lors du [stage de Clara Chateigner](#), un paradigme expérimental a permis de mettre en évidence qu'il est possible, sans augmenter le niveau perçu d'un son, de le rendre plus saillant en manipulant des paramètres comme sa hauteur, sa brillance ou sa rugosité.

Dans la [thèse de Baptiste Bouvier](#), l'étude de la saillance, liée au mécanisme de capture attentionnelle, s'effectue, dans un premier temps, sur des stimuli de laboratoire contrôlés en fonction des paramètres du timbre – donc autres que sonie et hauteur – dont on cherche à évaluer l'influence (approche psychoacoustique). Pour cela, elle met en œuvre un paradigme expérimental issu de la vision, transposé à l'audition par Dalton et Lavie (2004) et adapté/amélioré pour les besoins de l'étude : le paradigme du singleton additionnel qui met en évidence la capture attentionnelle par un allongement du temps de discrimination en présence d'un distracteur non pertinent. Une série d'expériences a montré l'effet significatif des paramètres de brillance et de rugosité sur la capture attentionnelle, ainsi qu'une évolution significative de cet effet en fonction de la force de ces paramètres (mesurée sur la base du JND – Just Noticeable Difference). Cependant ces résultats sont comparables quel que soit le paramètre (brillance, rugosité) ce qui amène à réfléchir sur la cause de la capture attentionnelle : dimension du timbre ou bien simple changement de la nature du stimulus ? Des expériences seront menées pour étudier le caractère dispersif et directif (transposition et symétrie), ainsi qu'additif (interaction) de ce phénomène et mettant potentiellement en lumière d'autres relations de cause à effet (nouveaux paramètres du timbre). D'autre part, des études seront faites avec des sons plus écologiques (alarmes) et dans des scènes plus complexes. Enfin, la question de la relation entre saillance et gêne, sur la base d'une approche de modélisation, sera posée dans un contexte de scènes réelles et de simulation ou d'augmentation de sources.

Dans le cadre d'une [collaboration avec l'IRBA](#) (contrat cadre), on étudie les indices acoustiques et auditifs qui permettent à une alarme sonore d'évoquer une réaction rapide et appropriée. L'analyse de sons naturels d'alarme (voix, cris) constitue le point de départ. Une deuxième piste consiste à évaluer les avantages qu'apporte la présentation multisensorielle (stimulation tactile, visuelle accompagnant l'alarme sonore) pour la détection de l'alarme. L'interaction multisensorielle de l'information auditive et la validité de ses avantages pour la détection de l'alarme sont étudiés en fonction de la position de la source sonore dans l'espace autour du corps. Les potentielles différences dans les réactions aux alarmes en fonction des caractéristiques des individus sont aussi explorées : en investiguant l'état auditif des sujets (pertes auditives cachées), et en mesurant l'impact possible de l'anxiété sur la réaction aux alarmes. De plus, les contraintes auxquelles sont soumis les individus seront prises en compte : en étudiant la perception de sources sonores en situation de charge perceptive élevée (étude de la surdité attentionnelle) et

en situation de mouvement (étude du rôle des informations vestibulaires dans l'intégration des informations auditives et leur perception dans l'espace).

Une étude phénoménologique du ressenti lié à l'environnement sonore a été menée dans le cadre de l'atelier de co-design sonore organisé dans le cadre du [projet PaDS – Participatory Designing with Sound](#) avec S. Delle Monache, E. Ozcan (TU Delft / Critical Alarms Lab) (2020-22), auquel collabore l'équipe PDS. L'objectif est de réfléchir à la pertinence et aux significations de l'écoute, du point de vue des expériences des patients et des soignants. Le soin par l'écoute s'incarne naturellement dans le dialogue entre le soignant et le patient, ainsi que dans une prise de conscience de la situation qui peut être plus ou moins directe, et médiatisée par des outils et des assistants technologiques. Les personnels médicaux et para-médicaux utilisent le son et l'écoute pour évaluer l'état du patient. Ils écoutent le son de la respiration, ils utilisent des outils tels que le stéthoscope pour inspecter les poumons, le cœur ou les vaisseaux sanguins. Ils utilisent la percussion pour ausculter la résonance de la cavité abdominale. En complément, les systèmes de surveillance du patient aident le personnel médical à prendre des décisions éclairées et assurent une veille continue de manière efficace. Les alarmes sonores basées sur les priorités sont utilisées pour identifier et alerter les soignants des événements critiques au stade le plus précoce possible. Généralement, l'intention des alarmes est d'attirer l'attention et d'agir sur un problème médical donné concernant l'état du patient ou le bon fonctionnement de l'équipement médical. Les soignants sont formés pour reconnaître les alarmes, réagir et les placer dans le bon contexte. La fatigue due aux alarmes est un état psychologique qui peut être causé par plusieurs facteurs dont la surexposition, le masquage, la confusion et l'attention divisée. La désensibilisation aux alarmes peut affecter le respect des alarmes, et ainsi compromettre la sécurité et la prise en charge du patient. De plus, comme les tendances actuelles en matière d'hospitalisation suggèrent de réveiller et de stimuler le patient très tôt dans le processus de rétablissement, les fausses alarmes sont souvent causées par le déplacement des cathéters et des capteurs en raison des mouvements du patient. L'effet qui consiste à "crier au loup" est le phénomène par lequel une série répétée de fausses alarmes ou d'alarmes sans action finit par amener le personnel soignant à ignorer les alarmes importantes. L'environnement sonore des services hospitaliers se caractérise par un mélange d'événements sonores très fréquents, notamment les activités et les discussions du personnel médical, le bruit de fonctionnement des appareils de surveillance ou de maintien en vie et les alarmes. Non seulement le niveau de pression acoustique, mais aussi la cacophonie générale de l'environnement sonore peuvent produire une fatigue due au bruit, tant chez les soignants que chez les patients. L'exposition répétée aux sons d'alarme et surtout le manque de conscience de la situation concernant la signification des alarmes et des événements peuvent affecter les patients, en provoquant des problèmes de sommeil, de détresse, d'anxiété et plus généralement en entravant et ralentissant le processus de récupération. Dans l'atelier, nous invitons à réfléchir à la pertinence et aux significations de l'écoute du point de vue des expériences des patients et des soignants. Le soin par l'écoute s'incarne naturellement dans le dialogue entre le soignant et le patient, ainsi que dans une prise de conscience de la situation qui peut être plus ou moins directe, et médiatisée par des outils et des assistants technologiques.

1.2 Le son et la musique pour le mieux-être : faciliter la cohésion et les interactions sociales et favoriser les mouvements du corps

La musique et le son participent de l'éveil artistique et culturel des jeunes enfants et ont également un impact sur le bien-être dans le vieillissement. La motricité est stimulée par l'écoute et peut également être soutenue par la sonification du mouvement. Les activités engagées dans ce versant tirent parti des facultés de la musique à augmenter la coordination interpersonnelle (Demos et al, 2001) et à permettre la synchronisation au-delà de l'espace peripersonnel sans limitation liée aux restrictions imposées par l'espace visuel.

1.2.1 Cohésion et interaction sociales

Le [projet EmoDemos](#) se penche sur l'impact de la pratique musicale orchestrale sur le développement cognitif, émotionnel et relationnel des enfants. Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet DEMOS de la Philharmonie de Paris, projet national d'éducation globale par la musique, à vocation sociale, concernant près de 3000 enfants issus de quartiers en périphérie des villes et répartis dans 30 orchestres à travers la France. Coordination Univ. Genève avec Ircam et Univ. de Gênes, financement de la Philharmonie de Paris) (2017-2019).

L'originalité du projet a été d'évaluer, sur le terrain, comment cette pratique collective favorise l'acquisition de compétences essentielles pour l'empathie. Une population de 255 enfants et adolescents, de 7 à 13 ans ont été observés sur deux années à travers des applications interactives, ludiques et originales réalisées pour s'intégrer à ce contexte particulier. L'Ircam a spécifiquement contribué au développement d'une série d'applications interactives collectives originales permettant d'évaluer l'imitation et la synchronisation des mouvements continus dans un groupe de d'élèves sur le terrain (jusqu'à 15). Ce projet a constitué un pas important vers une méthodologie participative, établie pour et avec les différents intervenants, musiciens et référents territoriaux du projet [Glowinski et al., 2021].

La [thèse de Marion Voillot](#) (collaboration IRCAM, CRI-Paris Université de Paris, Ensci-Les Ateliers), intitulée "Le corps au cœur de l'apprentissage, grâce au numérique, un nouveau paradigme pour l'éducation à la petite enfance" (2019-2023), propose des scénarios pédagogiques et numériques pour la petite enfance dans lesquels le corps constitue le médium d'interaction avec la technologie. Le système de CoMo-Education a été développé à l'Ircam afin de raconter des histoires en mouvement avec des environnements sonores interactifs. L'objectif est de favoriser l'interaction collective dans les classes de maternelle à l'aide d'interaction multimodales [Voillot et al, 2019, 2020].

1.2.2 Sonification du mouvement pour la prévention et le mieux-être

Ces travaux sont développés dans le cadre d'une collaboration avec Ana Tajadura-Jimenez (Universidad Carlos III de Madrid) sur les [projets MagicShoes](#) (<https://magicshoes.es/>, 2017-2019) et [MagicOutfit](#) (<https://magicoutfit.com/>, 2020-2022). L'objectif global de ces projets est de tester la faisabilité et la valeur potentielle de l'utilisation d'une technologie portable intégrant le retour sensoriel et en particulier sonore. Il s'agit en particulier d'établir si un retour sensoriel adéquat permet de favoriser une représentation positive du corps, du comportement moteur et des émotions, et finalement l'adhésion à l'exercice, chez les personnes physiquement inactives ou ayant un mode de vie sédentaire. Le projet

MagicShoes s'est focalisé spécifiquement sur la marche, alors que le projet MagicOutfit a permis d'élargir la palette d'actions et de mouvement au corps entier.

Le rôle de l'Ircam a été principalement de participer à l'élaboration des expériences et de contribuer à l'élaboration de prototypes de sonification du mouvement (équipe ISMM). Ces projets ont permis de financer la thèse de Judith Guadalupe Ley Flores (Universidad Carlos III de Madrid, qui a été co-encadrée par F. Bevilacqua).

Cette thématique de recherche et cette collaboration va se poursuivre dans le cadre du [projet BODYinTRANSIT](#) (Sensory-driven Body Transformation Experiences On-the-move, ERC, 2022-2026) d'Ana Tajadura-Jimenez. Le projet BODYinTRANSIT établira un cadre théorique de design pour individualiser des "Body Transformation Experiences" en vue de produire des effets positifs durables dans des contextes d'utilisation quotidienne. Ce cadre s'appuiera sur quatre piliers scientifiques pour induire, mesurer, soutenir, personnaliser et préserver les transformations corporelles : 1) perception multisensorielle du corps (neurosciences), 2) modélisation des données, 3) conception d'interactions incarnées et 4) études de terrain dans des contextes réels et en mouvement avec des utilisateurs physiquement inactifs, des praticiens somatiques et des utilisateurs souffrant de problèmes d'image corporelle. Certains aspects de ce projet rejoignent des points de notre axe "prise en charge du patient".

■ 2. Le son et la musique pour la prise en charge du patient

Cette section présente les recherches liées au développement de nouvelles formes d'évaluation et de traitement basées sur les technologies développées à l'IRCAM pour le son et la musique. Ces développements concernent les troubles de l'audition, les troubles de la voix et de la parole, mais également les troubles psychiatriques. Pour le traitement, nous proposons des approches permettant au patient d'effectuer une réhabilitation en centre, en ambulatoire ou à domicile. La réhabilitation à domicile est complémentaire aux autres soins et contribue à l'amélioration de la qualité de vie des patients. L'accompagnement se fait alors en lien avec l'équipe clinique.

2.1 Evaluation

Plusieurs outils sont développés pour contribuer au diagnostic du patient, que ce soit au niveau de la compréhension du son ou de la production sonore. Au niveau de la compréhension, il s'agit de proposer des solutions pour une meilleure caractérisation d'un trouble auditif périphérique ou central, où pour des pathologies dans lesquelles la perception auditive est un élément important et souvent négligé. Au niveau de la production, les aspects phonatoires et respiratoires de l'appareil vocal sont abordés par des techniques de modélisation physique (S3AM) ou des algorithmes à base d'apprentissage profond (AnaSynth) afin d'analyser la parole. L'analyse du signal vocal permet également une évaluation de l'état émotionnel du locuteur et constitue un biomarqueur d'un processus physiologique (AnaSynth).

2.1.1 Troubles auditifs périphérique et/ou central

Caractérisation de l'acouphène du patient (projet en cours depuis 2011, en développement avec le projet IHU audition)

Cette étude, réalisée en collaboration avec l'hôpital Georges Pompidou (Service ORL) au cours des années 2007-2010 avait pour objectif de comparer différentes méthodes permettant aux patients souffrant d'acouphènes unilatéraux de synthétiser une réplique auditive de leurs acouphènes. Cette étude constituait une étape préalable à la thérapie proposée aux patients acouphéniques sur la base d'une application de réalité virtuelle (cf. section 2.2.1)

Deux méthodes de synthèse semi-automatique dérivées de la mesure du seuil auditif du patient ont été comparées à une méthode combinant un son pur et un bruit à bande étroite centrée sur une fréquence réglable par le patient. Ces différentes méthodes ont été évaluées par des patients pour qualifier le degré de ressemblance finale entre leur acouphène et sa réplique synthétisée. La méthode apportant le meilleur degré de satisfaction a également été évaluée sur sa stabilité dans le temps ainsi que sur sa propension à fusionner avec l'acouphène du patient sous forme d'un percept unique. Dans certains cas, le patient parvenait même à déplacer latéralement leur sensation acouphénique depuis l'oreille ipsilatérale (celle correspondant à leur acouphène) jusqu'à l'oreille controlatérale en jouant sur le niveau d'émission du signal de synthèse (Bertet et al. 2012).

Cette application d'acouphénométrie originellement développée en 2008 dans l'environnement Max/MSP a été récemment réactualisée (toujours dans l'environnement Max/MSP) dans le cadre d'une nouvelle collaboration avec l'hôpital Georges Pompidou (financement Fondation Visaudio) qui relance actuellement une recherche clinique sur le thème du traitement acouphènes. Cette nouvelle version s'inspire d'une application développée il y a quelques années par la société Immersive Therapy aujourd'hui disparue.

Synaptopathie (E. Ponsot – 2022-2025)

Ce projet vise à mieux comprendre les mécanismes auditifs impliqués dans la transmission et le décodage de signaux acoustiques complexes tels la parole dans le bruit ; opération qui handicape malentendants, même appareillés, et 10 à 15% des individus jugés normoentendants. Je propose une approche couplant mesures psychophysiques et modèles computationnels du système auditif, afin d'isoler les propriétés de la cascade d'opérations réalisées sur le signal acoustique entre la cochlée et le cortex, jusqu'à ce qu'il soit perçu. Cette approche se base sur la synthèse de signaux constitués de modulations spectrotemporelles, vecteurs de l'intelligibilité de la parole. Des méthodes bayésiennes seront ensuite utilisées pour estimer, sur de larges cohortes d'individus avec ou sans pertes cochléaires, les paramètres latents du modèle de traitement de la parole élaboré. Un objectif important est d'identifier l'origine mécanistique de la variabilité interindividuelle d'intelligibilité de la parole dans le bruit, et son lien avec le vieillissement et l'environnement. Ce projet présente d'importantes perspectives translationnelles, menant à de nouveaux outils pour une évaluation et une prise en charge "computationnelle" dans tout le spectre des handicaps auditifs.

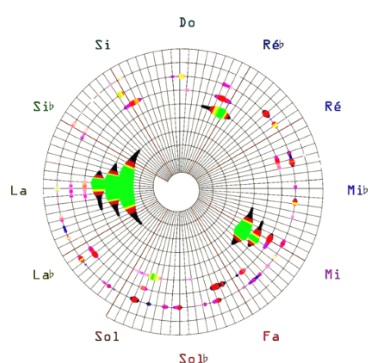
Misophonie et hyperacousie (projet IHU audition déposé fin 2022, projet PDS avec l'IRBA)

L'objectif général est de mettre à jour les indices transformant un signal sensoriel en une émotion négative et provoquant un comportement d'évitement. Il s'agit de caractériser les stimulations sonores générant une aversion, afin de mettre à jour un répertoire de traits auditifs déclenchant des réactions de défense. Dans un premier temps, une étude phénoménologique permettra de circonscrire les sons les plus fréquemment rapportés par les patients, afin de proposer une interface de test permettant de caractériser les indices acoustiques sur lesquels reposent l'aversion. Dans un deuxième temps, les capacités attentionnelles des patients en situation d'écoute des sons aversifs seront évaluées.

2.1.2 Troubles de la phonation

Le Snail-analyser comme bio-feedback pour la ré-éducation vocale

Le Snail-Analyser est une technologie brevetée par le CNRS qui offre une visualisation intuitive et musicale de la musique et les sons en temps réel (voir illustration ci). Les zones actives du contenu spectral sont représentées par des taches lumineuses sur un squelette en spirale (voir illustration ci-dessous) : un tour correspond à une octave, les notes graves se trouvent près du centre de la spirale, les notes plus aiguës vers l'extérieur, et la sonie (volume sonore tel que perçu par l'être humain) de chaque fréquence analysée est convertie en niveau de brillance (une composante deux fois plus forte génère la tache deux fois plus brillante). Cette technologie fournit un visuel réactif et précis de la hauteur du son (précision de l'ordre ou dépassant celle la perception humaine).



Cet outil est potentiellement adapté à l'assistance en ré-éducation vocale dans le cas de jitter (/chevrottement) prononcé. De plus, dans le cas de dysphonie (en particulier, présence simultanée de plusieurs hauteurs), la représentation fournit un rendu des différentes hauteurs avec leurs mouvements respectifs, ce qui constitue encore un support à tester pour apparier le contrôle-moteur et son effet sur le signal vocal. Enfin, l'exploitation des flux d'analyse (avant rendu visuel) pour l'élaboration de statistiques et l'aide au diagnostic est également une piste à étudier.

Neural networks using port-Hamiltoninan systems for voice analysis and re-synthesis (AnaSynth, projet JCJC, partenaire SEAM, en cours d'évaluation à l'ANR)

Le projet propose une application pour la médecine dans laquelle les méthodes seraient utilisées pour détecter et comprendre l'origine d'anomalies dans la voix.

Artificial Voice production: control of bio-inspired port-Hamiltonian numerical and mechatronic models (S3AM, projet ANR PRC 2022-2027)

Ce projet étudie la production de la voix humaine et les régimes oscillatoires résultant de l'articulation du larynx et du conduit vocal (impliqués dans les registres de voix de poitrine, de fausset, etc.). Il se fonde sur la modélisation physique et la théorie des systèmes non linéaires pour concevoir des simulations, observateurs-contrôleurs et analyses de bifurcations d'appareils vocaux. Sa première spécificité est d'élaborer ces outils sous l'hypothèse systématique de bilans de puissance garantis (écartant les difficultés d'instabilités non physiques). La seconde est de les compléter, nourrir et évaluer par des mesures in vivo et sur un ensemble cohérent de bancs mécatroniques (contrôle de larynx ex vivo, biomimétiques ou standardisés, et de conduits vocaux artificiels). L'objectif est de comprendre, reproduire et analyser scientifiquement la voix (sur des cas sains et pathologiques) grâce à des avatars virtuels et robotiques. Les retombées médicales permettront une meilleure évaluation des troubles de la voix parlée ou chantée.

2.1.3 La voix comme biomarqueur

Plusieurs sollicitations ont été lancées afin d'utiliser les indices contenus dans la phonation pour analyser l'état de l'individu (fatigue, stress, alcool, etc...). Ces évaluations sont demandées afin d'évaluer l'état d'un praticien en environnement médical (AnaSynth), mais sont également intéressante dans le cadre de l'évaluation de la douleur (projet NoPain, en cours de demande de financement auprès de Sorbonne Université, EAC, AnaSynth, PDS).

2.1.4 Troubles psychiatriques dont la symptomatologie intègre une sensibilité auditive

Phobie (projet passé)

Dans le cadre des projets européens CROSSMOD (2005-2008) et VERVE (2011-2014), le son 3D a été utilisé dans les situations immersives, de sorte à étudier les liens entre l'intégration visuo-auditive et l'anxiété. Les cas particuliers de la phobie des chiens et la phobie de la foule

ont été considérés. Un environnement a été développé pour caractériser l'évitement de l'objet phobogène par une mesure comportementale en réalité virtuelle en prenant en compte l'aspect sonore de l'objet phobogène (projet européen VERVE 2011-2014).

■ 2.2 Traitement

Les activités liées à la contribution au traitement visent à diminuer les symptômes du patient pour lequel il est pris en charge. On les présente ici selon le type de pathologie :

- Somatique (trouble sensoriel périphérique ou central : moteur, visuel, auditif, vestibulaire... ; trouble neurologique lié à une pathologie dégénérative ou à une lésion) : Le traitement consiste le plus souvent en un entraînement, basé sur la répétition d'une pratique visant à stimuler la plasticité cérébrale. La rééducation peut viser des processus de substitution sensorielle, dans laquelle le son va remplacer une information sensorielle manquante, ou des processus de supplémentation sensorielle, dans laquelle le son va venir en support d'une information sensorielle existante.
- Psychosomatique (psychiatrie) : dans ce cadre, le traitement intègre une composante sonore importante, qui constitue un mécanisme à part entière de celui-ci. Il peut s'agir de proposer des procédés de maîtrise / réduction des troubles psychiatriques, afin de retarder / empêcher des traitements pharmacologiques et/ou coercitifs (contention, enfermement, etc.).

Comme présenté en introduction, nous visons également à développer les interventions pouvant se réaliser en ambulatoire et à domicile.

2.2.1 Le soin / l'intervention en environnement clinique

2.2.1.1 Troubles somatiques

Troubles auditifs :

Acouphènes (EAC, projet en cours)

Les acouphènes subjectifs chroniques sont une pathologie fréquente et parfois invalidante pour laquelle aucun traitement curatif n'est connu. Ils sont le plus souvent suite à une lésion auditive périphérique responsable d'une hypoacousie. La caractérisation fréquentielle de l'acouphène est, de fait, souvent corrélée au spectre de la perte auditive. Cependant l'entretien du symptôme acouphène et ses caractéristiques psychoacoustiques ne peuvent être véritablement expliquées que par une modification tonotopique de l'activité des voies auditives cortico-corticales en réponse à la variation de la stimulation sensorielle.

Cette réorganisation, résultant de phénomènes de plasticité neuronale, a été mise en évidence expérimentalement chez l'animal mais également chez l'homme par les techniques d'imagerie moderne. Cette situation clinique et son équivalent neurophysiologique sont à rapprocher de ce qui est rencontré dans le cadre des syndromes douloureux chroniques (en particulier après déafférentation) où des thérapies utilisant les techniques réalité virtuelle ont déjà été employées avec succès. En outre, et toujours en analogie avec les syndromes douloureux chroniques, les acouphènes invalidants sont souvent associés à des troubles psychopathologiques de type anxio-dépressif, générant des conduites d'évitement ou d'anticipation voire réactions phobiques, et rendant pertinentes et efficaces dans cette indication les thérapies cognitivo-comportementales. C'est également dans ce type d'indication que les thérapies d'exposition progressive en réalité virtuelle ont trouvé une de leurs indications. Il a d'ailleurs été démontré que l'apport d'une information auditive 3D en sus de l'information visuelle apporte un surcroît d'efficacité et une meilleure adhésion du sujet aux conditions d'expérience. Ces différents éléments nous ont conduit à proposer d'utiliser les techniques de réalité virtuelle et de son 3D pour la prise en charge des acouphènes. Un protocole clinique à 3 bras a été conduit à l'Hôpital Européen Georges Pompidou (HEGP) entre 2010 et 2012, comparant l'efficacité de la réalité virtuelle contre l'efficacité d'une thérapie cognitive et comportementale classique, le troisième bras étant constitué d'une liste d'attente. L'efficacité de la réalité virtuelle étant au moins équivalente à la thérapie de référence (TCC), la technologie va être réutilisée de sorte à équiper de façon pérenne le département d'ORL de l'HEGP mais également le futur IHU audition (projet à déposer d'ici fin 2022).

Après caractérisation de l'acouphène subjectif et synthèse d'un acouphène objectif, on teste l'appropriation de ce dernier en développant chez le patient un rôle actif dans le contrôle de l'acouphène ; ce qui représente une forme d'« agentivisation ». Le patient peut manipuler l'acouphène objectif en le déplaçant. Il peut le positionner aux zones de l'environnement virtuel où il est le moins pénible. Le but théorique est de rendre « évident » le caractère purement « illusoire » de la perception en lui faisant perdre ainsi son caractère agressif comme cela a été montré dans le cadre des douleurs fantômes. Les séances consistent à désensibiliser le patient par le biais d'une dé-contextualisation à la nuisance de l'acouphène dans des situations neutres, négatives et positives. Il s'agira ensuite pour le sujet d'apprendre à éprouver du plaisir lors de l'immersion dans un environnement virtuel visuel et auditif agréable, malgré son acouphène. Ceci permettra au patient de mieux gérer sur le plan cognitif et comportemental la présence du signal perturbateur.

Audition et stimulation tactile (projet en cours, thèse de Claire Richards), substitution/supplémentation sensorielle

L'intention principale de cette recherche est de permettre aux utilisateurs ayant tout type de profil auditif d'apprécier une expérience d'écoute centrée sur le corps. Le harnais multimodal, développé pendant la thèse, intègre neuf actionneurs à bobine vocale dans une structure portable, stimulant à la fois les sens auditif et tactile via la conduction sonore extra-tympanique et la stimulation vibrotactile de la peau du haut du corps (colonne vertébrale, clavicules, côtes). Une interface en Max a été créée afin d'évaluer la capacité de trois modes de perception vibratoire du son : auditif, tactile et bimodal. Des études sont effectuées pour comprendre l'apport d'expériences d'écoute musicale multisensorielle, la spatialisation des signaux audio-haptiques sur le corps et l'égalisation sensorielle.

Troubles moteurs :

Rééducation post-AVC, supplémentation sensorielle (ISMM)

Le projet de rééducation post-AVC utilisant la sonification de mouvement a été initiée dans le cadre du projet ANR Legos (L'apprentissage sensori-moteur dans les systèmes interactifs gestuels avec retour sonore, <http://legos.ircam.fr/>), puis dans le cadre du projet ISMES (Embedded SensoriMotor Interfaces for rehabilitation and aSsistance, <http://ismes.isir.upmc.fr/>) du LABEX SMART (<http://ismes.isir.upmc.fr/>). Dans tous ces projets, une collaboration a été établie avec le Service de Médecine Physique et de Réadaptation de l'Hôpital Pitié Salpêtrière et les laboratoires LIB et ISIR de Sorbonne Université. Cet axe de recherche s'est constitué progressivement par une série d'études sur l'apport et les effets de la sonification du mouvement sur l'apprentissage sensori-moteur [Bevilacqua et al., 2016], puis par l'élaboration d'une étude avec des patients et personnes saines (avec une demande de CER). Le développement du dispositif a été réalisé par l'équipe ISMM de l'Ircam [Bevilacqua et al., 2018], et l'étude expérimentale a été menée par Iseline Peyre qui a poursuivi ce travail en thèse [Peyre et al., 2018]. Les résultats mettent en évidence des effets de la sonification sur la temporalité du mouvement et une étude qualitative a mis en évidence chez les participants des préférences dans les types de relation entre mouvement et son/musique.

Douleur :

Douleur aigue pendant les soins non programmés : Traitement de la douleur par réalité virtuelle auditive et virtuelle (EAC, projet en cours d'évaluation à Sorbonne Université, potentielle thèse d'un médecin urgentiste)

Les recherches de ces 30 dernières années suggèrent que la réalité virtuelle (RV) est une option non pharmacologique utile pour diminuer la douleur et l'anxiété. Pourtant, les mécanismes sous-jacents au potentiel effet thérapeutique de la RV commencent seulement à être démontrés, et la démocratisation de la RV permet depuis peu de temps seulement son utilisation courante en milieu clinique. La RV, qui repose sur des technologies interactives pour offrir une immersion dans des mondes virtuels, est un outil efficace pour moduler l'attention. La redirection de l'attention joue un rôle dans la modulation de la douleur, en particulier la douleur liée aux soins médicaux. Mais la RV est aussi un outil qui stimule l'intégration multisensorielle en délivrant des informations s'adressant à différents sens. Le feedback multisensoriel via la RV a été déjà utilisé pour agir sur la douleur chronique, via la manipulation du sentiment d'appartenance du corps. Bien que ce type d'intervention vise à agir sur la perception du corps et de l'espace, la RV reste encore majoritairement basée sur la vision. Pourtant, l'audition est le seul sens à communiquer instantanément des informations sur tout l'espace environnant. Nous voulons tirer parti des atouts du son 3D interactif et de l'acoustique virtuelle pour fournir un nouveau type de retour sensoriel à un environnement virtuel. Nous voulons proposer (1) des solutions pour faciliter l'immersion du patient dans un scénario et pour générer des émotions hédoniques plus intenses, (2) de nouveaux modes d'interaction avec un environnement virtuel pour monitorer la douleur, et (3) des méthodes pour modifier dynamiquement la perception du corps pour diminuer la douleur. Notre objectif est de contribuer au développement de stratégies pour l'évaluation et la gestion de la douleur, en prenant en compte l'influence des signaux auditifs sur la perception dynamique du corps.

Pour le point (2), on étudiera de nouvelles façons d'interagir avec un environnement virtuel en manipulant ses caractéristiques en fonction du suivi de la douleur par des marqueurs comportementaux et physiologiques. À ce jour, il n'existe pas de consensus sur les signes physiologiques ou cliniques précis qui peuvent être utilisés pour mesurer objectivement la douleur. L'auto-évaluation du patient reste l'indicateur de référence de l'existence et de l'intensité de la douleur. Nous chercherons différentes mesures des changements liés à la douleur à utiliser comme biofeedback (adaptation dynamique de l'environnement virtuel et du scénario en fonction de l'expérience de la douleur et de l'état émotionnel). Nous développerons un certain nombre de nouvelles approches comportementales pour identifier et caractériser le niveau de douleur, telles que l'analyse en temps réel de la prosodie, les mesures physiologiques du mouvement (activité électromyographique) et de l'état émotionnel (conductance cutanée). Les comportements caractéristiques de la peur, comme le déplacement des mains sur un site douloureux ou l'accélération de la parole, seront utilisés pour surveiller le niveau émotionnel et de confort du patient.

Pour le point (3), on se concentrera sur la manipulation de la perception de son propre corps via l'interaction avec le son 3D et le retour auditif des actions dans l'environnement virtuel. Nous examinerons les influences auditives sur la perception pendant le mouvement, en étudiant si la sonification d'une partie du corps peut également influencer la perception de la douleur et la réponse émotionnelle. Manipuler les informations auditives liées à un mouvement permettra de déterminer leur influence sur l'expérience de la douleur. Compte tenu de la population concernée (patients en milieu clinique), une question de recherche portera sur la possibilité d'utiliser la principale source sonore du corps humain, à savoir la voix, pour renforcer l'immersion dans un monde décalé de l'état de douleur. L'introduction de la propre voix du participant dans un monde virtuel est une modalité d'interaction encore sous-utilisée en RV, qui permet de se passer des outils habituels (par exemple les joysticks), difficiles à utiliser dans un contexte clinique. Les transformations spatiales en temps réel sur sa propre voix (Isnard et al 2021), qui constitue un marqueur fort de l'identité personnelle et du sentiment de présence ("où suis-je ?"), sont susceptibles de servir le passage de l'être dans le monde physique à l'être dans le monde virtuel.

Troubles neurologiques :

Pathologie cérébrale dégénérative et activité musicale

Dans le cadre d'un contrat de partenariat avec l'équipe Neuropsychologie et Audition du laboratoire PSITEC de l'université de Lille (Prof. S. Samson), le laboratoire contribue à l'évaluation des bénéfices thérapeutiques des interventions musicales sur l'état cognitif et émotionnel et sur le bien-être des patients et de leurs aidants. Une série d'étude est développée sur la thématique de la synchronisation sensori-motrice et interpersonnelle durant une activité d'écoute musicale.

2.2.1.2 Troubles psychosomatiques

Phobie des chiens et phobie de la foule (projet passé)

Dans le cadre des projets européens CROSSMOD (2005-2008) et VERVE (2011-2014), le son 3D a été utilisé dans les situations immersives, de sorte à étudier les liens entre l'intégration visuo-auditive et l'anxiété. Le consortium a travaillé sur la spécification, le développement et le test d'environnements virtuels peuplés d'humanoïdes, utilisés sur différents types de plateformes, allant de la salle immersive (CAVE) au visiocasque. Nos efforts se sont concentrés sur les troubles émotionnels liés à l'anxiété (phobie des chiens, phobie de la foule). La compréhension de l'impact affectif du rendu visuel et auditif d'un environnement virtuel, au niveau de la perception émotionnelle et au niveau du ressenti affectif, a permis de suggérer de nouvelles stratégies thérapeutiques pour les phobies.

Misophonie et hyperacousie (projet axe IHU déposé fin 2022)

L'identification d'indices transformant un signal sensoriel en une émotion négative et provoquant un comportement d'évitement permettra de proposer une thérapie en réalité virtuelle/réalité augmentée, reposant sur une décontextualisation de l'indice sonore aversif.

Projet Psyson (2022-2025)

Dans le cadre de la convention 4-partites établie entre le GHU Paris Psy&Neuro, l'Ircam, le CRD ENS Paris Saclay et le FEMTO-ST sont envisagés des recherches et expérimentations de dispositifs sonores et musicaux favorisant des expériences acoustiques et sensorielles des usagers susceptibles de constituer des auxiliaires de soins et des alternatives à la contrainte en psychiatrie. L'objectif du projet Psyson est de développer un dispositif d'enveloppe sonore pour réduire l'anxiété de patients psychiatriques en milieu hospitalier.

Le rétablissement des patients en santé mentale n'est pas constant et passe parfois par une exacerbation des symptômes de la maladie. Ces derniers peuvent faire apparaître des moments de crise pour le patient, le rendant vulnérable nécessitant un accompagnement : chimiothérapique, relationnel et autres. Ces crises se manifestent selon les patients par de l'anxiété, de l'angoisse, une agitation psychomotrice mais aussi parfois par des passages à l'acte hétéro ou auto agressif. Face à un patient en crise, le recours de chimiothérapie complémentaire par prescription conditionnée au traitement de fond du patient est parfois la seule alternative à la prise en charge de cette crise. Au cours de réunions d'analyse de pratique, les soignants de l'unité ont recherché des solutions innovantes pour accompagner leurs patients. L'étude SUDA et al. 2008 démontre que l'écoute de musique a un impact sur la gestion du stress et de l'anxiété. La musique permettant de réduire plus rapidement cette dernière. La modification de l'ambiance sonore a une influence sur la psyché peu importe la structuration mentale de la personne. De fait, la modification de l'ambiance sonore du patient à l'aide d'un dispositif d'enveloppement sonore a été imaginé comme un catalyseur de la prise en charge infirmière de la crise. En collaboration avec le Laboratoire d'Accueil et d'Hospitalité (LAB-AH) du GHU Paris et l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique (IRCAM), les équipes ont imaginé un outil 100% innovant : un espace temporel et sonore à l'aide d'un recueil de la biographie sensorielle du patient. Les infirmiers au cours d'entretiens semi directifs répertorient les habitudes de vie et les préférences sonores du patient permettant ainsi de lui proposer un environnement familial et de lui procurer un sentiment de sécurité (position préférée pouvant apporter un sentiment d'apaisement, musiques préférées...). Nous faisons l'hypothèse que par rapport à la prise en charge usuelle, l'adjonction du suivi infirmier s'appuyant sur l'espace temporel et sonore, personnalisé et auto-adaptatif, permettra une meilleure gestion des états d'agitation et de l'anxiété en diminuera le recours aux chimiothérapies conditionnées.

L'utilisation de "PSY-SON" est spécifique et adapté à la psychiatrie. Conçu en partant des attentes des patients, il permet une adéquation aux différents besoins des infirmiers et usagers face aux situations cliniques complexes liées aux états de tensions. Etant mobile, il permet l'utilisation dans tous les services. Ce projet PSY-SON est donc original en raison du peu de travaux ayant encore étudié l'efficacité de l'adjonction de ce type de dispositif spécifique dans la prise en charge usuelle des états de tensions. Il repose sur l'expertise d'une équipe infirmière et s'appuie sur les soins infirmiers intégrés dans la prise en charge globale. Une alternative à la prescription médicamenteuse conditionnelle étant innovante dans le cadre des soins en psychiatrie. Cette alternative permettant peut-être une diminution de la consommation de molécules et de leurs effets secondaires.

Nous faisons l'hypothèse que, par rapport à la prise en charge usuelle des moments de crise, l'adjonction du suivi infirmier s'appuyant sur l'utilisation d'un espace temporel et sonore, espace utilisant un dispositif innovant d'aide à la détente (ambiance sonore personnalisée et auto adaptative) a un effet positif sur la crise (état de stress, agitation, d'anxiété des patients, etc.). Il diminue le recours aux traitements chimiothérapiques et améliore l'alliance thérapeutique et, voir aux mesures coercitives pour les patients hospitalisés en psychiatrie. Dans une perspective thérapeutique, l'utilisation de cet espace temporel et sonore, complémentaire de soins infirmiers, pourrait être une étape nécessaire à la prise en charge et n'est pas utilisée à ce jour en France comme outil thérapeutique. Les bénéfices pour le patient sont l'amélioration de prise en charge des patients lors de la crise et limitation de l'utilisation de chimiothérapie. Bénéfice pour la santé publique : Une approche du soin infirmier visant à mettre en oeuvre de nouveaux outils permettant de suivre les recommandations de l'HAS limitant le recours aux mesures coercitives. Une démarche de soin répondant aux exigences cliniques, éthique, organisationnelle. Au niveau de la santé mentale dans d'autres unités d'intra ou extra hospitaliers : diminution du nombre de prescriptions médicamenteuses en ajout au traitement initial. Au niveau disciplinaire : possibilité de l'utilisation du dispositif dans des services de gériatrie, soins palliatifs, de chirurgie pour des prises en charge de patients, usagers, en situation anxiogène ou de stress. Le dispositif spécifique proposé est potentiellement reproductible dans les territoires et structures où une équipe spécialisée et formée (médecin, IDE case managers) peut être constituée pour prendre en charge le patient hospitalisé en psychiatrie. La prise en charge spécifique proposé par l'expérimentation pourrait être appliqué, en cas d'évaluation concluante, pour d'autres pathologies psychiatriques chroniques nécessitant une prise en charge globale et un accompagnement rapproché, personnalisé et adapté au profil de risque des patients.

La thèse de Nadia Guerouaou s'intègre dans la thématique Sound & Health développée au sein de l'équipe PDS, et s'intéresse à la transformation de la voix comme feedback émotionnel au patient dans le cadre de thérapie cognitive pour le stress post-traumatique. L'analyse acoustique d'enregistrements de patients souffrant de trouble de stress post traumatique permet la recherche de biomarqueurs vocaux objectifs contribuant au diagnostic et au monitoring de la pathologie. Le développement d'une nouvelle version du logiciel DAVID de vocal feedback créé à l'IRCAM est testé comme dispositif thérapeutique facilitant l'allègement de la charge émotionnelle durant la thérapie d'exposition en imagination chez ces mêmes patients. Pareillement à ce projet, la doctorante contribue à la réflexion menée au sein de l'équipe sur l'impact de l'environnement sonore dans la prise en charge de la crise en service de psychiatrie, projet actuellement développé avec le GHU St Anne. Enfin, les travaux d'analyse acoustique de la voix des patients pourraient mener à un projet de résidence artistique en cours de réflexion, impliquant la sonification du parcours de résilience par un artiste compositeur en collaboration avec le Centre National de Référence et Résilience qui soutient ce projet de thèse.

Parallèlement à ce projet, l'acceptabilité éthique des transformations vocales émotionnelle est abordée. Une étude en ligne sur N=303 participants de l'acceptabilité morale de différents scénarios impliquant des transformations émotionnelles de voix, montre notamment que l'amplification d'émotions positives (ex. sourire) est moins bien acceptée que la diminution d'émotions négatives (ex. anxiété), que l'utilisation

pour le soin est mieux acceptée que pour l'augmentation de performances, et que le fait de cacher le but de la manipulation à celui qui la subit est fortement rejeté (Guerouaou et al 2022).

L'équipe AnaSynth est également sollicitée dans le cadre d'un projet avec la [MGEN](#) et [IrcamAmplify](#) afin de fournir des outils d'aide à la prise de parole basés sur une analyse de la voix en temps réel.

2.2.2 Le soin à domicile

Il s'agit ici de présenter les interventions implémentées pour que le patient puisse s'entraîner à domicile, en décrivant le type d'interface nécessaire. Ce peut être un matériel dédié ou une interface disponible via un smartphone ou le web. Un programme de réhabilitation à domicile a pour avantage de permettre aux patients de rester chez eux tout en prenant soin de leur santé. Au cours de ces programmes, les patients progressent à leur rythme en fonction des objectifs qu'ils se sont fixés avec le référent clinicien, en recherchant des changements à long-terme. Comme pour le volet précédent, les activités sont présentées selon le type de pathologie visée. Les troubles psychosomatiques ne font pour l'instant l'objet d'aucune recherche pour le soin à domicile, mais pourrait être envisagés.

Troubles auditifs

La peau et les oreilles partagent la capacité de détecter les vibrations. Un même stimulus peut exciter simultanément l'oreille interne et la surface de la peau, par conduction osseuse et sensation vibrotactile. En examinant cet équilibre sensoriel spécifique entre l'ouïe et le toucher, Claire Richards a effectué une analyse psychophysique de la perception auditive de stimuli vibratoires transmis à des structures musculosquelettiques spécifiques du torse (thèse CIFRE 2019-2023, équipe PDS, co-direction Nicolas Misdariis et Roland Cahen, ENSCI/ENS Paris-Saclay). Ces résultats ont ensuite été appliqués dans un cadre de recherche en design pour fabriquer et étudier un nouveau dispositif audio-tactile portable : le [Harnais Multimodal](#). Ce harnais, envisagé dans la perspective d'exploitation de l'expérience du son comme une expérience de vibration, ouvre la voie à des applications en suppléance sensorielle pour le déficit auditif.

Le [projet acouphène](#) envisage le développement d'une application sur téléphone mobile, permettant au patient de manipuler la spatialisation sonore de l'acouphène une fois objectivé. Cette application de réalité augmentée basée sur le son 3D vise à promouvoir le soin à domicile.

Troubles neurologiques

Le projet de [thèse d'Iseline Peyre](#) (cf 2.2.1) inclut spécifiquement le thème d'auto-rééducation à domicile des membres supérieurs (post AVC) avec retour sonore/musical (financement de l'IUIS-Sorbonne). L'utilisation d'un retour sensoriel, conçu comme un contenu sonore ou musical motivant et porteur d'information sur le mouvement, semble particulièrement adapté à la situation de l'auto-rééducation. Un système spécifique pour l'auto-rééducation à domicile a été développé en utilisant un Raspberry Pi et les capteurs de mouvements RIoT., avec une interface dédiée qui est adaptable à chaque patient [Rodriguez-de la Nava 2020]. Un protocole a été soumis au comité d'éthique de la recherche de SU et INSEAD. Une première étude avec des utilisateurs de profils variés a été effectuée.

■ 3. Caractérisation des mécanismes neurophysiologiques, physiologiques et psychoacoustiques impliqués par l'utilisation du son et de la musique pour la santé et le mieux-être

Il s'agit de décrire ici les recherches permettant de caractériser les mécanismes potentiellement déficitaires dans une symptomatologie donnée, afin de mieux cibler la façon dont le son et la musique peuvent moduler ceux-ci. Il s'agit le plus souvent d'études de mécanismes chez le sujet sain, dont l'objectif est de comprendre comment leurs dysfonctionnements peut impacter le comportement. L'objectif est de pouvoir ensuite proposer des stratégies permettant de renforcer ces mécanismes, que ce soit par supplémentation, substitution, ou entraînement. Dans un premier temps, nous présentons les activités selon les modalités sensorielles impliquées dans les recherches. : modalité auditive seule, ou processus relevant de l'intégration multisensorielle (auditivo-motrice, auditivo-tactile, auditivo-visuelle), ainsi que leurs applications potentielles (liens avec les activités présentées dans les deux sections précédentes). Dans un deuxième temps nous présentons les projets se concentrant sur la voix humaine. Enfin, un volet d'activités se concentre sur la mise à jour des déterminants de l'effet du mieux-être liés à l'écoute musicale. Finalement, l'approche du musicien en tant qu'objet médical est proposée dans un abord historique.

3.1 Modalité sensorielle auditive

3.1.1 Relation entre asymétrie en sonie et force tonale (depuis 2019)

Les travaux menés sur l'asymétrie en sonie entre sons crescendo et decrescendo menés depuis plusieurs années en collaboration avec S. Meunier et J. Chatron (LMA-CNRS, Marseille) sont poursuivis en prenant en compte la force tonale. Nos résultats montrent qu'en faisant varier la force tonale d'un bruit INRS (iterated rippled noise), correspondant au premier pic de la fonction d'auto-corrélation, les asymétries en sonie sont d'autant plus faibles que la hauteur tonale est moins bien perçue. Ces travaux sont actuellement menés dans le cadre du post-doc d'Ossen El Sawaf, et s'inscrivent dans le cadre du développement de modèles de prédiction de la sonie.

3.1.2 Traitement temporel local-global en audition et ASA (depuis 2019)

L'objectif de ce travail est d'aborder l'analyse de scènes auditives (ASA) du point de vue du traitement temporel local-global de séquences sonores. Ce sujet s'inscrit dans un cadre plus général relatif aux différentes échelles temporelles de perception d'une forme sonore et à la

compréhension des processus de haut niveau (expertise) et de bas niveau (saillance, cf. thèse de Baptise Bouvier). Il vise également à tester le caractère amodal des processus de traitement local-global.

Les premiers résultats obtenus dans le cadre du stage de Nicolas Wenzel (Master Musicologie et Conception Sonore, Univ. Aix-Marseille) ont permis de mettre en relation les capacités de segmentation en flux auditifs et les performances des auditeurs dans le traitement local-global d'une séquence sonore. Un nouveau paradigme d'étude du traitement local-global permettant de comparer les processus en vision et en audition a été étudié dans le cadre du stage de Clement Leray (Master Musicologie et Conception Sonore, Univ. Aix-Marseille). De nouveaux stimuli sonores ont été proposés en utilisant le phénomène de perception du fondamental absent afin de permettre une présentation simultanée des informations aux niveaux local et global. Les tests ont montré de fortes variations inter-individuelles dans la perception du fondamental absent qui ne permettent pas d'exploiter ces stimuli dans une tâche de comparaison de traitement de l'information locale-globale. Un nouveau paradigme d'étude du traitement local-global temporel de séquences sonores a été proposé [hal-01998717]. Ce paradigme a permis récemment d'approfondir des différences inter-individuelles. Malgré une tendance générale qui montre un avantage de l'information globale et une interférence global-vs-local pour les non-musiciens, avec un pattern inversé pour les musiciens, les résultats mettent en évidence des différences inter-individuelles significatives soulignant une réorganisation temporelle modulée par la formation musicale et par l'adoption de différentes stratégies. Au-delà de la dichotomie musicien vs non-musicien, nous cherchons à mettre en évidence une réorganisation en plusieurs étapes du traitement auditif en fonction de l'apprentissage musical. Nos récents résultats expérimentaux montrent que les musiciens amateurs auraient développé une audition orientée davantage au niveau local par rapport à des non-musiciens, et les musiciens experts, en raison d'une pratique musicale quotidienne dans des ensembles, auraient élaboré une capacité à extraire des informations intégrées dans des séquences temporelles complexes.

3.2 Intégration multisensorielle

3.2.1 Audition et motricité

Alarmes et mouvement du corps

Dans le cadre d'une [collaboration avec l'IRBA](#) (contrat cadre), on étudie les indices acoustiques et auditifs qui permettent à une alarme sonore d'évoquer une réaction rapide et appropriée. L'analyse de sons naturels d'alarme (voix, cris) constitue le point de départ. Une deuxième piste consiste à évaluer les avantages qu'apporte la présentation multisensorielle (stimulation tactile, visuelle accompagnant l'alarme sonore) pour la détection de l'alarme. L'interaction multisensorielle de l'information auditive et la validité de ses avantages pour la détection de l'alarme sont étudiés en fonction de la position de la source sonore dans l'espace autour du corps. Les potentielles différences dans les réactions aux alarmes en fonction des caractéristiques des individus sont aussi explorées : en investiguant l'état auditif des sujets (pertes auditives cachées), et en mesurant l'impact possible de l'anxiété sur la réaction aux alarmes. De plus, les contraintes auxquelles sont soumis les individus seront prises en compte : en étudiant la perception de sources sonores en situation de charge perceptive élevée (étude de la surdité attentionnelle) et en situation de mouvement (étude du rôle des informations vestibulaires dans l'intégration des informations auditives et leur perception dans l'espace).

Audition spatiale et mouvement du corps

Nous nous attachons ici à démontrer le rôle spécifique de l'audition au sein du système de repérage spatial. Cette approche tente de prendre en compte la nature adaptative et multisensorielle des mécanismes mis en œuvre par le système nerveux central pour intégrer les informations spatiales acoustiques. Plus spécifiquement, notre objectif est de mettre en évidence l'importance des processus d'intégration entre les indices idiothétiques et les indices acoustiques (localisation, distance, réverbération,...) utilisés par le système nerveux central pour construire une représentation spatiale de l'environnement auditif perçu. Ces recherches ont notamment été menées dans le cadre du [projet DEFISENS \(2012-2014\)](#).

Une série d'expériences calquées sur un paradigme classique utilisé en neurosciences pour étudier la mémoire spatiale, le « Morris Watermaze » (Morris 1981) a été menée. Le dispositif utilisé permet aux sujets de l'expérience, équipés de marqueurs de position de la tête, de déambuler librement dans une zone de 29 m². Les sujets sont équipés d'un casque audio sans fil délivrant un paysage sonore mis à jour en temps réel en fonction de leurs mouvements dans l'espace. Un système de tracking sans fil (vidéo infra-rouge avec des marqueurs passifs) est utilisé pour transmettre au système de rendu sonore les coordonnées de la tête du sujet. Le système de rendu sonore utilise une base d'HRTFs synthétisant les indices directionnels et simulant les caractéristiques acoustiques de la pièce expérimentale de sorte à reproduire un environnement acoustique réaliste.

La tâche des sujets est de retrouver une cible sonore ne se déclenchant que lorsqu'ils ont atteint une position précise dans la zone. Pour réaliser cette tâche, ils ne disposent pas d'information visuelle, car ils sont dans le noir complet. L'espace virtuel dans lequel ils sont immergés est purement sonore. Ainsi, la réussite à la tâche repose uniquement sur les capacités du sujet à traiter les informations idiothétiques générées au cours de la déambulation en relation avec les informations auditives fournies par l'espace sonore. Après une phase d'apprentissage en 6 temps, la mémorisation de la scène sonore est évaluée dans 4 tests lors desquels certaines caractéristiques de la scène sonore sont variées. A la fin de l'expérience, les sujets sont soumis à une condition supplémentaire correspondant à un « probe » : le paysage sonore n'est pas modifié, mais la cible sonore est retirée.

Cette série d'expériences, dans laquelle nous avons pu étudier le rôle de la composition de la scène sonore, le rôles des différentes indices acoustiques et leur intégration avec les modalités sensorielles idiothétiques pour la cognition spatiale (cohérence du flux acoustique, cohérence des indices de distance acoustique et des indices idiothétiques, ...), et la représentation cognitive résultant d'une telle tâche, a permis d'observer que l'homme normo-entendant est capable de construire une carte cognitive spatiale sur la seule base d'indices idiothétiques et auditifs. Les modifications de la scène spatiale lors des tests semblent indiquer que contrairement à la vision, l'audition est une modalité sensorielle par laquelle l'accès à une représentation allocentrique de l'espace pourrait être automatique (Viaud-Delmon & Warusfel 2014). Nous avons par la suite introduit un avatar sonore dans notre paradigme expérimental, c'est-à-dire une manifestation auditive de la présence de l'utilisateur dans le monde virtuel exclusivement sonore dans lequel il évolue. Le concept d'avatar sonore permet une interactivité bi-directionnelle entre le monde virtuel et le sujet. Ce dernier ne se contente pas de se mouvoir en fonction de l'espace sonore dans lequel il est immergé, mais ses mouvements peuvent également modifier l'espace sonore environnant. Introduire un avatar sonore dans la scène auditive revient à spatialiser un signal sonore produit par le déplacement d'un des segments corporels du sujet (ici les pieds), la conception de l'avatar devant résulter d'un compromis entre la facilité avec laquelle on peut le repérer et l'interpréter, et la minimisation de sa surcharge auditive (masquage). Nos études incluant un rendu sonore des pas du sujet dans l'environnement virtuel indique que le retour sonore de l'action motrice du sujet contribue à la construction de l'espace représenté. La manipulation des paramètres de rendu sonore de celle-ci dans les phases de test modifie en effet les patterns de recherche de la cible dans l'environnement sonore.

3.2.2 Sonification du mouvement

Dans le cadre du [projet ANR ELEMENT](https://element-project.ircam.fr/) (https://element-project.ircam.fr/, 2019-2022) en collaboration avec l'université Paris-Saclay et le CNRS (laboratoire LISN), l'équipe ISMM travaille sur les questions d'apprentissage de mouvement avec des systèmes interactifs. Ce projet implique plusieurs axes de recherche, des études de terrain liées à des applications spécifiques au développement de modèles d'analyse de mouvement et d'outils interactifs. Il représente une suite du projet ANR Legos (cf Section 2 sur la rééducation) et permet de développer des systèmes d'apprentissage sensori-moteur et d'étude de la relation entre mouvement et son.

Des études de terrain et des études expérimentales contrôlées en laboratoire, couplées au développement de modèles, d'outils logiciels et de prototypes sont menées. Premièrement, des méthodologies de design centrées sur les utilisateur-trice-s sont mises en pratique dans le contexte de pratiques de musique et de danse. Deuxièmement, nous développons des modèles informatiques en tirant parti de notre expertise sur l'apprentissage machine "interactif" et centré sur l'utilisateur. Une telle approche diffère des approches classiques de l'apprentissage machine qui reposent généralement sur de grands ensembles de données et se concentrent sur l'amélioration des algorithmes. Troisièmement, nous développons des plateformes logicielles et prototypes, s'appuyant sur des environnements de programmation interactifs ou des technologies Web, qui sont particulièrement bien adaptées aux usages collaboratifs.

Les études expérimentales ont permis de mettre en avant des concepts et principes pour appréhender l'apprentissage du mouvement et pour le design d'applications interactives. Des bases de données ont été produites et diverses méthodes d'apprentissage machine ont été évaluées dans notre contexte. Plusieurs plateformes ont été développées. En particulier le laboratoire a développé CoMo, une plateforme pour créer des applications d'interaction sonore avec le mouvement. Plusieurs applications spécifiques ont été créés, en collaboration avec divers partenaires et institutions externes pour l'éducation (CoMo.education en maternelle et CoMo-Vox pour la pédagogie musicale, en collaboration avec Radio France et le soutien de du Ministère de l'Education Nationale) et la rééducation (CoMo-rééducation).

Le dispositif CoMo-Rééducation, porté par le travail de thèse d'Iseline Peyre, va être poursuivi. Le dispositif permet de sonifier le mouvement afin d'aider et de motiver des patients lors de leur rééducation suite à un AVC. Le système est particulièrement adapté pour la rééducation en autonomie supervisée par un thérapeute.

Sonification spatialisée de segments corporels pour le guidage de l'action (EAC) – projet DEFISENS (2012-2014)

Les liens entre perception et action sont principalement abordés par l'investigation du rôle des informations visuelles dans le contrôle de l'action. Tout un courant d'études se concentre en particulier sur le pointage manuel vers des cibles visuelles. Les questions posées sur la coordination visuo-manuelle ne l'ont jusqu'à présent pas été sur la coordination auditivo-manuelle. Notre objectif est de décrire les mécanismes par lesquels un input auditif est transformé en une commande motrice. Au moyen de tests perceptifs, nous avons cherché à identifier les paramètres acoustiques permettant de développer des avatars sonores améliorant des tâches de pointage dans des environnements virtuels auditifs. Dans de telles tâches, on peut en effet imaginer que la perception de la distance entre une source fixe située dans l'espace proximal et une source dynamique attachée à la main, représente un indice améliorant la précision du mouvement.

L'équipe a développé un environnement pour l'évaluation psycho-acoustique des mouvements de préhension dans l'espace proche du sujet. Toutes les étapes de traitement sont implémentées dans MaxMsp, avec les bibliothèques de traitement de l'Ircam (Spat, ftm, etc.). Un système de suivi de mouvements par caméras infrarouges est disponible pour traquer les objets dans l'espace, permettant ainsi d'attacher un objet sonore à un segment corporel du sujet. Le retour auditif des mouvements du sujet dans l'espace constitue une augmentation sensorielle permettant d'affiner le comportement sensorimoteur pour l'exploration du monde virtuel.

Ces expériences indiquent que le retour auditif spatial d'un mouvement peut perturber le contrôle moteur lorsque celui-ci est spatialement décalé par rapport au mouvement effectué. Cela laisse présager de multiples développements expérimentaux et applicatifs. Si le retour sonore des actions est intégré au contrôle de l'action, il est probable que la manipulation de celui-ci permette de modifier rapidement le schéma corporel et l'image du corps (Boyer et al 2013).

3.2.3 Audition et vision

Plusieurs études ont été réalisées en réalité virtuelle (*projets européens Crossmod 2004- 2008, projet européen VERVE 2010- 2014*), et en réalité augmentée (collaboration Orange Labs 2016-2019), afin de caractériser l'importance des facteurs temporels, spatiaux et sémantiques facilitant la reconnaissance et la réaction à un stimulus visuo-auditif (Nguyen et al 2009 ; Moreira et al 20XX).

Dans le cadre des projets européens Crossmod (2004- 2008) puis VERVE (2010- 2014), nous sommes concentrés sur le rôle de la congruence sémantique et spatiale des informations, et sur la modulation émotionnelle et spatiale de l'intégration des informations.

Nous avons fait varier systématiquement le contenu sémantique et la disparité spatiale dans des tâches de reconnaissance d'objets visuels, auditifs et visuo-auditifs (temps de réaction de type go/no-go). Une importante facilitation bimodale est observée lors de la présentation d'objets visuo-auditifs. D'une façon surprenante, les résultats suggèrent que la disparité spatiale a un rôle mineur sur la reconnaissance de l'objet : des informations auditives et visuelles alignées ne facilitent pas la reconnaissance, pas plus que des informations disparates n'aident à ignorer un distracteur. Enfin, un effet d'interférence a été observé spécifiquement pour les distracteurs auditifs. Les temps de réaction peuvent être plus longs dans une condition sémantiquement incongruente que dans une condition unimodale, mais uniquement avec un distracteur auditif. En d'autres termes, il est possible d'ignorer un distracteur visuel, mais il n'est pas possible d'ignorer un distracteur auditif. Ce résultat met en avant une asymétrie dans le filtrage attentionnel des informations auditive et visuelle (Suied et al 2009).

Nous avons étudié cette asymétrie attentionnelle de sorte à comprendre si l'effet était dû à la spécificité du système auditif comme système d'alerte ou à la particularité des stimuli utilisés. Nous avons étudié l'influence de catégories sémantiques ayant une pertinence biologique ou non (animaux ou moyens de transport) en faisant varier systématiquement les catégories et les relations inter-catégories des objets cibles et des objets distracteurs. Aucune différence de temps de réaction n'a été observée entre les deux catégories, animaux et moyens de transport, que ce soit en cible auditive, visuelle ou visuo-auditive, comme déjà rapporté dans la littérature (Murray et al 2006) ; VanRullen et Thorpe 2001). Les stimuli complexes semblent être traités tout aussi efficacement, qu'ils soient biologiques ou non. Les résultats confirment qu'il est possible d'ignorer un distracteur visuel. Cependant, l'effet d'interférence des distracteurs auditifs n'est observé que lorsque celui-ci est un animal, et ce, quelle que soit la cible (moyens de transport ou animal). Ces résultats suggèrent un traitement spécifique des sons d'animaux pour lequel la mémoire phylétique pourrait avoir un rôle (Suied & Viaud-Delmon 2009).

Nous avons également travaillé sur l'intégration visuo-auditive dans le cadre de situations potentiellement anxiogènes (exposition à des chiens ou à des foules), permettant de se pencher sur les liens entre l'intégration des informations sensorielles et l'émotion. Les conditions de présentation sensorielle ont été comparées (auditive, visuelle, visuelle et auditive), ainsi que les conditions de localisation du stimulus potentiellement phobogène dans l'environnement virtuel. Les résultats de ces études indiquent que la présentation visuo-auditive du stimulus potentiellement phobogène augmente le ressenti négatif par rapport à la présentation unimodale. Cependant, cet effet n'est observé que lorsque le stimulus phobogène se trouve à une distance proche des participants. Quand le stimulus se trouve à une distance plus lointaine, la présentation sensorielle n'a pas d'influence sur le ressenti des participants. Ces résultats suggèrent que l'effet de la présentation sensorielle sur le ressenti émotionnel dépend de la localisation spatiale du stimulus phobogène (Taffou et al xxx).

3.2.4 Audition et perception tactile

Intégration auditivo-tactile pour l'estimation de l'espace peripersonnel

Nous avons cherché à évaluer la distance critique à partir de laquelle un stimulus phobogène génère de la peur et la façon dont cette distance critique interagit avec la présentation sensorielle du stimulus phobogène (auditive, visuelle, visuo-auditive). Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la façon dont la sensibilité à un stimulus phobogène pouvait influencer la taille de l'espace péri-personnel. L'espace péri-personnel (en opposition à l'espace extra-personnel) est la zone que nous maintenons activement autour de notre corps, dans laquelle une stimulation indésirable génère de l'inconfort. Deux groupes de participants (sensibles et non sensibles à la phobie de chiens) ont exécuté une tâche de détection tactile pendant qu'ils entendaient des stimuli sonores de chien ou de mouton approcher vers eux (fig.2).

Afin de manipuler la localisation virtuelle des sources sonores, les stimuli auditifs ont été traités par la technique de rendu binaural en utilisant des HRTFs non-individuelles. Puisque le traitement d'un stimulus tactile est accéléré lorsque qu'un stimulus auditif est présent dans l'espace péri-personnel (Canzoneri et al. 2012), nous avons mesuré les temps de réaction au stimulus tactile lorsque les stimuli sonores étaient localisés à différentes distances du participant afin de déterminer la taille de l'espace péri-personnel. Alors que les deux groupes de sujets ont un espace péri-personnel de taille similaire face au stimulus de mouton, seul le groupe d'individus sensibles à la phobie voit son espace péri-personnel agrandi face au stimulus de chien (Taffou & Viaud-Delmon 2014).

Ce paradigme est étendu à plusieurs questions expérimentales interrogeant la mise en activation du système de défense chez l'homme, et a notamment permis de mettre en évidence que la rugosité auditive est à l'origine de réponses accélérées à la détection tactile (Taffou et al 2021). Ces recherches sont menées en [collaboration avec l'IRBA via le contrat cadre](#).

Transmission de l'information sonore par stimulation vibratoire et conduction osseuse

Lors de la [thèse CIFRE de Claire Richards](#) (collaboration Ensci - Centre de Recherche en Design, ENS Paris-Saclay, et la société Actronika, 2019-2022) a été développé un dispositif audio-haptique pour la transmission du son et de la musique par conduction osseuse et stimulation vibrotactile (Etude des effets tactiles associés à la conduction osseuse, et à la spatialisation des sensations sonores et vibrotactiles). Après une première étape de caractérisation expérimentale des seuils de perception associés à des stimulations multisensorielles réparties sur le haut du corps (colonne vertébrale, clavicule, etc.), le travail s'est penché sur le développement d'un prototype de *wearable* intégrant la technologie Actronika et ouvrant sur des questions d'écoute et de composition multimodale du son et de la musique. Cette étape s'est effectuée en collaboration avec un atelier de design costumier (Les Vertugadins) et a donné lieu à un premier prototype fonctionnel qui a permis d'initier un travail de recherche en design dans 2 directions principales. D'une part, un travail spéculatif sur les différents usages et scénarios d'usage rendus possibles par le dispositif. Et d'autre part, un travail exploratoire sur les interfaces de composition et de contrôle potentiellement adossables à un tel dispositif. Ce deuxième axe a notamment fait l'objet d'un workshop (été 2021) qui a permis d'initier une phase de développement d'outils-auteur de composition et de design des signaux sonores et haptiques ainsi que de leur traitements et transformations.

3.3 Modélisation de l'appareil phonatoire humain

Projet LARYNX (2013, PEPS-PTI-CNRS) :

Interactions fluide-structure-acoustique en voix humaine : modélisation et validation sur maquettes et LARYNX humains excisés (coordonné par N. Henrich-Bernardoni, GIPSA-lab, Grenoble)

S'inscrivant dans une démarche pluri-disciplinaire de physique et de physiologie, le projet CNRS-PTI-LARYNX a permis d'étudier et modéliser les interactions fluide-structure-acoustique au sein du larynx dans un cadre contrôlé et reproductible : sur larynx humain excisé et sur maquette auto-oscillante des plis vocaux. Il a aussi permis de modéliser l'impact de ces interactions au niveau fonctionnel (origine des dysfonctions et des troubles de la voix) et acoustique (qualité vocale, efficacité).

Projet ANIMAGLOTTE (2018-2019, DEFI-Instrumentation aux limites-CNRS) :

Système artificiel d'animation de larynx humains ex vivo (coordonné par T. Legou, LPL, Aix-en-Provence)

Ce projet a permis d'élaborer un système mécanisé d'animation de larynx excisé pour l'étude de l'action des différents muscles (crico-thyroïde, crico-aryténoïde, crico-aryténoïde latéral, crico-aryténoïde postérieur, aryténoïde-transverse) impliqués dans la phonation. Ce banc est capable de reproduire l'étendue des configurations du plan glottique observées in vivo, par l'application de forces mécaniques exercées en différents points du Larynx (présentation disponible [ici](#)).

Dans le cadre de ces activités se déroule la thèse de [Thomas Risse \(2022-2025\)](#) "Auto-oscillations de l'appareil vocal : modélisation physique, analyse de régimes et synthèse sonore" Dir.: T. Hélie, co-encadré par F. Silva (LMA) et A. Falaize (LaSIE). Voir également le projet AVATARS décrit en partie 2.1.2.

3.4 Les effets de l'écoute

Si les bienfaits de la pratique musicale – comprise comme activité à la fois corporelle et cognitive – sont communément admis, les effets de l'écoute – sous son versant plus passif – sur notre bien-être méritent d'être davantage analysés. Il s'agit donc ici d'explorer un certain nombre d'hypothèses permettant de mieux comprendre pourquoi le simple fait d'écouter de la musique peut nous faire du bien. Nous nous pencherons pour commencer sur deux aspects particulièrement négligés : la dimension sociale de l'écoute en concert et la relation entre musique et humour.

Projet de Concert-Laboratoire sur l'écoute musicale en situation de concert à l'Espace de Projection (Clément Canonne, APM ; Emmanuel Ponsot, Patrick Susini, PDS, Coralie Vincent, EAC)

Les études empiriques sur l'expérience du public en situation de concerts ont connu un fort regain d'intérêt lors des années récentes (voir par exemple le projet de MusicLab dirigé par Simon Høffding : <https://www.uio.no/ritmo/english/projects/musiclab/about/index.html> et les travaux du LiveLab à McMaster University, Canada). Loin de considérer l'expérience musicale comme un phénomène purement individuel, pris en son splendide isolement, celle-ci est au contraire de plus en plus souvent appréhendée sous sa double dimension sociale (en présence d'autres écoutants), interactive (en présence de musiciens jouant en direct). Cependant, ces travaux restent souvent d'ordre purement descriptif et s'arrêtent, qui plus est, au seuil de la question de l'écoute, pour se concentrer davantage sur les états émotionnels des auditeurs et leurs corrélats physiologiques (tension, rythme cardiaque, etc.). Les mécanismes attentionnels et cognitifs sous-tendant l'écoute musicale en situation de concert n'ont donc pas encore fait l'objet d'une analyse systématique. Y a-t-il une écoute conjointe – qui verrait les co-écouterants prêter attention à la même chose au même moment – qui se met en place entre les membres du public ? Dans quelle mesure sommes-nous influencés par l'écoute des autres ? Quel est le rôle des informations visuelles dans la régulation de l'écoute en situation de concert ? La localisation des sons dans l'espace de la salle guide-t-elle notre écoute et impacte-t-elle notre mémoire de la pièce entendue ? Ces questions, centrales pour l'analyse de l'écoute en concert, n'ont pas encore reçu l'attention qu'elles méritent. Nous entendons donc remédier à cette lacune à travers l'organisation d'un concert-laboratoire, en nous concentrant tour à tour sur les trois dimensions caractéristiques du concert : sa dimension collective ; sa dimension spatiale ; sa dimension audio-visuelle.

Le concert est également un lieu qui rassemble des auditeurs aux profils variés, tant d'un point de vue culturel que d'un point de vue physiologique. Il est en particulier capital de mieux comprendre dans quelle mesure les pertes auditives peuvent moduler l'expérience d'écoute en situation de concert. Notre concert-laboratoire comportera donc également un certain nombre de situations permettant d'éclairer l'effet des pertes auditives sur l'écoute musicale, et ainsi de contribuer à la réflexion, de plus en plus urgente, sur la nécessaire prise en compte de la diversité des profils d'écoute aux différents niveaux de la chaîne de production du musical.

Projet Cognition de l'humour musical (APM, PDS)

Il s'agit de s'intéresser aux œuvres et aux pratiques musicales dont le but est de susciter l'amusement (qu'il convient de bien distinguer du divertissement comme de la joie), voire le rire. Il y a là une des dimensions fondamentales du faire musical : nous musiquons (qu'il s'agisse d'écoute ou de performance) aussi pour nous amuser. Le succès sur YouTube des vidéos de Shitty Flute, des parties de Trombone Champ, ou des innombrables covers parodiques et autres shreds devrait suffire à s'en convaincre. Mais si les sciences de la musique se sont penchées depuis longtemps sur d'autres dimensions des pratiques musicales (et notamment la dimension émotionnelle de la musique, ou la relation de la musique aux émotions et au plaisir, voir Juslin 2019 ; la dimension esthétique de la musique, ou la relation de la musique au beau, voir Zangwill 2015 ; et la dimension festive de la musique, ou la relation de la musique au divertissement, voir Horsfall et al. 2013), la condition ludique de la musique reste encore étonnamment largement à questionner.

À travers une série d'études aux méthodologies variées (analyse systématique des commentaires de vidéo YouTube, études perceptuelles à partir de stimuli manipulés (voir Rodriguez et al., forthcoming, pour de premiers résultats), ethnographie de pratiques musicales humoristique, le projet visera à identifier les mécanismes qui sous-tendent l'appréhension de l'humour musical, et, plus généralement, à mieux comprendre ce qui a le pouvoir de nous faire rire dans le son musical.

3.5 Aspect historique et musicologique

L'équipe APM propose de se situer au carrefour de l'histoire de la musique, de l'esthétique musicale, de l'histoire et de la philosophie de la médecine, en croisant les approches monographiques, comparées et synthétiques, et organise un colloque en 2023 dans cette mouvance. L'objectif n'est pas de s'inscrire dans la dynamique prônant l'apport des arts dans les sciences médicales, dont la qualité principale serait de développer la sensibilité, l'empathie ou la compréhension universelle. Ici, nous nous demanderons comment le musicien de l'époque moderne devient un objet d'étude, et plus précisément un patient ou un malade de choix.

Colloque « Musique et maladie », sous la direction de Vincent Barras, Laurent Feneyrou (CR-CNRS, APM) et Céline Frigau Manning , octobre 2023

Le colloque « Musique et maladie », organisé par l'Ircam, avec l'Institut des humanités en médecine (Lausanne) et l'IHRIM (CNRS, Lyon), se propose de nouer l'histoire de la médecine et l'histoire de la musique dans le monde occidental, et d'interroger les conditions et les méthodes de leur dialogue à l'âge moderne, du XVIII^e siècle à la fin du XX^e siècle. Il ne porte pas principalement sur la santé, le soin et les vertus thérapeutiques de la musique, mais sur l'étude des maladies. Trois types d'approches sont envisagés :

1. Des études de cas ou des pathographies d'artistes, compositeurs et interprètes, dont la figure devient décisive avec l'affirmation du sujet moderne. Dans un saisissant renversement, ce compositeur ou cet interprète, autrefois sorte d'Orphée, exprime, expose son *pathos*, et devient malade, de plus en plus gravement : Bach, Haendel, Mozart, Beethoven, Schubert, Mendelssohn, Chopin, Schumann, Puccini, Ravel, Bartók, par exemple, permettent d'aborder la chirurgie de l'œil, des tableaux cliniques plus ou moins complexes, des troubles psychiatriques, mais aussi l'histoire de l'hygiène, de l'hôpital ou de la sexualité, la pharmacologie, la pratique de l'autopsie... Il ne s'agit plus seulement d'établir un diagnostic, mais d'écrire une pathographie. Un tel genre implique un renouveau de la biographie et un régime singulier de discursivité qu'il conviendra d'interroger. En ce sens, les communications se garderont bien de produire une énième tentative d'interprétation médicale qui prétendrait expliquer la créativité des musiciens ou plus largement le phénomène artistique au prisme des savoirs médicaux positifs du moment. Nous viserons, au contraire, à étudier les pathographies existantes ou le genre même dont elles relèvent en questionnant la tentation de soustraire le regard médical à sa détermination historique, ainsi que les modalités de prise en considération, du point de vue musical comme musicologique, du corps naturel de l'artiste.
2. Des études par maladies – syphilis, tuberculose, cancer, Sida..., mais aussi, dans le champ psychiatrique, schizophrénie et psychose maniaco-dépressive ou trouble bipolaire, auxquels s'ajoutent les pathologies construites comme spécifiquement musicales, comme les amusies, hypermusies, obsessions, « vers auditifs » ou « vers cérébraux ». Il conviendra d'étudier l'histoire de ces maladies et leurs descriptions médicales, à travers traités et autres documents historiques, mais aussi d'examiner la manière dont ces maladies sont rapportées à des musiciens, à leurs œuvres ou à leurs interprétations, à leurs discours, ainsi qu'à des représentations musicales, notamment dans le domaine, également littéraire et scénique, de l'opéra. Comment, par exemple, Verdi ou, récemment, Péter Eötvös représentent-ils, dans le genre lyrique, la tuberculose et le Sida, ou plus exactement celles et ceux atteints par ces maladies ?
3. Des études par disciplines médicales, en mesurant, par exemple, l'histoire de l'obstétrique à l'aune de la représentation de la naissance dans le domaine musical ; l'histoire de la pédiatrie à celle de l'enfance, vivace depuis le XIX^e siècle, de Schumann à Stockhausen ; l'histoire de la pneumologie, particulièrement efficiente dans le cas du romantisme tardif, à celle du souffle ; ou l'histoire de la cardiologie à celle du rythme, ce dernier point faisant signe vers le thème, séculaire, de la musique et du pouls, connu depuis Hérophile, que François Nicolas Marquet revivifie au XVIII^e siècle, avec sa *Nouvelle Méthode facile et curieuse, pour connoître le pouls par les notes de la musique*, et dans lequel s'inscrit une composition comme *Cardiophonie* de Heinz Holliger.

■ 4. Recensement et description des moyens techniques

Il ne s'agit pas ici de faire une description exhaustive du fonctionnement des techniques (hardware et software) mais de recenser ce que le laboratoire utilise, ce qu'il a facilement à disposition, ce dont il sait se servir. Il pourrait être également utile de préciser si le dispositif a une certification médicale et si oui de quelle classe (pour les outils du commerce). Voir si il faut rajouter une rubrique pour les dispositifs liés aux tests perceptifs : selon le niveau de détail ça risque d'être long et pas forcément facile à présenter.

4.2 Dispositifs

4.2.1 Capture du geste

Enjeux et développements

4.2.2 Spatialisation

La librairie *Spat~* constitue le développement phare de l'équipe EAC. Il s'agit d'une bibliothèque de modules de traitement du signal audio temps-réel dédiés à la spatialisation sonore. Cette bibliothèque écrite en C++ trouve son incarnation majeure dans l'environnement MAX/MSP (sous OSX ou Windows) mais la plupart des modules existent également sous d'autres formes (Linux, Matlab). Elle consigne le savoir-faire de l'équipe EAC, avec de constantes mises à jour et représente notre vecteur principal de diffusion vers la communauté scientifique et musicale interne et externe. Pour l'axe SMS elle sert régulièrement soit pour l'infrastructure logicielle des expériences ou au moins pour la constitution des stimuli.

4.2.3 Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée

A l'occasion de différents projets de recherche ou de de collaboration clinique (acouphènes) nous avons été amenés à exploiter différents environnements de réalité virtuelle open source (e.g. Ogre3D) ou commerciaux (Virtools, Unity). Le plus souvent ces applications ont été utilisées pour gérer la composante visuelle et interactive, tandis que la composante audio était prise en charge par Max/MSP, la communication entre les deux étant assurée par protocole OSC. Une discussion est en cours pour tenter d'intégrer la librairie Spat~ au sein de Unity.

4.2.4 Dispositifs commerciaux disponibles

Dispositifs commerciaux (visiocasques, casques audio, systèmes de captation du mouvement, ...)

- Captation de mouvement avec capteurs inertiels (full-body), Système Perception Neuron
- Différents systèmes de tracking par caméras infra-rouge (Optitrack)
- Divers casques HMD (certains encore dans leur emballage...) Hololens, Oculus Rift, Vive, Sony
- Multiples casques audio fermés ou ouverts (notamment HD650)
- 2 casques audio totalement transparent AKG K1000 utiles pour mener des expériences en réalité augmentée
- Microphone sphérique (EM32 MH acoustics) pour prise de son spatialisée au format HOA (4th order)
- Haut-parleur à directivité contrôlée IKO (vingt transducteurs indépendants)
- Haut-parleur omnidirectionnel (ACOEM).
- Ecran de projection stéréoscopique 3mx2m + lunettes polarisantes (stéréoscopie passive)

Dispositifs développés en interne ou via collaboration (gilet haptique, capteurs, objets connectés, ...)

- Capteurs inertiels WiFi (accéléromètres, gyroscope, magnétomètre) RIoT, commercialisés par la Plux (Bitalino- Riots)
- Système Como-Rééducation
- Systèmes Como-Elements Como-education

4.2 Moyens d'expérimentation / évaluation

4.2.1 Expertises méthodologiques

Développement d'environnements logiciels (p. ex., jsPsych dans PDS)

- Logiciel CoMo pour l'interaction mouvement-son et interaction collective, utilisant une infrastructure Client-Serveur (Node.JS, avec la librairie IRCAM Soundworks).
- Librairie MuBu (Max/Msp) pour la captation, analyse de mouvement et synthèse sonore interactive

4.2.2 Infrastructures

- 2 cabines psycho-acoustiques
- 1 chambre anéchoïque
- Studio équipé d'un dôme ambisonique (24 HPs)

■ 5. Aspects éthiques

Les activités de cet axe ont des aspects éthiques inévitables puisqu'elles impliquent la personne humaine. Nous faisons appel à différents types de comités pour valider nos protocoles, selon le type de finalité visé par la recherche (médicale ou élément non médical en interaction avec l'homme). Nos recherches sont systématiquement non interventionnelles et ne comportent aucun risque ni contrainte. Elles sont visées par le comité d'éthique de Sorbonne Université ou de l'INSEAD dans le cadre de la loi informatique et liberté lorsqu'elles ne sont pas à visée médicale. Les recherches utilisant des dossiers médicaux ou de données personnelles (à visée médicale) sont soumises à l'avis d'un comité de protection des personnes (CPP).

Conclusion

Ce document donne un aperçu du grand nombre d'activités scientifiques du laboratoire STMS s'intéressant directement à des aspects médicaux de la dimension sonore. Il permet également d'apprécier la diversité des applications potentielles de l'expertise de nos équipes au domaine de la santé. Nous recevons de nombreuses sollicitations de divers professionnels de la santé (cliniciens, médecins hospitaliers, paramédicaux), et y répondre ne doit pas relever d'une prestation de service anecdotique mais s'inscrire dans une activité de recherche avec des finalités et des perspectives clairement définies. Le recensement et l'organisation des activités de STMS permettront de pérenniser et de fédérer le savoir et les technologies, aboutissant à la reconnaissance du laboratoire en tant qu'acteur du champ de la recherche sur le son, la musique et la santé. Afin d'y parvenir, plusieurs types de verrous doivent être systématiquement identifiés et clarifiés :

- d'ordre technique (e.g. difficulté d'implémentation)
- d'ordre pratique (e.g. difficulté de maintenance des applications développées, à cause de l'évolution rapide des dispositifs)
- d'ordre clinique (e.g. difficulté d'accès au patient pour valider une application ; contraintes hospitalières alourdissant les procédures),

- d'ordre financier (e.g. spécificité des ressources humaines nécessaires afin de tester un développement auprès d'une population clinique ; prix des équipements et des protocoles à mettre en place)
- d'ordre scientifique (manque de connaissances et de mécanismes reconnus sur lesquels établir des propositions pour la santé).

PUBLICATIONS

■ Articles parus dans des revues à comité de lecture

- [Bertet et al., 2013] Bertet, S., Baskind, A., Londero, A., Bonfils, L., Viaud-Delmon, I., Warusfel, O., Design and evaluation of tinnitus synthesis methods: From spectral to spatial matching. *American Journal of Otolaryngology*, 2013, 34 (2)
- [Bevilacqua et al., 2016] Bevilacqua, F., Boyer, E. O., Françoise, J., Houix, O., Susini, P., Roby-Brami, A., and Hanneton, S. (2016). Sensorimotor learning with movement sonification: Perspectives from recent interdisciplinary studies. *Frontiers in Neuroscience*, 10:385.
- [Boyer et al., 2020] Boyer, E. O., Bevilacqua, F., Guigon, E., Hanneton, S., and Roby-Brami, A. (2020). Modulation of ellipses drawing by sonification. *Experimental Brain Research*, pages 1–14.
- [Ley-Flores et al., 2022] Ley-Flores, J., Alshami, E., Singh, A., Bevilacqua, F., Bianchi-Berthouze, N., Deroy, O., and Tajadura-Jiménez, A. (2022). Effects of pitch and musical sounds on body-representations when moving with sound. *Scientific reports*, 12(1):1–20.
- [Londero et al., 2010] Londero, A., Viaud-Delmon, I., Delerue, O., Bertet, S., Bonfils, P., Warusfel, O., Auditory and visual 3D virtual reality therapy for chronic subjective tinnitus: theoretical framework. *Virtual Reality* 2010;14:143-51.
- [Malinvaud et al., 2016] Malinvaud, D., Londero, A., Niarra, R., Peignard, Ph., Warusfel, O., Viaud-Delmon, I., Chatellier, G. and Bonfils, P. . Auditory and visual 3D virtual reality therapy as a new treatment for chronic subjective tinnitus: Results of a randomized controlled trial. *Hearing Research*, 333:127 – 135, March 2016.
- [Suied et al., 2013] Suied C, Drettakis G, Warusfel O, Viaud-Delmon I. (2013) Auditory-visual virtual reality as a diagnostic and therapeutic tool for cynophobia. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16(2):145-152.
- [Taffou et al., 2016] Taffou, M., Ondrej, J., O’Sullivan, C., Warusfel, O., Dubal, S. and Viaud-Delmon, I. Multisensory aversive stimuli differentially modulate negative feelings in near and far space, *Psychological Research*, 2016. <http://hal.upmc.fr/hal-01319994>.
- [Taffou et al., 2014] Taffou M & Viaud-Delmon I. (2014) Cynophobic fear adaptively extends peri-personal space. *Frontiers in Psychiatry*, 5(122), doi: 10.3389/fpsy.2014.00122.
- [Taffou et al., 2013] Taffou M, Guerchouche R, Drettakis G, Viaud-Delmon I. (2013) Auditory-visual aversive stimuli modulate the conscious experience of fear. *Multisensory Research*, 26:347-370.
- [Taffou et al., 2017] Taffou M, Ondrej J, O’Sullivan C, Warusfel O, Dubal, S, & Viaud-Delmon I. (2017) Multisensory aversive stimuli differentially modulate negative feelings in near and far space”, *Psychological Research*, 81(4):764-776 .
- [Taffou et al., 2012] Taffou M., Chapoulie E., David A., Guerchouche R., Drettakis G. & Viaud-Delmon I. (2012) Auditory-visual integration of emotional signals in a virtual environment for cynophobia, *Studies in health technology and informatics*, 181: 238-42.
- [Hobeika et al., 2020] Hobeika L, Taffou M, & Viaud-Delmon I. (2020). Social impact on audiotactile integration near the body. *Acoustical Science and Technology*, 41(1), 345-348.
- [Hobeika et al., 2020] Hobeika L, Taffou M, Carpentier T, Warusfel O, & Viaud-Delmon I. (2020) Capturing the dynamics of peripersonal space by integrating expectancy effects and sound propagation properties. *Journal of Neuroscience Methods*, 332, pp.108534.
- [Hobeika et al., 2019] Hobeika L, Taffou M, & Viaud-Delmon I. (2019) Social coding of the multisensory space around us. *Royal Society Open Science*, The Royal Society, 6 (8), pp.181878.
- [Isnard et al., 2019] Isnard V, Chastres V, Viaud-Delmon I, & Suied, C. (2019) The time course of auditory recognition measured with rapid sequences of short natural sounds. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 9 (1).
- [Taffou et al., 2015] Taffou M, Ondrej J, O’Sullivan C, Warusfel O., Dubal S, & Viaud-Delmon I. (2015). Auditory-visual virtual environment for the treatment of fear of crowds. In *Proceedings of VRIC 2015 Virtual Reality International Conference - Laval Virtual*, Laval, France — April 8 - 12, 2015, ACM Digital Library.
- [Taffou et al., 2014] Taffou M & Viaud-Delmon I. (2014) Cynophobic fear adaptively extends peri-personal space. *Frontiers in Psychiatry*, 5(122), doi: 10.3389/fpsy.2014.00122.
- [Taffou et al., 2021] Taffou M., Suied C., & Viaud-Delmon I. (2021) Auditory roughness elicits defense reactions. *Scientific reports*, 11(1), 956.
- [Viaud-Delmon et al., 2014] Viaud-Delmon I & Warusfel O. (2014) From ear to body: the auditory-motor loop in spatial cognition. *Frontiers in Neuroscience*, 8(283), doi: 10.3389/fnins.2014.00283.
- [Boyer et al., 2013] Boyer EO, Babayan BM, Bevilacqua F, Noisternig M, Warusfel O, Roby-Brami A, Hanneton S, & Viaud-Delmon I. (2013) From ear to hand: the role of the auditory-motor loop in pointing to an auditory source. *Front. Comput. Neurosci.* 7:26. doi: 10.3389/fncom.2013.00026.
- [Suied et al., 2013] Suied C, Drettakis G, Warusfel O, & Viaud-Delmon I. (2013) Auditory-visual virtual reality as a diagnostic and therapeutic tool for cynophobia. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16(2):145-152.
- [Viaud-Delmon et al., 2012] Viaud-Delmon I, Gaggioli A, Ferscha A, & Dunne S. (2012) Human computer confluence applied in healthcare and rehabilitation, *Studies in health technology and informatics*, 181:42-5.
- [Suied et al., 2009] Suied C & Viaud-Delmon I. (2009) Auditory-visual object recognition time suggests specific processing for animal sounds. *PLoS ONE*, 4(4):e5256. DOI:10.1371/journal.pone.0005256.
- [N’Guyen et al., 2009] N’Guyen KV, Suied I, Viaud-Delmon I, & Warusfel O. (2009) Spatial audition in a static virtual environment: the role of auditory-visual interaction. *Journal of Virtual Reality Broadcasting*, 6 (5). urn:nbn:de:0009-6-17640, ISSN 1860-2037.
- [Suied et al., 2009] Suied C, Bonneel N, & Viaud-Delmon I. (2009) Integration of auditory and visual information in the recognition of realistic objects. *Experimental Brain Research*, 194(1):91-102.
- [Rodriguez et al., forthcoming] Rodriguez, H, Arias P, & Canonne C. (2023). Contrasts of register underlie the perception of musical humor. *Music Perception*.

■ Conférences invitées dans des congrès nationaux et internationaux

- Viaud-Delmon I., De l’intégration visuo-vestibulaire à la physiopathologie de l’anxiété, 19e congrès de la SIRV, 17-18 mai 2019, Paris.
- Viaud-Delmon I., La réalité virtuelle en santé : du sens au son, Corporate Innovation Award, Deauville, 22 septembre 2016.

Viaud-Delmon I., Audition et équilibre: l'intégration multisensorielle pour la réhabilitation du système vestibulaire, 18èmes assises ORL, Nice, 28 - 30 janvier 2016.

Viaud-Delmon I., ICT-led technologies to avoid exclusion due to mental and brain illnesses, E-health and the brain - ICT for Neuropsychiatric Health, Brussels, 5 novembre 2013.

Viaud-Delmon I., Anxiété et espace : un équilibre fragile, 15èmes assises ORL, Nice, 31 janvier – 2 février 2013.

Viaud-Delmon I., Le son et l'espace pour la réhabilitation des troubles perceptifs et des troubles psychopathologiques, Deuxièmes Journées Perception Sonore, Marseille, 10-11 décembre 2012.

■ Communications avec actes dans un congrès international

[Ley-Flores et al., 2021] Ley-Flores, J., Turmo Vidal, L., Berthouze, N., Singh, A., Bevilacqua, F., and Tajadura-Jiménez, A. (2021). Soniband: Understanding the effects of metaphorical movement sonifications on body perception and physical activity. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 1–16.

[Ley-Flores et al., 2019] Ley-Flores, J., Bevilacqua, F., Bianchi-Berthouze, N., and Tajadura-Jiménez, A. (2019). Altering body perception and emotion in physically inactive people through movement sonification. In 2019 8th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), pages 1–7.

[Taffou et al., 2015] Taffou M, Ondrej J, O'Sullivan C, Warusfel O, Dubal S, Viaud-Delmon I. (2015). Auditory-visual virtual environment for the treatment of fear of crowds. In Proceedings of VRIC 2015 Virtual Reality International Conference - Laval Virtual, Laval, France — April 8 - 12, 2015, ACM Digital Library.

[Tajadura-Jiménez et al., 2018] Tajadura-Jiménez, A., Cuadrado, F., Rick, P., Bianchi-Berthouze, N., Singh, A., Våljam Æ, A., and Bevilacqua, F. (2018). Designing a gesture-sound wearable system to motivate physical activity by altering body perception. In Proceedings of the 5th International Conference on Movement and Computing, pages 1–6.

[Tajadura-Jiménez et al., 2014] Tajadura-Jiménez, A., Liu, B., Bianchi-Berthouze, N., and Bevilacqua, F. (2014). Using sound in multi-touch interfaces to change materiality and touch behavior. In Proceedings of the Nordic conference on human-computer interaction (NordiCHI'14).

[Bevilacqua et al., 2018] Bevilacqua, F., Peyre, I., Segalen, M., Marchand-Pauvert, V., Pradat-Diehl, P., and Roby-Brami, A. (2018). Exploring different movement sonification strategies for rehabilitation in clinical settings. In Proceedings of the 5th International Conference on Movement and Computing, MOCO '18, pages 42:1–42:6, New York, NY, USA. ACM.

[Roby-Brami et al., 2014] Roby-Brami, A., Van Zandt-Escobar, A., Jarrasé, N., Robertson, J., Schnell, N., Boyer, E., Rasamimanana, N., Hanneton, S., and Bevilacqua, F. (2014). Toward the use of augmented auditory feedback for the rehabilitation of arm movements in stroke patients. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, (57):e4–e5.

[Peyre et al., 2018] Peyre, Roby-Brami, A., Segalen, M., Lackmy-Vallee, A., Marchand-Pauvert, V., Pradat-Diehl, P., and Bevilacqua, F. (2018). Upper limb rehabilitation with movement-sound coupling after brain lesions. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61:e488. 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine. Paris. 8-12 July 2018.

[Voillot et al., 2019] Voillot, M., Bevilacqua, F., Chevrier, J., and Eliot, C. (2019). Exploring embodied learning for early childhood education. In Proceedings of the 18th ACM International Conference on Interaction Design and Children, pages 747–750.

[Viaud-Delmon et al., 2008] Viaud-Delmon I, Znaïdi F, Bonneel N, Doukhan D, Suied C, Warusfel O, N'Guyen KV, & Drettakis G. (2008) Auditory-visual virtual environments to treat dog phobia. In Proceedings of the 7th International Conference on Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech., Maia, Portugal, pp. 119-124. http://www.icdvrat.reading.ac.uk/2008/papers/ICDV RAT2008_S03_N04_Viaud-Delmon_et_al.pdf

■ Communications sans actes dans un congrès international ou national

■ Ouvrages scientifiques ou chapitres d'ouvrages

[Glowinski et al., 2021] Glowinski, D., Levacher, C., Buchheit, F., Malagoli, C., Matuszewski, B., Schaer-laeken, S., Noera, C., Edwards, K., Chiorri, C., Bevilacqua, F., and Grandjean, D. (2021). Emotional, cognitive, and motor development in youth orchestras. In *Together in Music: Coordination, expression, participation*, page 250. Oxford University Press.

[Tajadura-Jiménez et al., 2017] Tajadura-Jiménez, A., Våljam Æ, A., Bevilacqua, F., and Bianchi-Berthouze, N. (2017). Principles for Designing Body-Centered Auditory Feedback, chapter 18, pages 371–403. Wiley-Blackwell.

[Voillot et al., 2020] Voillot, M., Bevilacqua, F., and Chevrier, J. (2020). Le corps au cœur de l'apprentissage grâce au numérique: Proposition d'un nouveau paradigme pour l'éducation à la petite enfance. In Tessier, L. and (coord.), A. S.-M., editors, *Les dossiers de l'écran : Controverses, paniques morales et usages éducatifs des écrans*. Editions du Croquant.

[Viaud-Delmon, 2011] Viaud-Delmon I. (2011) Les effets de soin du virtuel, revue interdisciplinaire en ligne Sciences-croisées, numéro 7-8 "Soin de l'âme".

■ Rapports techniques

Rapport final du projet EmoDemos,
https://demos.philharmoniedeparis.fr/media/DOCUMENTS/EVALUATIONS/DOCT_2019_EmoDemos_Rapport_Final.pdf

■ Thèses, mémoires et travaux universitaires

[Rodriguez-de la Nava 2020], Lydia Rodriguez-de la Nava, Système d'auto-rééducation guidé par le son et la musique, rapport de stage Master 2 ATIAM, (encadrant.e.s Frederic Bevilacqua, Iseline Peyre, Benjamin Matuszewski)

[Elisabeth 2022], Franck Elisabeth, Thèse de Sciences Cognitives, « Mesure et contre-mesure de la surdité attentionnelle », Sorbonne Université, bourse de thèse DGA, 2019-2022, (direction Isabelle Viaud-Delmon, Guillaume Andéol et Clara Suied)

[Martin 2022], Vincent Martin, Thèse de Sciences Cognitives, « Auditory distance perception of static sources in audio-only augmented reality: an investigation of acoustic and non-acoustic cues », Sorbonne Université, bourse de thèse ENS, 2018-2022, direction Olivier Warusfel et Isabelle Viaud-Delmon.

[Hobeika 2017] Lise Hobeika, Thèse de Sciences Cognitives, « Interplay between multisensory integration and social interaction in auditory space: towards an integrative neuroscience approach of proxemics », Université Paris Descartes, bourse de thèse ENS, 2014-2017, direction Isabelle Viaud-Delmon.

[Isnard 2016] Vincent Isnard, Thèse de Sciences Cognitives, « L'efficacité du système auditif humain pour le traitement de sons naturels », Sorbonne Université, bourse DGA, 2013-2016, direction Isabelle Viaud-Delmon et Clara Suied.

[Taffou 2014] Marine Taffou, Thèse de Neurosciences, « Inducing feelings of fear in virtual reality : The influence of multisensory stimulation on negative emotional experience », Sorbonne Université, financement projet Européen VERVE, 2011-2014, direction Isabelle Viaud-Delmon.

[Amigo 2018] Victor Amigo, Master 2 ATIAM (Acoustique, Traitement du signal et Informatique appliqués à la Musique), "Tinnitus characterization methods for virtual reality therapy", Université Pierre et Marie Curie, 2018, direction Olivier Warusfel et Isabelle Viaud-Delmon.

■ Organisation de colloque

■ Diffusion des connaissances

Viaud-Delmon I. (2022) Conférence "Les serpents, la peur et le virtuel", Musée Crozatier, avril 2022, Le Puy en Velay

Viaud-Delmon I. (2014) Les environnements sonores à la rescousse de la cognition, *Acoustique et Techniques*, 73: 13-17.

Viaud-Delmon I., Gaggioli A., Ferscha A. & Dunne S. (2012) Human computer confluence applied in healthcare and rehabilitation, *CyberTherapy & Rehabilitation Magazine*, 5(2):13-16.

Viaud-Delmon I. (2012) Le sens d'être soi, *L'essentiel Cerveau & Psycho*, 12.

Viaud-Delmon I. (2012) Les vertiges de l'anxieux, *L'essentiel Cerveau & Psycho*, 10.

Viaud-Delmon I. (2010) Entendre dans un monde virtuel, *L'essentiel Cerveau & Psycho*, 4.

Chouchan D. & Viaud-Delmon I. (2009) Phobies à l'épreuve du virtuel, *La Recherche*, 427:75.

Viaud-Delmon I. (2008) Entendre dans un monde virtuel, *Pour la science*, 373:108-114.

Viaud-Delmon I. (2008) L'application de la réalité virtuelle aux pathologies psychiatriques, *NeuroPsy News*, 7(4):148-151.

■ Comités et expertises

Viaud-Delmon I. (2020), membre du comité de l'ERANET NEURON Sensory disorders

Viaud-Delmon I. (2020), expertise de projets pour la fondation Velux Stiftung (ophthalmology, healthy ageing and daylight research)

Viaud-Delmon I (2018-2021) membre du groupe de travail de l'ANSES sur les risques sanitaires liés à la réalité virtuelle et augmentée

■ Articles de presse et radio

Viaud-Delmon I, contribution au site web grand public traiter-acouphenes.fr, « La réalité virtuelle peut-elle soigner les acouphènes ? », juin 2019.

Viaud-Delmon I, contribution au documentaire sur la réalité virtuelle et le traitement des phobies, CNRS Images, 2016.