



Mémoire de Master 2

**L'accessibilité des jeux vidéo de tir pour les
personnes malvoyantes grâce à la sonification**

Organisme impliqué : CNAM

Directrice externe : Tifanie Bouchara

Directeur interne : Jean Rouchouse

Responsable universitaire : Corsin Vogel

Rapporteur : Alan Blum

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement Tifanie Bouchara, Maître de Conférence en Informatique au CNAM, pour son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Jean Rouchouse, professeur à l'ENS Louis Lumière et Corsin Vogel, responsable universitaire, pour leur suivi et leurs précieux retours.

Je souhaite remercier Clothilde Schultz pour ses conseils avisés et sa bienveillance.

Je remercie Axelle Badet pour son soutien infaillible pendant cette année.

Je remercie aussi Romane Mialon pour les sessions de travail studieuses.

Je souhaite remercier mes amis Paul, Jacky et Arthur pour leur aide mathématique et leur humour.

Je remercie également chaque personne venue participer au test de ma partie pratique.

Je remercie Marie Boulanger pour sa relecture.

Je tiens à remercier particulièrement ma sœur Mélissa Artis pour sa relecture et son investissement sur la gestion des données de ma partie pratique, sans laquelle je n'aurais pas pu analyser ces données aussi facilement.

Enfin, je remercie mes parents de croire en moi, ainsi que pour l'hébergement cinq étoiles lors de la dernière ligne droite de rédaction de ce mémoire.

Résumé

Dans un contexte de développement sans précédent pour l'industrie vidéoludique, ce mémoire traite de l'accessibilité des jeux vidéo de tir pour les personnes déficientes visuelles. Comment les rendre plus accessibles ? Plus précisément, comment indiquer au joueur aveugle où est la cible ?

Pour répondre à cette question nous nous sommes appuyés sur l'étude de la sonification interactive de la visée. Cette étude nous a permis de proposer une méthode pour évaluer et comparer des stratégies de sonification sur 2 dimensions. Deux méthodes de sonification ont été développées grâce au logiciel Max/Msp puis comparées : la première est basée sur l'augmentation de la fréquence du son et la seconde est basée sur le tempo des sons.

32 sujets ont participé aux tests. Ils devaient, équipés de lunettes opaques et d'un casque audio, trouver une cible dans un rectangle. Les résultats montrent que ces deux méthodes de guidage sonore sont efficaces pour atteindre une cible sans la voir, avec de meilleurs résultats pour la méthode basée sur la fréquence. Les principes de sonification proposés pourraient notamment être appliqués dans les jeux vidéo de tir de type sniper pour les rendre accessibles aux personnes déficientes visuelles.

Mots-clés : sonification, sonification interactive, personnes déficientes visuelles, accessibilité, jeu vidéo, First Person Shooter (FPS), cible, perception sonore

Abstract

This master thesis addresses video game accessibility for the visually impaired. It focuses on shooting games. How can we make these games more accessible ? More precisely, how can we convey the position of the target to blind players ?

To answer these questions we have studied interactive sonification for guidance tasks. This study allowed us to develop a method to evaluate and compare sonification strategies for two-dimensional guidance tasks in a game context. Two sonification strategies have been developed within the Max/Msp programming environment. One is based on the rise of the pitch and the other one is based on the rate of the sounds.

32 subjects passed the test. While being blindfolded they had to find a target in a rectangle, only relying on the sound they had in their headphones. Results show that the two guidance methods are effective to find a target without seeing it, with better results for the strategies based on pitch. Such sonification strategies could be integrated in shooting games like sniper games to make them accessible to blind gamers.

Keywords : sonification, interactive sonification, people with visual impairments, accessibility, video game, First Person Shooter (FPS), target, auditory perception.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Table des matières	5
INTRODUCTION	7
PARTIE I : L'accessibilité des jeux vidéo de tirs pour les personnes déficientes visuelles	9
1) Accessibilité et Inclusion	9
2) Culture et pratique vidéo ludique de la population malvoyante	10
3) L'accessibilité dans les jeux vidéos grand public	11
4) L'accessibilité par le son	13
5) Accessibiliser un FPS	16
a) Présentation des FPS	16
b) Naviguer dans un espace 3D	17
c) Problématique du son et du rythme dans les FPS	18
d) Tentatives de jeu audio FPS	19
e) Problématique de la visée	21
PARTIE II : État de l'art de la sonification de la visée	23
1) La sonification interactive	23
a) Sonification et interface sonore	23
b) Les capacités perceptives du système auditif humain	25
2) Les sons d'alertes	28
3) Guidage sonore sur une dimension	31
a) Etude d'un cas pratique : Sonification pour le tir sportif paralympique	31
b) Travaux de Parseihian	34
4) Guidage sonore sur deux et trois dimensions	40
5) Spatialiser lors de la visée ?	45
PARTIE III : Sonifications interactives pour un jeu de tir adapté aux personnes déficientes visuelles	47
1) Concept du test et paramétrage	47
2) Sonifications envisagées	50
3) Sonification développées	52
a) Fréquence	52
b) Radar	57
4) Feedbacks et gamification	58
5) Protocole de test	60
PARTIE IV : Résultats	63
PARTIE V : Discussion	66

CONCLUSION	67
Bibliographie	69
Annexes	75

INTRODUCTION

« *Quand je bats un joueur valide à Fifa malgré mon handicap, ça vaut 10 ans de thérapie !* » Hichem, joueur handicapé

Comme le soulignent Gonçalves et al. [2020], les jeux vidéo rassemblent les personnes dans des interactions immersives et challengeantes. Selon un rapport de NPD¹ de 2008, dans un pays comme les Etats-Unis, 63% de la population joue à des jeux vidéo et 51% de ces joueurs le font de manière hebdomadaire. En termes de chiffres d'affaires, l'industrie du jeu vidéo dépasse même désormais celle du film. Malgré la popularisation évidente des jeux vidéos, peu se trouvent être accessibles aux déficients visuels (nous utiliserons l'abréviation "DV" pour "déficients visuels" dans le suite de ce mémoire). Pourtant d'après les estimations de l'OMS, 253 millions de personnes dans le monde entrent dans l'une des catégories qui définit la malvoyance. En France, près de 1,7 million de personnes sont atteintes d'un trouble de la vision. On y compte 207 000 aveugles et malvoyants profonds et 932 000 malvoyants moyens (Source : Fédération des Aveugles de France / Enquête Handicaps - Incapacités - Dépendance (HID) de 2005).

Pour participer à l'inclusion des personnes handicapées, il est nécessaire de tendre vers une société où leur expérience de vie est la plus proche de celle d'une personne valide. De plus, l'aspect communautaire des jeux vidéo permet de lutter contre l'exclusion et l'isolement des personnes en situation de handicap.

Dans cette offre vidéoludique en constante évolution, les FPS, pour "First Person Shooter" (Tir à la première personne) sont parmi les jeux vidéo les plus populaires. C'est un genre de jeu vidéo où le joueur se met à la place du protagoniste qu'il incarne en observant l'action à travers ses yeux. Le but du jeu est de se défendre en tirant sur des ennemis qui vous attaquent. Ces ennemis peuvent être contrôlés par "l'ordinateur" ou bien par d'autres joueurs dans les modes multijoueurs.

¹ Entreprise spécialisée dans les études de marchés.

Pour tendre vers plus d'inclusion, comment rendre alors accessible les FPS aux personnes aveugles et malvoyantes ? Plus précisément, comment indiquer au joueur aveugle où se trouve la cible ?

Ce travail propose une nouvelle mécanique sonore de visée pour remplacer la vision. Il s'appuiera sur le domaine de la sonification. La sonification est l'utilisation d'audio non-verbal pour transmettre de l'information.

Après nous être intéressés à l'accessibilité dans la sphère vidéoludique, nous verrons les solutions que peut apporter la sonification interactive dans la problématique de la visée dans un FPS. L'étude de la sonification de la visée nous servira d'appui pour développer une expérience sonore qui permettra de déterminer des recommandations nécessaires à la création d'un jeu de tir accessible aux malvoyants. Les deux dernières parties seront consacrées à la présentation des résultats de notre prototype et à la discussion de notre méthode de sonification et d'évaluation.

PARTIE I : L'accessibilité des jeux vidéo de tirs pour les personnes déficientes visuelles

1) Accessibilité et Inclusion

Une société inclusive est une société dans laquelle les personnes handicapées seraient considérées au même titre que les personnes valides. D'après un rapport interministériel datant de 2006, l'accessibilité se définit comme ce qui "permet l'autonomie et la participation des personnes ayant un handicap, en réduisant, voire supprimant, les discordances entre les capacités, les besoins et les souhaits d'une part, et les différentes composantes physiques, organisationnelles et culturelles de leur environnement d'autre part". L'accessibilité cherche donc à réduire les impacts du handicap qui se caractérise par des déficiences et des limitations d'activité. Le handicap se caractérise par des incapacités qui peuvent être d'ordre physique, intellectuel ou sensoriel. Celles-ci peuvent être permanentes ou temporaires. Dans ce travail, nous nous concentrons sur le handicap visuel. Parmi les solutions d'accessibilité présentées, il faudra alors distinguer celles qui visent les aveugles (aucune perception de la lumière) et celles qui visent les malvoyants (vision résiduelle). Le présent travail cherchera à aboutir à une solution accessible et inclusive, c'est-à-dire qui prend en compte les normo-voyants, les malvoyants et les aveugles.

L'accessibilité est au cœur des considérations scientifiques. En témoigne la *Conférence internationale sur l'accès universel dans l'interaction homme-machine* et la *Conférence internationale sur les ordinateurs pour les handicapé.e.s.* L'accessibilité est devenu en soi un champ de recherches et de pratiques. Des technologies comme le chat vidéo, la reconnaissance vocale, la reconnaissance de personnes ou encore la synthèse vocale trouvent leur origine dans la résolution de problématiques d'accessibilité.

Depuis la loi du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées, l'accès aux loisirs et à la

culture est reconnu comme faisant partie des besoins essentiels à l'existence pour les personnes en situation de handicap.

On trouve par exemple de nombreux jeux de société adaptés aux problèmes de déficiences visuelles : Scrabble géant, Dominos à points tactiles, cartes grande taille et grand index, etc. Les signes y sont plus visibles, la taille des éléments est plus importante, les polices de caractères sont plus contrastées, ce qui permet d'y jouer malgré des problèmes de vue. Comme le célèbre Monopoly, certains jeux bénéficient aussi d'une adaptation avec une version dotée de caractères en Braille². On trouve déjà dans ces jeux de sociétés quelques paramètres qu'il est important de prendre en compte pour améliorer l'accessibilité d'un jeu vidéo aux malvoyants comme l'option d'agrandissement des textes ou encore l'accentuation des contrastes. Mais au-delà des jeux de société, nous pouvons nous demander si les personnes présentant une déficience visuelle sont attirées par les jeux vidéo. En effet, ceux-ci, étant intrinsèquement basés sur la perception visuelle, semblent exclure d'office les DV.

2) Culture et pratique vidéo ludique de la population malvoyante

La littérature sociologique sur les pratiques ludiques des DV est très rare. Une enquête qualitative du labo EXPERICE (Université Paris 13) auprès de personnes DV permet néanmoins de dégager certains points. Tout d'abord, la culture vidéoludique de la population malvoyante et aveugle est la même que celle de la population voyante. Les aveugles de naissance ont plus tendance à jouer aux jeux vidéo que les personnes devenues non voyantes ou dont l'acuité visuelle a fortement baissé au cours de leur vie. Ceux-ci indiquent avoir des "restes visuels" qui les empêchent notamment de se concentrer seulement sur le son. Ils sont nombreux à témoigner avoir arrêté leur pratique vidéoludique après avoir perdu la vue. Dans les jeux cités par les participants on trouve une surreprésentation des jeux de combats (*Street Fighter*, *Mortal Kombat*, *Injustices*) et des jeux de plateforme (*Mario*, *Sonic*, *Crash Bandicoot*). Un engouement pour les RPG, les *Role Playing*

² Le Braille est un système universel d'écriture et de lecture en points saillants, inventé par Louis Braille en 1825, utilisé par plus de 6 millions de personnes aveugles partout dans le monde.

Games (Jeux de rôle), est aussi mis en évidence par l'enquête de Andrade et al. [2019] auprès de *gamers DV*.

Nous pouvons voir un attrait des DV pour les jeux vidéo à travers de nombreux facteurs. Des associations et des collectifs spécialisés dans l'accessibilité des jeux digitaux émergent. En France, on peut ainsi citer *CapGame*, *GameLover*, *Accesssijoux* et *Jeuxaccess*. À l'international, les sites web *Can I Play That ?* et *Game Accessibility Nexus* passent en revue les jeux du marché pour déterminer leur niveau d'accessibilité selon les différents handicaps. Les joueurs DV, comme Brandon Cole³ (surnommé Superblindman) ou TrueBlindGaming⁴, se rendent visibles sur les plateformes de diffusion vidéo (Youtube, Twitch) et le terme *GWS* pour *Gamer Without Sight* (Joueur sans vision), ou des dénominations similaires, commencent à émerger. Des associations comme *Capgame* travaillent même avec les instances françaises de l'eSport en espérant voir naître des compétitions mêlant des joueurs valides et en situation de handicap dans le partage de cette passion commune.

Dans son guide d'accessibilité à destination des développeurs, Christy Smith, *gameuse* rédigeant pour le site *Can I Play That ?*, résume en commençant ainsi : "Sachez que les personnes aveugles et malvoyantes veulent jouer à votre jeu".

Face à cet engouement apparent de la population malvoyante pour les jeux vidéos, où en est l'accessibilité dans ce secteur ?

3) L'accessibilité dans les jeux vidéos grand public

Comme le pointe Andrade et al. [2019], dans le domaine de l'accessibilité technologique pour les DV, beaucoup de recherches ont été faites pour la conception d'outils de navigation web et d'assistance à l'orientation et à la mobilité. Au contraire, les recherches concernant l'accessibilité des activités de loisirs sont plus rares et bien plus récentes. L'accessibilité de l'art, de la pratique musicale

³ <https://www.youtube.com/watch?v=Js9DXIA--84>

⁴ Chaîne Youtube de TrueBlindGaming : <https://www.youtube.com/user/MegaTgarrett>

[Coleman, 2016], des applis de rencontres [Kapperman, 2017], du sport et des jeux vidéo sont des problématiques en plein essor.

Selon le *Game Accessibility Special Interest Group*⁵, l'accessibilité d'un jeu se définit par la capacité d'y jouer même sous des conditions limitantes. Yuan et al. [2011] liste ainsi les problèmes, liés à la nature interactive du jeu vidéo, qui peuvent être rencontrés par un joueur présentant une déficience :

- Ne pas être capable de recevoir un retour, qu'il soit visuel, auditif ou tactile. Cela sera le cas pour les joueurs DV.
- Ne pas être en mesure de déterminer la réponse adéquate à effectuer face à un stimuli du jeu. Cela s'applique principalement aux déficiences cognitives.
- Ne pas être capable d'interagir avec le jeu à travers les dispositifs de commande (manette par exemple). C'est un problème rencontré par les personnes présentant des déficiences de mobilité.

Les barrières qui se dressent face aux joueurs DV sont multiples. Des joueurs malvoyants témoignent, l'un en citant le jeu de course *Burnout* sur le site *Can I Play That ?*, que naviguer dans un menu mal conçu peut parfois être plus difficile que de jouer au jeu lui-même.

D'après les participants de l'étude du labo EXPERICE, l'inaccessibilité des jeux vidéo est croissante. Cela est dû au fait que les *gameplay* (intrigues et façons dont on joue au jeu) deviennent de plus en plus complexes, avec davantage de détails. L'évolution des technologies a aussi sa part de responsabilité. En effet, les écrans plats modernes présentent des images avec moins de contraste et de couleurs que les télévisions à tube cathodiques. Ces dernières facilitaient ainsi le décodage de l'écran pour les malvoyants ayant une vision résiduelle. Néanmoins, des divisions spécialisées en accessibilité sont créées chez les développeurs. Des postes d'expert en accessibilité voient le jour, comme Brannon Zahand, *Senior Gaming Accessibility Program Manager* pour Microsoft.

⁵ Fondé en 2003, groupe bénévole de développeurs qui œuvre pour plus d'accessibilité dans la sphère vidéoludique.

A l'heure actuelle, l'offre du marché grand public reste pour autant toujours peu adaptée aux DV, surtout à ceux ayant une cécité totale. S'ils y jouent, ils doivent mettre en place des stratégies pour pallier le manque d'adaptations des nombreuses mécaniques de jeu. Leur expérience de jeu s'en trouve restreinte.

Par ailleurs, la qualité du sound design est un des critères majeurs de l'accessibilité des jeux grand public. Comme énoncé précédemment, les genres de jeux les plus joués sont les jeux de plateformes et les jeux de combat. Pourtant, si *Street Fighter V* (Capcom, 2020) est potentiellement accessible pour un joueur DV, *Tekken 7* (Namco, 2017), lui aussi un jeu de combat, est tout simplement injouable en raison de sa bande son.

Le son est donc un élément crucial dans la création d'un FPS accessible aux DV. Il sera donc intéressant d'étudier les jeux et dispositifs basés sur l'audio.

4) L'accessibilité par le son

S'il existe des jeux rendus accessibles en partie grâce à un retour haptique⁶ tel que *Blind Hero* [Yuan, 2008] (adaptation du célèbre jeu musical *Guitar Hero*), les jeux digitaux accessibles aux DV peuvent l'être pour deux raisons : ils disposent de fonctionnalités d'accessibilité comme une audiodescription poussée, ou bien il s'agit de jeux audio.

- L'audiodescription :

L'audiodescription a été définie par Orero [2005] comme "la technique descriptive d'ajout d'explications et de descriptions audio concernant l'environnement, les personnages et l'action prenant place dans les différents médias audiovisuels, lorsque ces informations sur ses éléments visuels ne sont pas déjà offert par la bande son original". L'audiodescription peut intervenir sous la forme de la voix d'un narrateur (enregistrée) ou bien sous forme de synthèse vocale.

⁶ Qui exploite le sens du toucher.

Mangiron et Zhang [2016] plaident pour un usage plus large de l'audiodescription dans les jeux vidéo. Ils proposent ainsi de l'utiliser pour décrire les cinématiques (scènes non-interactives qui font avancer le scénario du jeu), pour la lecture des menus ainsi que pour communiquer les informations présentes sur le *heads-up display* (HUD). Le HUD, que l'on pourrait traduire par "affichage d'informations", regroupe les informations présentes en superposition sur l'écran du jeu. Par exemple, on peut y trouver la barre de vie, le score, la carte ou encore le degré de danger. Le jeu vidéo *Sea of Thieves* (2018) offre par exemple la fonctionnalité *text-to-speech* : les messages reçus dans le jeu sont lus par une synthèse vocale. On peut aussi noter l'utilisation par la plupart des joueurs DV du lecteur d'écran NVDA pour Windows, qui permet notamment la lecture des menus [Andrade, 2019]. Ils sont ainsi plus enclins à jouer sur ordinateur que sur consoles.

- Le jeu audio :

Le jeu audio est une forme de jeu digital défini par Friberg et al. [2004] comme comprenant "des interfaces sonores complètes afin qu'ils puissent être joués sans l'utilisation de graphismes". Ils utilisent différents indices sonores :

- de la parole.
- des icônes sonores (traduction du terme *auditory icons*, très utilisé dans la littérature spécialisée, faisant référence aux icônes visuelles en informatique) : ce sont les sons environnementaux, par exemple le son de la pluie qui tombe dans le jeu.
- des *earcons* : ce sont des sons artificiels, des bips, des tonalités musicales ou des motifs sonores.

Originellement à destination du public malvoyant, des jeux comme *Musicraft* développé par Kirke [2018] ou le succès de *Papa Sangre*⁷ (2010) ont cependant montré qu'il était possible de concevoir un jeu audio stimulant à la fois pour les DV et pour les normo-voyants.

⁷ Développé par *Somethin' Else*, il s'agit d'un jeu audio orienté horreur.

Le jeu *Touch Me* d'Atari, sorti en 1974, est souvent présenté comme le premier jeu audio. Sous forme de jeu d'arcade, il s'agit d'un jeu de mémoire dont le but est de répéter une séquence de tonalités qui se complexifie au fur et à mesure. La séquence est jouée puis le joueur doit la reproduire en appuyant sur les 4 boutons de la borne. Comme les 4 boutons sont affectés à 4 tonalités différentes, un joueur aveugle peut tout à fait y jouer.

Le jeu audio se joue aujourd'hui majoritairement sur ordinateur ou sur mobile. Une liste de jeux audio peut être trouvée sur la plateforme audiogames.net. On en trouve de toutes sortes : des jeux narratifs (*A Blind Legend*, 2015), des jeux d'actions (*Audio Space Invaders*, 2000), des jeux de plateformes (*Speed Sonic Across The Span*, 2007) et des jeux musicaux (*AudiOdyssey*, 2007). Certains ont même reçu des prix, comme *BlindSide* (2012), qui a gagné le prix de l'innovation au festival de jeu *Games For Change 2013*. Il est intéressant de noter que la plupart des jeux audio sont développés par des petits studios indépendants ou bien conçus lors de recherches académiques sur l'accessibilité.

Beaucoup de jeux audio utilisent du son binaural⁸ comme *The Blind Eye* (2000) et *Terra formers* (2004). L'utilisation de restitution ambisonique⁹, comme dans *Audio Space Invaders* (2000), est plus rare.

Au-delà de leur volonté de divertir, ces jeux accessibles servent aussi d'entraînement (*serious game*¹⁰) pour permettre l'apprentissage ou l'accessibilité d'autres technologies ou bien d'*exergames* (jeux d'entraînement physique ou cérébral).

Le son est donc un moyen de rendre accessibles les jeux digitaux aux DV. Quel rôle peut-il jouer dans l'accessibilisation d'un FPS aux DV ?

⁸ Assimilé à de "l'Audio 3D", le binaural est une méthode cherchant à reproduire la perception sonore humaine par restitution au casque.

⁹ Technique de capture, de synthèse et de reproduction d'environnement sonore utilisant trois à quelques dizaines de haut-parleurs.

¹⁰ Jeu qui combine une intention « sérieuse », pédagogique ou informative par exemple, avec des ressorts ludiques.

5) Accessibiliser un FPS

a) Présentation des FPS

C'est dans les années 70 que le *First-Person Shooter* fait son apparition avec le jeu *Maze War* (1973), où deux joueurs peuvent se promener en vue subjective dans un labyrinthe. La partie se termine lorsque l'un des deux joueurs trouve et touche l'autre. Le jeu est très limité en graphisme et en déplacement puisqu'il ne propose qu'un seul plan de vision et un déplacement par incrément de 90 degrés. Néanmoins, il est considéré comme le premier FPS et est le premier jeu qui présente une mini-carte (*mini-map*) pour se repérer. *Wolfenstein 3D* (id Software), sorti en 1992, est considéré par les spécialistes comme ayant établi le genre dans ses mécaniques de jeu : déplacement en trois dimensions satisfaisant, gameplay poussé et scénario travaillé. Un an plus tard, *Doom*, l'un des jeux qui a eu le plus d'influence sur l'évolution des jeux vidéo, est un des premiers à permettre au joueur de créer son propre contenu pour le jeu. Les graphismes sont perfectionnés et on peut désormais jouer contre trois autres participants.

À partir de la deuxième moitié des années 90, on assiste à une amélioration considérable des graphismes. Beaucoup deviennent de plus en plus réalistes, notamment grâce à leur sound design, comme la licence *Battlefield* (2013). Les licences *Halo* ou *Deus Ex* montrent aussi que le genre a su densifier ses scénarios. Nous pouvons aussi noter l'arrivée de l'option de son binaural comme dans *Counter-Strike : Global Offensive* développé par Valve Corporation en 2017. Cela permet notamment de distinguer un tir venant de devant et le même son de tir provenant de derrière le joueur à la même distance.

Ce type de jeu se combine aisément avec d'autres genres : science-fiction (*Star Wars Dark Forces*, 1995), horreur (*Resident Evil*, 1996), espionnage (*GoldenEye*, 1997) et bien sûr historique (*Medal Of Honor*, 1999).

Le FPS est l'un des genres de jeu vidéo ayant le plus de succès : en 2009 l'éditeur Activision annonce avoir généré plus de 3 milliards de dollars de recettes avec ses 55 millions d'exemplaires écoulés dans le monde depuis la création de sa série *Call Of Duty*.



Figure 1 : Interface graphique de Battlefield V (2019) et son HUD.

Le HUD (*heads-up display* défini précédemment) des FPS peut être très fourni. Par exemple, dans la capture d'écran du jeu *Battlefield V* ci-dessus (Figure 1), on peut voir la mini-carte pour se repérer, la barre de vie, l'arme choisie, le nombre de munitions, etc. Cela donne donc beaucoup d'informations à restituer au joueur aveugle.

De nombreuses questions se posent quant à l'adaptation de ce type de jeu si l'on supprime la vision. Comment faire comprendre qu'un ennemi est apparu ? Comment indiquer la présence d'un obstacle ou d'un abri ? Comment indiquer au joueur les points de vie qu'il vient de faire perdre à son adversaire ? Comment se repérer dans l'espace ?

b) Naviguer dans un espace 3D

De rares travaux se sont intéressés à la navigation dans les FPS. Mader et al. [2019] pensent qu'il est nécessaire de permettre aux joueurs aveugles d'accéder à une compréhension allocentrée de l'espace pour rendre un jeu d'action 3D

accessible. Il existe en effet deux types de stratégies de navigation : égocentrée et allocentrée. La stratégie égocentrée consiste à mémoriser le chemin à effectuer avec des points de repères (visuels pour les voyants, tactile ou décompte pour les non-voyants). En allocentrée, la personne est capable de visualiser l'espace à naviguer de façon à savoir comment les différents éléments sont positionnés les uns avec les autres. Cette deuxième stratégie nécessite donc d'avoir mémorisé et compris l'agencement de cet espace, ainsi que davantage de capacité d'abstraction. La stratégie allocentrée permet en échange de trouver des raccourcis plus efficaces. Cette stratégie est plus rare chez les non-voyants, surtout lorsqu'ils sont dits "aveugles de naissance". Pour rendre la navigation accessible aux aveugles dans des environnements 3D, Mader et al. proposent plusieurs solutions : produire un son lorsque le joueur se trouve face à un point cardinal, émettre un son lorsqu'il entre en contact avec un élément de décor ou avoir des lieux possédant des ambiances sonores facilement discernables. Mader et al. proposent aussi l'implémentation d'un chien guide virtuel, dans la diégèse, qui peut notamment guider le joueur vers une destination choisie ou lui apporter des objets.

Des travaux, comme ceux de Sanchez et Elias [2007], ont aussi montré que la navigation dans un espace virtuel aide les personnes aveugles à améliorer leur orientation dans le monde réel.

c) Problématique du son et du rythme dans les FPS

Le jeu FPS place généralement le joueur dans un environnement hostile, ce qui implique que le joueur soit attentif à tous les indices sonores disponibles [Grimshaw, 2007]. Ce type de jeu par sa vue subjective et son haut niveau d'action offre une forte immersion. De plus, la plupart des joueurs y jouent avec un casque dans le but de se couper des sons environnants pour se concentrer sur ceux du jeu. L'univers sonore y est assez chargé : tir du joueur, rechargement des armes, tirs des ennemis, cris des ennemis ou monstres, respiration et pas du protagoniste, ambiances sonores et bande son musicale viennent rythmer l'expérience du joueur. Il faudra le prendre en compte si l'on souhaite ajouter d'autres sons afin de guider le joueur aveugle.

Le rythme d'un FPS varie d'un jeu à l'autre avec des jeux haletants comme *Doom* (2016) ou des jeux plus calmes jouant sur la précision, comme les jeux de sniper (*Sniper : Ghost Warrior 3*, 2017). Il sera ainsi plus simple d'adapter ce deuxième type de jeu pour des personnes DV puisqu'ils demandent moins de réflexes pour y jouer convenablement.

d) Tentatives de jeu audio FPS

Ce travail ne présente pas la conception d'un jeu audio mais propose une évaluation d'une méthode de visée sonore pour une future implémentation dans un FPS grand public. Cependant il est intéressant d'étudier certains jeux audio qui tentent de se rapprocher du genre FPS.

- *Shade of Doom* (2001) :

Développé en 2001, il s'agit d'un jeu audio inspiré de *Doom*. Le joueur se déplace dans des tunnels et des salles d'un laboratoire dans le but de réparer un accident industriel, tout en se défendant face aux ennemis qu'il rencontre. La stéréophonie du son permet notamment au joueur d'entendre par exemple la résonance des pas (et donc de se repérer) : si l'écho de ses pas est à gauche, c'est qu'il y a une ouverture sur la gauche. Les équipements aux alentours produisent aussi du son pour pouvoir les repérer. Une synthèse vocale donne également des informations verbales sur le nombre de munitions ou sur l'arme sélectionnée. Il se joue uniquement avec les touches du clavier de l'ordinateur. Il ne dispose pas d'un système de visée à proprement parler : le joueur se trouve face à un monstre puis il doit appuyer sur la touche de tir pour l'éliminer. Le jeu se révèle être assez difficile à prendre en main car beaucoup de débutants perdent assez rapidement [Parker, 2008].

- *Swamp* (2011) :

Le but est de survivre à une attaque de zombies. Une assistance vocale permet de savoir vers quelle direction (est/ouest/nord/sud) le joueur est tourné. La différence de son produit par les pas du joueur permet de savoir dans quelle zone il

se déplace (marécages, sable, forêt). Cependant il ne s'agit pas d'un FPS à proprement parler puisqu'il se joue en vue du dessus. En effet, si on peut y jouer seulement avec le son, une interface graphique (Figure 2) est disponible. L'orientation et la visée se fait avec la souris en vue du dessus.

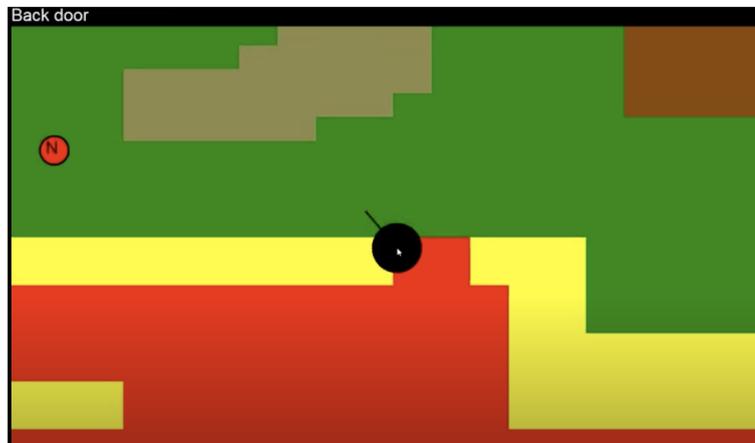


Figure 2 : Capture d'écran du jeu audio Swamp (2011)

- Blind Arena Tournament (prototype) :

Il s'agit d'un jeu audio de tir où quatre personnes peuvent s'affronter. Le jeu est basé sur un radar qui donne des informations au joueur sur son environnement proche. Lorsqu'il est déclenché, le radar balaye de gauche à droite en donnant à trois reprises (gauche/centre/droite) une information sur l'environnement du joueur (par exemple mur/mur/ennemi). Le jeu permet par ailleurs de discuter dans un chat doté de la fonctionnalité *text-to-speech* (synthèse vocale des messages reçus). Encore une fois il s'agit d'un jeu en vue du dessus et en grille. Il n'y a pas de système de visée à proprement parler comme dans un FPS grand public.



Figure 3 : Commandes et fonctionnement du radar de Blind Arena Tournament (Rising Pixel)

Malgré l'existence de ces jeux audio, peu de recherches ont été faites pour tenter d'améliorer l'accessibilité des FPS grand public aux DV.

e) Problématique de la visée

Nous nous concentrerons dans ce mémoire seulement sur la question suivante : Comment indiquer au joueur où est la cible pour qu'il puisse tirer dessus ?

Comment se passe la phase de visée pour un joueur voyant dans un FPS ? Il voit la cible, déplace son arme pour faire en sorte de faire correspondre le pointeur de l'arme avec la cible (préférentiellement la tête) puis tire. Le joueur aveugle ne pouvant voir la cible, nous l'accompagnerons par le son durant la visée. L'audiodescription est écartée des solutions car elle est plus adaptée aux mécaniques de jeu ne demandant pas de rapidité ni de précision [Mangiron, 2016]. Le joueur déplacera donc son arme en fonction de l'évolution d'un son non-verbal.

La mise en place d'une telle expérience nécessite l'étude de la sonification de la visée.



Figure 4 : Capture du jeu mobile Sniper 3D. Le trait rouge représente la position du viseur par rapport à la cible et donc l'information à sonifier.

PARTIE II : État de l'art de la sonification de la visée

1) La sonification interactive

a) Sonification et interface sonore

Quel son fait une onde cérébrale ? Comment augmenter les performances d'un pilote dans le cockpit ? C'est avec ces questions que Hermann et al. [2004] débute le *Sonification Handbook*, littérature de référence sur la sonification et "l'affichage auditif" (*auditory display* en anglais). Pour traduire ce dernier terme, on préférera la terminologie "interface sonore" .

Le terme "interface sonore" englobe tous les aspects d'un système de rendu sonore : le système de diffusion du son (haut-parleurs, casques), le type de rendu utilisé (stéréophonie, synthèse binaurale, spatialisation ambisonique, etc.) ainsi que l'ensemble des solutions techniques pour la collecte, le traitement et les calculs nécessaires à l'obtention de son en réponse à un jeu de données [Raigneau, 2018]. La sonification fait justement partie de ces solutions techniques. Le terme sonification a été introduit en 1992 lors de la fondation de l'*International Community for Auditory Display* (ICAD) par Gregory Kramer. Elle est définie par Kramer et al. [1999] comme "l'utilisation de signaux sonores non-verbaux dans le but de véhiculer de l'information. Plus précisément, elle correspond à la transformation des relations entre des données afin que ces mêmes relations deviennent perceptibles sous forme sonore, dans le but d'en faciliter la communication ou l'interprétation." Cette définition exclut donc l'utilisation de messages sonores exclusivement verbaux pour transmettre de l'information.

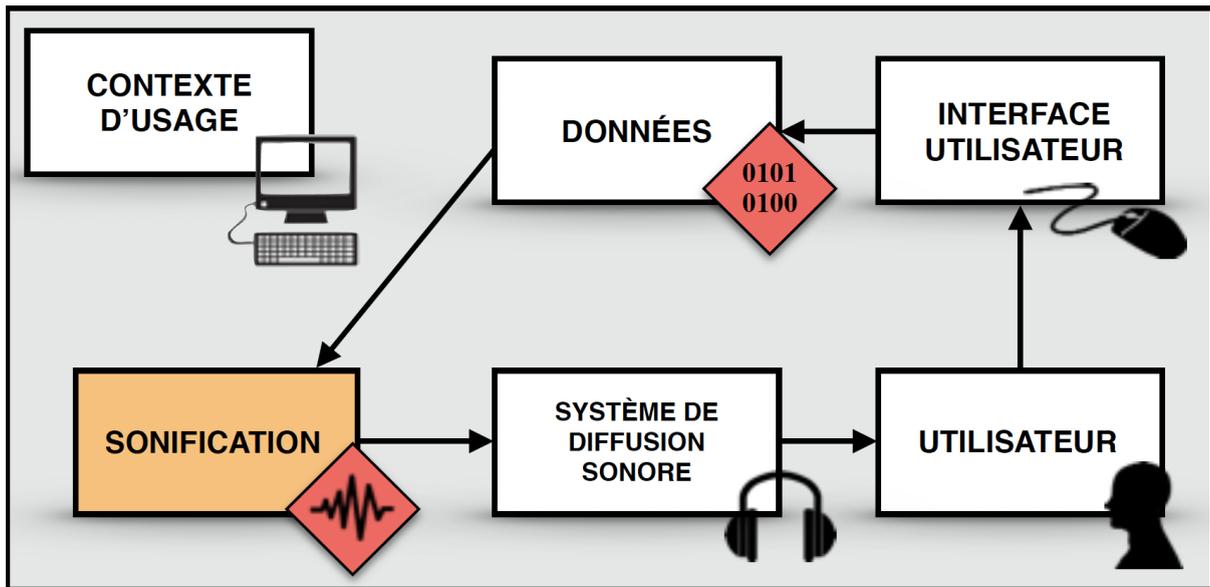


Figure 5 : Les différents composants d'une interface sonore de sonification [Raigneau, 2018].

Il existe plusieurs motivations à l'utilisation de signaux sonores, plutôt que visuels ou haptiques, pour représenter de l'information. Tout d'abord, l'utilisation de sons permet de soulager la modalité visuelle. De plus, les signaux non verbaux permettent de donner simultanément plusieurs types d'informations [Wilson, 2007]. En effet, nous sommes capables de diriger notre attention sur un flux sonore précis dans un ensemble d'autres signaux sonores. La sonification peut donc s'avérer meilleure que la visualisation dans certains domaines [Fitch, 1994]. Cependant, on peut noter que contrairement à la visualisation, les signaux sonifiés demandent parfois une phase d'apprentissage.

La sonification trouve son application principale dans les problématiques d'interfaçage homme-machine¹¹. On la retrouve ainsi dans des domaines très variés tels que les téléphones portables, les appareils électroménagers, le transport, la médecine, l'exploration spatiale ou encore l'art. Un exemple simple de sonification est le compteur Geiger, dont la fréquence des signaux augmente avec l'intensité du rayonnement ionisant alentour. La mise en musique des ondes cérébrales par Alvin

¹¹ Une interface homme-machine (IHM) désigne l'ensemble des moyens et outils mis en œuvre afin qu'un opérateur humain puisse contrôler et communiquer avec une machine-outil ou une machine logicielle.

Lucier pour l'œuvre *Music for Solo Performer* (1965) est un exemple de sonification à des fins artistiques.

Selon Grimshaw [2007], dans le contexte du jeu vidéo, la sonification sert de « pont entre l'action et la perception. Le son devient un langage à travers lequel le jeu communique avec le joueur ». Dans notre étude nous cherchons à utiliser sa capacité à indiquer un statut ou un progrès [Raigneau, 2018], en l'occurrence, dans le cadre d'un FPS, la position du pointeur du joueur par rapport à la cible. Cette position évolue dans le temps puisque le joueur manipule son arme pour trouver la cible. Il faut donc que la sonification utilisée soit interactive.

Toutes les sonifications ne demandent pas de l'interaction. Lorsque la sonification sert à alerter par exemple, elle peut fournir les informations nécessaires indépendamment des actions de l'utilisateur. La sonification interactive est définie par Hermann et Hunt comme "la discipline d'exploration de données en manipulant de manière interactive la transformation des données en son" [Hermann, 2004]. En d'autres termes, la sonification interactive concerne l'étude de l'interaction entre les humains et les ordinateurs pour transformer des données en son dans le but d'interpréter ces données [Hunt, 2011]. Dans une étude de 2005, Stockman et al. présentent par exemple une méthode de sonification interactive des feuilles de calculs (de type Excel) pour les rendre accessibles aux personnes déficientes visuelles [Stockman, 2005].

Nous placerons ainsi le joueur dans une boucle de rétroaction pour qu'il puisse ajuster, en temps réel, sa position par rapport à la cible.

b) Les capacités perceptives du système auditif humain

Une des grandes forces de la sonification est qu'elle tire profit des capacités perceptives du système auditif humain pour discerner les différents paramètres du son (voir Figure 6).

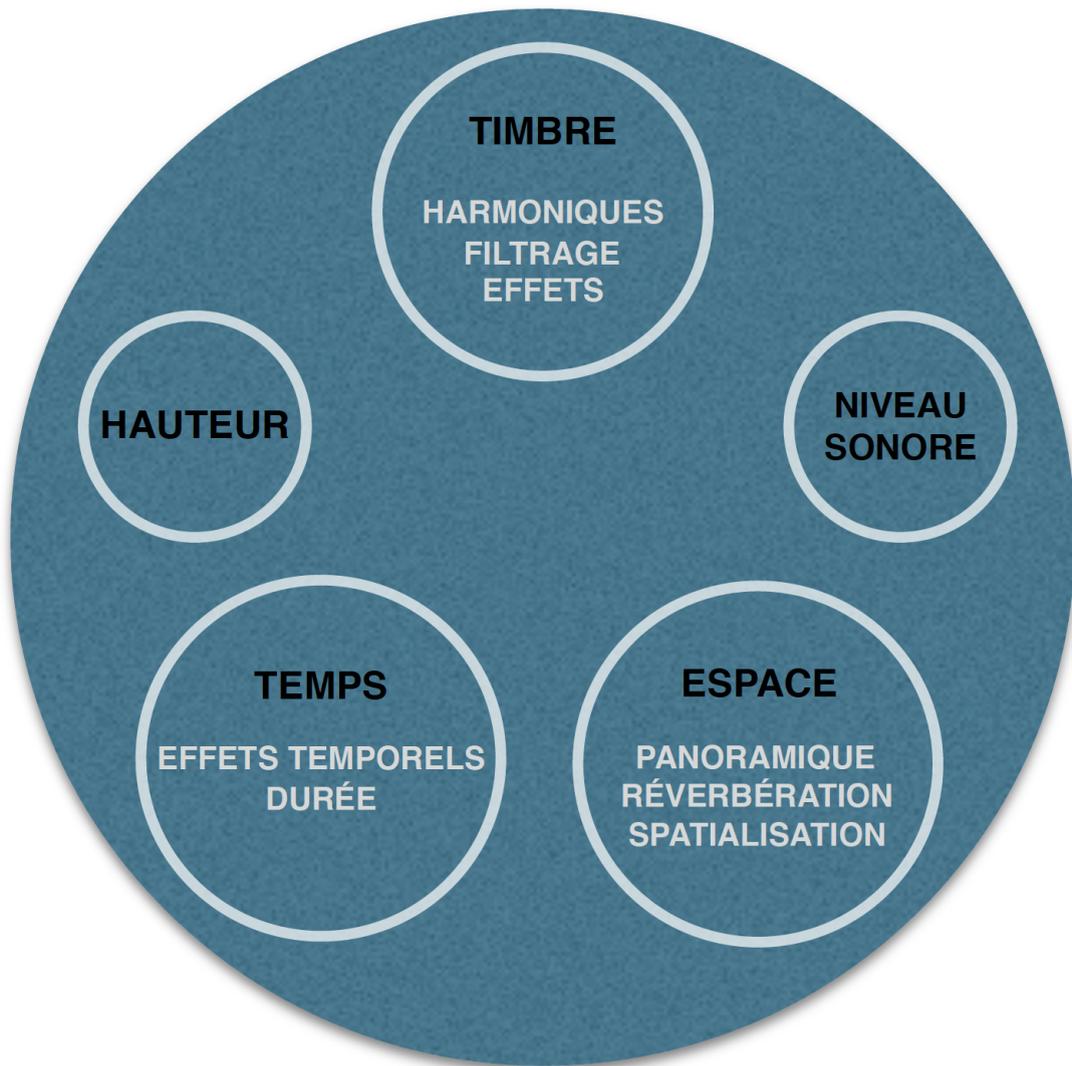


Figure 6 : Les cinq catégories de paramètres sonores selon [Dubus, 2013], in [Raigneau, 2018]

Pour mieux aborder les parties suivantes, il est nécessaire de définir ce que perçoit l'oreille et comment. Nous présenterons ici les potentiels paramètres psychoacoustiques¹² utilisables définis notamment par Ferguson et al. [2006], résumés par Ziemer [2019] et dont les propriétés sont détaillées dans *Psychoacoustics : Facts and Models* de Fastl et Zwicker [1999].

¹² La psychoacoustique est l'étude des sensations auditives de l'homme. Elle se situe à la frontière entre l'acoustique, la physiologie et la psychologie.

- Fréquence / Hauteur (*pitch*¹³)

Le son provient de la vibration d'un élément. La fréquence correspond au nombre de vibrations par seconde et détermine la hauteur du son : s'il y a peu de vibrations on entend un son grave (fréquence faible), s'il y en a davantage on entend un son aigu (fréquence élevée). On exprime la fréquence en Hertz (Hz). À noter qu'un écart de 40 Hz entre 40 Hz et 80 Hz et entre 500 et 540 Hz n'aura pas le même effet. En effet, la perception des fréquences est logarithmique. La hauteur perçue tend à être une fonction linéaire de la fréquence en dessous de 1 kHz. Nous pouvons distinguer entre 640 et 4000 hauteurs.

- Niveau sonore / Sonie (*loudness*)

Le niveau sonore est lié à l'amplitude du signal. Augmenter l'amplitude d'un signal augmente son niveau. Cependant, des fréquences différentes ayant la même amplitude ont un niveau sonore différent. On utilise alors le terme "sonie", qui désigne une grandeur psychoacoustique représentant le volume sonore tel que perçu par l'être humain. Nous pouvons distinguer 120 pas de sonie.

Des modulations d'amplitude¹⁴ en dessous de 15 Hz sont entendus comme des fluctuations du niveau sonore, que l'on appellera dans la suite "battements".

- Aspects du timbre

En musique, le terme "timbre" englobe tout ce qui permet de distinguer un instrument ou une voix. Nous présentons ici 3 aspects du timbre (il en existe d'autres).

- Brillance (*brightness*)

La brillance dépend principalement de la distribution spectrale du son, c'est-à-dire quelles fréquences il contient. Déplacer l'enveloppe spectrale d'un son vers des fréquences plus aiguës le rend plus brillant.

- Rugosité (*roughness*)

¹³ Par la suite, les termes entre parenthèses sont les termes utilisés en anglais dans la littérature spécialisée.

¹⁴ La modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude d'un signal de fréquence élevée, le signal porteur, en fonction d'un signal de plus basse fréquence, le signal modulant, en multipliant les deux signaux.

Un son rugueux peut être décrit comme dur, désagréable ou râpeux. La rugosité est facilement créée en modulant l'amplitude d'un son avec des fréquences entre 15 Hz et 200 Hz.

- Largeur timbrale (*fullness*)

La *fullness* que nous traduisons ici en "largeur timbrale" est un autre aspect du timbre. Un son large a un spectre fréquentiel ample. L'opposé est un son fin, comme un signal sinusoïdal (son pur)¹⁵. La distorsion ou la modulation fréquentielle¹⁶ permettent d'augmenter la largeur timbrale. On peut la réduire grâce à des filtres coupe-bas ou coupe-haut.

- Autres attributs psychoacoustiques
 - Harmonicité et inharmonicité (*harmonicity*)

Un son harmonique est un son dont les composantes, appelées partiels, sont harmoniques, c'est-à-dire sont à des fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale¹⁷. Selon plusieurs études, des sujets occidentaux sont sensibles à l'inharmonicité des sons et peuvent donc détecter des fréquences divergentes n'appartenant pas à une suite harmonique.

Il nous reste maintenant à déterminer quel *mapping*¹⁸ doit être mis en place, c'est-à-dire comment et quels paramètres du son vont être modifiés, en lien avec la différence de position entre la cible et le joueur.

2) Les sons d'alertes

Concevoir une méthode de sonification revient à exprimer avec le son le plus adapté une signification particulière [Grimshaw, 2007]. Notre problématique de visée revient à faire comprendre à l'auditeur où se situe le danger, nous pouvons donc nous inspirer des recherches faites dans le domaine des alarmes sonores.

¹⁵ Signal continu dont l'amplitude est une fonction sinusoïdale du temps. Un son avec une forme d'onde sinusoïdale est appelé "son pur".

¹⁶ Dans ce type de modulation, c'est la fréquence du signal porteur qui varie selon un signal modulant.

¹⁷ La fréquence fondamentale est la fréquence de l'harmonique de premier rang d'un son complexe.

¹⁸ Le *mapping* désigne la mise en correspondance de minimum deux types d'informations distinctes.

Une alarme ou un son d'alerte est un son qui évoque le danger et qui invite à une réaction urgente. On pense immédiatement aux sirènes de police et aux alarmes incendie. La plupart des alarmes sont constituées de sons non-verbaux. Pourquoi ne pas alerter par la voix ? Car le temps de réaction est plus court pour les alarmes non verbales que pour les alarmes verbales [Simpson, 1980] [Wheale, 1982]. Cela confirme l'idée qu'une assistance vocale ne serait pas adaptée au guidage fluide du joueur.

Comme pointé précédemment, l'univers sonore des FPS peut s'avérer être chargé. Patterson [1982], dans son étude des alarmes pour le domaine aérospatial, a montré qu'il faut prendre en compte l'environnement où se trouve l'alarme pour la concevoir (dans son cas un hélicoptère). Une alarme avec au moins quatre harmoniques fortes réparties dans le spectre a plus de chance de ne pas être masquée par le bruit environnant qu'une alarme concentrant son énergie sur une seule harmonique. De plus, pour être sûr qu'une alarme soit entendue, au moins quatre de ses composants spectraux doivent être 15 dB au-dessus de leur seuil d'audibilité respectif dans le bruit environnant. La limite se situe lorsque le bruit environnant atteint 85 dB [Patterson, 1982].

Dans la perception de l'urgence, l'intensité sonore est le facteur le plus important [Loveless, 1975]. Ho et Spence [2009] l'expliquent par le fait que le danger est perçu comme étant très proche de l'auditeur. Une première considération simple pour notre sonification pourra être que le son augmente en niveau lorsque le pointeur du joueur se rapproche de la cible.

Les chercheurs des années 90 ont conclu qu'il était possible de créer des sons d'alertes avec un degré d'urgence perçu prévisible. En effet Edworthy et al. [1991] ont démontré les choses suivantes :

- Plus la fréquence est élevée, plus la perception d'urgence est élevée.
- Plus le *rate* (vitesse de répétition) est élevé, plus la perception d'urgence est élevée.
- Plus les harmoniques sont irrégulières, plus la perception d'urgence est élevée.

Cela est confirmé par l'étude de Kuwano [2007], menée dans différents pays, qui montre que plus la fréquence d'un signal est élevée, plus les sujets ressentent du danger et plus le silence entre deux sons est court, plus le sentiment de danger est grand. Les systèmes d'alarme qui reprennent ces directives ont montré des résultats convaincants dans des environnements bruyants ou plus modérés sur le plan sonore. Cependant Nakatani et al. [2009] montrent qu'il y a une limite et que si la fréquence est trop élevée, le signal peut être décrit par les usagers comme inapproprié. Des signaux situés entre 640 et 2560 Hz ont été désignés comme les plus appropriés par les sujets de leur étude expérimentale. En dessous de 640 Hz les alarmes sont décrites comme n'ayant "pas d'impact" et au-dessus de 2560 Hz comme "trop bruyantes". Les signaux entre 640 Hz et 1280 Hz obtiennent les meilleurs résultats en termes de temps de réaction pour effectuer une tâche. Cela nous donne des repères pour notre futur dispositif sonore.

Dans une expérience intéressante, Robert Graham [1999] propose de calculer le temps de réaction au freinage suivant le son d'alertes utilisé. Quatre types de sons sont comparés : un son de klaxon, un crissement de pneu, un son pur à 600 Hz et une alerte verbale. Le klaxon l'emporte avec les temps de réaction les plus courts, juste devant les crissements de pneu. Cette expérience montre que :

1) Une alarme est efficace quand le son est familier et la relation entre l'alarme et sa signification est clairement identifiée.

2) L'alarme est efficace quand elle est constituée d'un son lié à une représentation mentale (les crissements de pneu ici évoquent directement un danger pour le conducteur).

Ainsi peut-on conclure en disant que la difficulté dans la conception d'un son d'alarme se trouve dans la capacité à trouver le lien le plus direct possible entre l'alarme et sa cause. Le but étant que l'utilisateur passe le moins de temps possible à décoder l'alarme. On peut aussi affirmer que la perception d'urgence est paramétrable en jouant sur les caractéristiques acoustiques des sons. Nous en prendrons compte dans la conception de notre sonification.

3) Guidage sonore sur une dimension

a) Etude d'un cas pratique : Sonification pour le tir sportif paralympique

Quoi de plus naturel pour concevoir une méthode de tir à l'aveugle que de s'inspirer des compétitions de tir paralympiques pour déficients visuels ? Après avoir présenté le tir sportif (en intérieur) et le biathlon nous étudierons la méthode de sonification présente au biathlon pour les athlètes DV.

Le tir sportif en intérieur pour personnes DV est régi par le *World Shooting Para Sport* qui organise les compétitions et le développement du tir sportif dans le monde. Les athlètes utilisent un équipement de tir classique (fusil ou pistolet) mais celui-ci est équipé d'un dispositif audio électronique de visée. Le dispositif est composé tout d'abord d'une caméra à haute vitesse et de haute qualité fixée au-dessus de l'arme. Le système détecte le point de visée portée de l'arme par rapport à la cible et transmet dans un casque d'écoute, un son qui varie suivant la position par rapport à la cible. Le point central précis de la cible fait 5 mm de diamètre. Il s'agit donc plus d'un sport de précision que de rapidité. Les participants doivent tirer sur plusieurs cibles qui déclenchent le même signal. C'est pourquoi dans ce sport, l'athlète est autorisé à être assisté par une personne appelée *loader*, qui peut l'aider à recharger son arme, et lui indiquer, sans lui parler, s'il vise dans la bonne direction. Présent sur le pas de tir, il n'a pas le droit de parler au tireur (il peut le toucher) durant la finale. Grâce à ces adaptations, peu importe l'acuité visuelle de l'athlète, il peut atteindre une précision comparable à un tireur voyant, les distances olympiques étant de 10, 25, et 50 m.

On trouve aussi des systèmes basés sur l'audio lors des jeux paralympiques d'hiver pour le tir lors de l'épreuve du biathlon.

La suite de cette partie se base principalement sur un entretien accordé dans le cadre de ce mémoire par Anthony Chalénçon, biathlète aveugle médaillé de

bronze du 15 kilomètres en biathlon aux Jeux Paralympiques d'hiver en 2018 à Pyeongchang¹⁹.

Le biathlon se compose de ski de fond et de tir à la carabine avec des cibles à 10 mètres. L'athlète est guidé par un skieur voyant lors de la phase de ski de fond mais est seul lors de la visée. Il s'agit d'une course donc l'épreuve de tir demande de la précision mais aussi de la rapidité. On s'intéressera à la méthode de sonification au biathlon car la rapidité y est plus importante et l'équipement y est plus standardisé. Les méthodes de sonification en tir intérieur et en biathlon sont en outre assez similaires.

Nous étudierons cette sonification à travers le système E-BSS de la société EcoAims (voir Figure 7). La société EcoAims fait partie des fabricants de ces équipements spécialisés. Ce système fait partie des dispositifs basés sur l'audio parmi les plus utilisés. Il est utilisé depuis 2002 à chaque Championnat du monde et à chaque édition des Jeux Paralympiques d'hiver. Contrairement au tir en intérieur, ici la carabine est optique et la balle est virtuelle. Une LED²⁰ infrarouge est placée à environ 60 mm au-dessus de la cible. Cette LED est détectée par le module caméra de la carabine. La distance entre la LED et le centre de la cible est compensée par le réglage de la carabine. Un grand câble part de la cible et est relié à un module écran sur lequel sont branchés la carabine laser et un casque audio. Le casque, vendu par cette même entreprise, isole aussi l'athlète acoustiquement des bruits environnants. Comme les autres biathlètes, il doit contrôler son rythme respiratoire et faire redescendre très vite son rythme cardiaque ici pour pouvoir se concentrer sur le son. Comment fonctionne alors la sonification de ce système pour indiquer la cible ? Anthony Chalençon explique :

“Au début le son n'est pas continu et plus tu te rapproches de la cible plus les bips se rapprochent jusqu'à devenir continu. Quand le son est continu, ça veut dire que tu es à côté de la cible, mais si tu tires, c'est pas dedans. Après il faut chercher le plus aigu possible. Et après tu as une fenêtre où là c'est la cible, et tu peux tirer.”

¹⁹ Une retranscription de l'entretien est disponible en annexe.

²⁰ Une diode électroluminescente est un dispositif opto-électronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.

Il s'agit donc d'un son monophonique²¹, au début saccadé puis continu, dont la fréquence augmente exponentiellement lorsqu'on se rapproche de la cible. Cette augmentation du tempo et de la fréquence concorde avec les conclusions énoncées dans la section précédente.



Figure 7 : Anthony Chalençon, médaillé de bronze en biathlon aux Jeux Paralympiques d'Hiver de 2018, utilise le système E-BSS d'EcoAims lors d'un entraînement (Le Dauphiné Nordique).

Sur un autre équipement proposé par EcoAims, le VIS500, la courbe d'augmentation du *pitch* est ajustable pour permettre d'atteindre différents niveaux de précision. Il n'a malheureusement pas été possible d'avoir accès à ces courbes. La précision du VIS500 est d'environ +/- 0,25 mm d'écart par rapport au centre de la cible à 10 mètres de distance.

²¹ Un son monophonique est par exemple reproduit par deux haut-parleurs diffusant le même signal. Le son est alors entendu "au centre" dans le casque.

“Avec la pratique, on connaît le son.” déclare Anthony Chalençon. En effet, le facteur d’apprentissage est très important puisque dans une vidéo disponible sur YouTube, un tireur de biathlon voyant pourtant expérimenté comme Aristide Begue (champion du monde junior 15km Individuel) rate la plupart de ces tirs en essayant le système pour la première fois.

b) Travaux de Parseihian

À travers l’étude du tir sportif, nous avons présenté une première méthode pour indiquer, par la seule modalité auditive, une cible. Cependant, est-ce la seule méthode possible ? Est-ce la meilleure ?

Les recherches effectuées par Parseihian et al. sont pionnières dans le guidage sonore vers une cible sur une dimension de l’espace [Parseihian, 2016]. La tâche donnée aux sujets de leur expérimentation est de trouver une cible immobile sur une ligne droite. Ils doivent le faire en déplaçant un stylet le long de cette ligne sur une tablette. Ils partent de la gauche de cette ligne, la cible se trouvant sur la droite. Équipés d’un casque, un son évolue selon la distance relative entre le stylet et la cible.

L’étude propose de comparer et d’évaluer plusieurs stratégies de sonification pour guider le sujet vers la cible. Cela est fait en testant différents *mappings* entre les paramètres psychoacoustiques (cités dans la sous-partie II. 1. c.) et la distance relative entre le stylet et la cible. Dans le but de comparer la performance de chaque attribut du son, des sons synthétisés basiques sont utilisés dans cette étude. Neuf stratégies de sonification sont présentées et comparées²². Ces stratégies sont rangées dans trois catégories.

- **Stratégies sans référence**

Ces stratégies sont basées sur la variation d’un attribut simple du son comme la hauteur, le niveau sonore, le tempo ou la brillance. Comme les valeurs extrêmes ne

²² Des exemples sonores et les résultats sont disponibles sur http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/IEEE_SonificationStrategies/.

sont pas connues par l'utilisateur, il n'a pas connaissance du son à l'endroit de la cible. Ces stratégies sont restreintes par les limites perceptives humaines, c'est-à-dire que la précision maximum sera probablement limitée par la *just noticeable difference (JND)*²³ de chaque paramètre.

- Hauteur

Cette stratégie consiste à *mapper* la distance relative à la fréquence d'un son pur. Plus le son est grave, plus on est proche de la cible. La cible est donc représentée par le son le plus grave sur la ligne mais cette fréquence n'est pas connue au préalable par le sujet. Le son varie de 3394 Hz à 300 Hz. Le spectrogramme des sons générés par cette stratégie est représenté sur la Figure 8 (a).

- Tempo

Cette méthode fait correspondre la distance au taux de répétition (*rate*) d'un son pur de 1000 Hz et de d'une durée de 100 ms. Le taux de répétition du son varie entre 2 Hz (120 bpm) au plus loin de la cible et 20 Hz (1200 bpm) sur la cible. L'utilisateur doit donc chercher l'endroit où le son se répète le plus vite. C'est le type de stratégie notamment utilisé pour les radars de recul dont sont équipées certaines voitures.

- Niveau

Le niveau sonore d'un son pur de 600 Hz correspond à la distance à la cible. Le niveau est le plus bas à l'endroit de la cible. Il y a un écart de 40 dB entre le point le plus éloigné de la cible et la cible.

- Brilliance

Ici, des variations de la brillance d'un bruit blanc sont obtenues en utilisant des filtres passe-bas de second ordre. À l'endroit de la cible, la brillance de ce bruit blanc est la plus faible.

- Stratégies avec référence :

²³ Plus petite différence détectable : terme utilisé dans la littérature sur la psychoacoustique pour désigner la plus petite différence détectable entre 2 évolutions d'un paramètre sonore.

Ces stratégies utilisent des variations de paramètres sonores qui contiennent une référence sonore à l'endroit de la cible. L'utilisateur pourrait ainsi estimer sa position par rapport à la cible à chaque déplacement.

- Inharmonicité

Ici la référence est implicite. Grâce aux capacités évoquées dans la partie II. 1. c., l'utilisateur doit trouver l'endroit où le son est harmonique. Plus on s'éloigne de la cible, plus le son est inharmonique.

- Modulation d'amplitude (*Fluctuation Strength*²⁴ : FS)

Cette stratégie utilise un son pur de 200 Hz modulé en amplitude. À l'endroit de la cible, la fréquence de modulation est nulle. Plus on s'éloigne, plus les battements sont rapides. Le spectrogramme des sons générés par cette stratégie est représenté sur la Figure 8 (b).

- Synchronicité

Cette stratégie est une variation de la stratégie tempo et est basée sur la répétition de deux sons identiques. Le premier correspond à la référence, le second est déplacé dans le temps d'une durée dépendante de la distance à la cible. Plus les deux sons sont proches, plus on est proche de la cible.

- Stratégies avec référence et effet de zoom :

Parseihian et al. supposent qu'il est possible d'améliorer les stratégies avec référence en ajoutant un "effet de zoom". Le zoom consiste à amplifier l'effet de référence à mesure que l'on se rapproche de la cible en appliquant "une variation multi-échelle, c'est-à-dire une variation qui diffère pour chaque composant du son". Cela permettrait d'atteindre la cible avec plus de précision [Parseihian, 2016]. Pour cette catégorie, contrairement à la première catégorie, plusieurs paramètres du son sont modifiés à la fois (hauteur, durée, timbre).

- Modulation Fréquentielle Multi-Bande (MFMB)

²⁴ Littéralement : force de fluctuation

Cette stratégie est basée sur la modulation de fréquence d'un son harmonique de fréquence fondamentale à 200 Hz. Chaque harmonique du son voit sa fréquence modulée différemment. Plus l'harmonique a une fréquence élevée, plus la modulation de celle-ci sera élevée. Quand l'utilisateur approche de la cible, la modulation fréquentielle décroît. Il n'y a pas de modulation de fréquence quand la cible est atteinte, on trouve alors le son harmonique à 200 Hz. Plus nous sommes loin de la cible, plus le son est donc complexe.

L'utilisation de ce son harmonique permet un "zoom sonore" grâce au fait que la modulation fréquentielle agit sur toutes les harmoniques mais pas de la même façon. Près de la cible, la modulation fréquentielle de la première harmonique est trop petite pour comprendre où est la cible, mais la modulation fréquentielle de la deuxième harmonique, qui est deux fois supérieure, permet de garder en précision. Le spectrogramme des sons générés par cette stratégie est représenté sur la Figure 8 (c) et permet de mieux la comprendre.

- Battements Multi-Échelle (BME)

Cette stratégie se base aussi sur un son à plusieurs harmoniques. Cependant, ici la modulation des harmoniques n'est pas fréquentielle mais temporelle. Nous ne détaillerons pas cette stratégie car elle est plus difficile à comprendre que les autres.

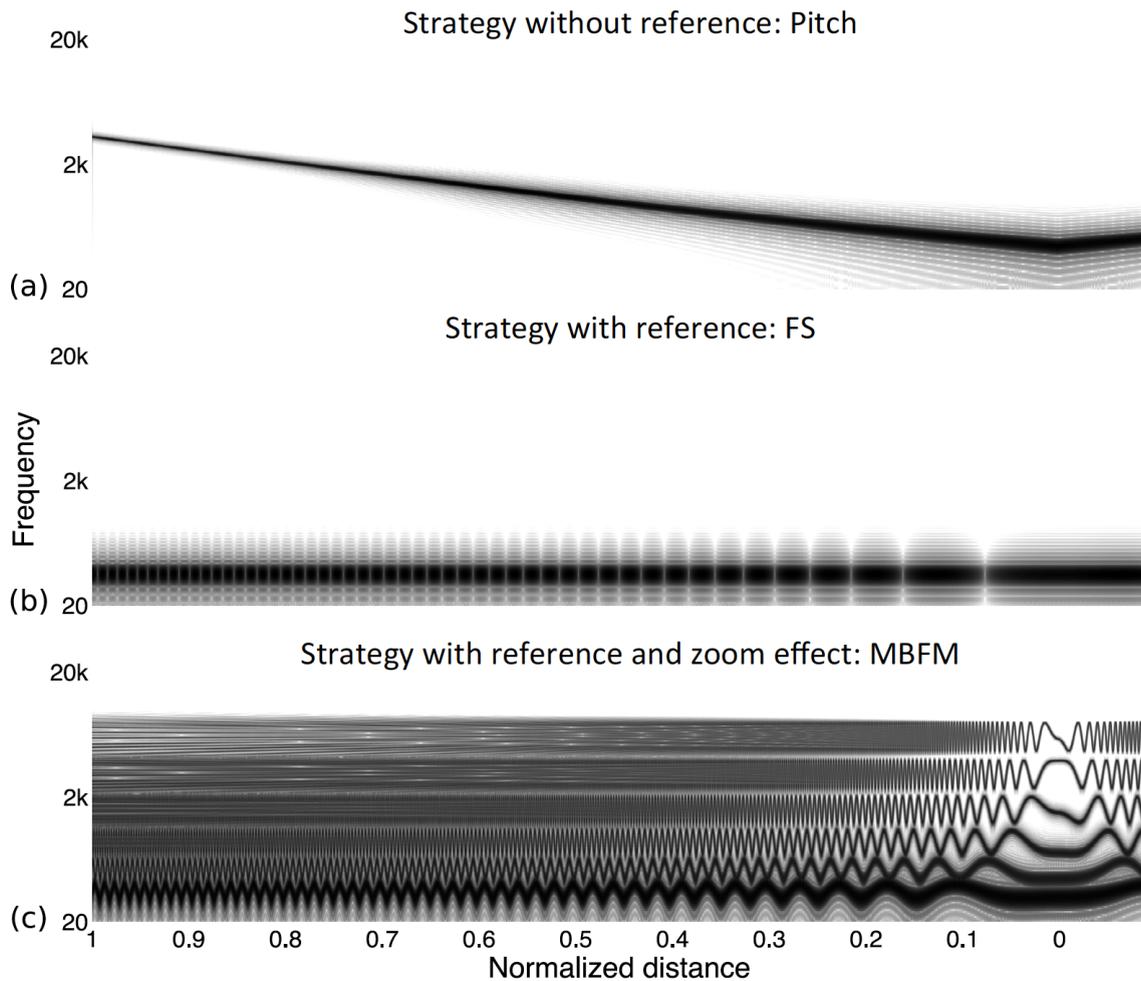


Fig. 8 : Spectrogramme des sons générés par trois stratégies de sonification (un exemple pour chaque catégorie) en fonction de la distance à la cible. (a) Stratégie Hauteur (pour les stratégie sans référence), (b) Modulation d’amplitude (pour les stratégies avec référence) et (c) Modulation Fréquentielle Multi-Bande (pour les stratégies avec référence et effet de zoom) [Parseihian, 2016].

- Méthode d’évaluation employée

Parseihian et al. soulèvent qu’une interface sonore de guidage peut avoir trois buts :

- 1) Guider le plus précisément possible
- 2) Guider le plus rapidement possible
- 3) Guider sans dépasser le cible (par exemple si un obstacle est présent)

Ils mettent ainsi à l'épreuve les stratégies de sonification en donnant successivement trois types de consignes aux participants pour trouver la cible invisible :

- 1) "soyez le plus précis possible"
- 2) "soyez le plus rapide possible"
- 3) "ne dépassez pas la cible"

Pour notre application dans le domaine des FPS, les deux premiers points sont les plus importants. Nous nous intéresserons donc plus particulièrement aux résultats les concernant.

- Résultats de l'étude

En termes de précision, ce sont les deux stratégies avec référence et effet zoom qui donnent les meilleurs résultats. C'est avec elles que l'on obtient le moins d'erreurs. La stratégie "inharmonicité" obtient d'assez bons résultats sur la consigne de précision. Elle induit par ailleurs beaucoup d'oscillations autour du point cible. La méthode MFMB est celle qui donne le moins d'erreurs au test avec consigne de rapidité et de loin, talonnée par la stratégie Hauteur et la stratégie Tempo. De plus, la méthode MFMB, ainsi que BME donnent le moins d'erreurs pour la consigne indiquant de ne pas dépasser la cible.

Les stratégies sans référence induisent plus d'oscillations autour de la cible. Les stratégies de cette catégorie ne se valent pas toutes. En effet, Hauteur et Tempo permettent une plus grande précision que Niveau et Brilliance. En test de rapidité Hauteur induit un temps d'approche significativement plus court que le temps d'ajustement.

Les stratégies avec référence induisent moins d'oscillations autour de la cible et les participants dépassent moins la cible.

De cette étude on retiendra que les méthodes avec référence et effet de zoom sont les meilleures en précision, et que les stratégies Hauteur et Tempo sont de bonnes candidates pour des tâches de rapidité.

- Application à notre contexte

Comme au tir sportif, ces sonifications sur une dimension présentent un défaut majeur si on les applique sur un plan en deux dimensions (ce qui est le cas dans notre contexte) : le son est le même si l'utilisateur se trouve par exemple à 1 mètre de la cible à gauche ou à 1 mètre de la cible à droite. Une sonification des deux dimensions du plan semble donc plus pertinente.

4) Guidage sonore sur deux et trois dimensions

Une sonification des deux dimensions du plan signifie que la sonification induit un son différent pour chaque point du plan. Il serait ainsi possible de déterminer sa position approximative par rapport à la cible à la première écoute.

Dans une étude de 2018, le chercheur allemand Tim Ziemer propose une méthode pour trouver une cible à l'aveugle sur un plan en deux dimensions [Ziemer, 2018]. Son étude trouve une application dans le domaine médical pour le guidage du scalpel du chirurgien lors d'une intervention. Comment fonctionne cette sonification ?

La cible à trouver est ici représentée par une région circulaire où se trouve un bruit rose²⁵. Les caractéristiques d'un son monophonique indiquent où se trouve la cible. Les différentes dimensions de l'espace sont *mappées* à des propriétés perceptives de ce son. Le principe de *mapping* est présenté dans la Figure 9. Il est possible de retrouver sur YouTube la série de vidéos qui permet d'appréhender les principes de sonification en jeu²⁶.

²⁵ Plus doux que le bruit blanc, il s'agit d'un signal aléatoire dont la densité spectrale est constante par bande d'octave.

²⁶

<https://www.youtube.com/watch?v=WaCzHU3-OYE&list=PLVv3BMS8IIXGOhYG0l1NCbAnRNCmoAe21&index=1>

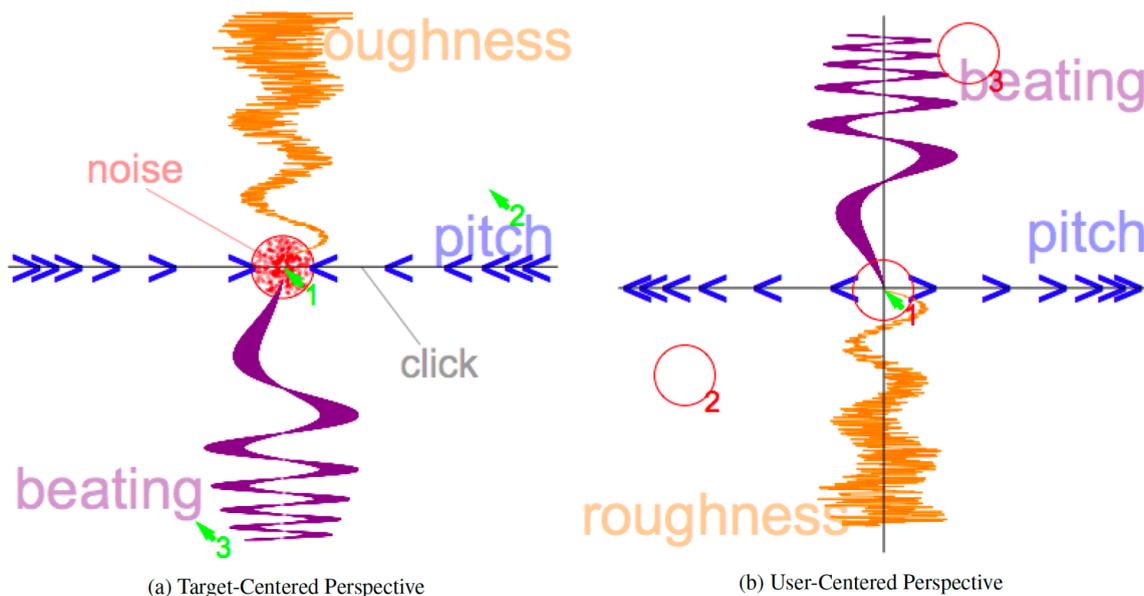


Fig. 9 : Principe de *mapping* décrivant le son pour différentes positions de l'utilisateur (curseurs) avec la cible au milieu (a) et pour différentes position de cible (cercles rouges) avec l'utilisateur au centre (b). [Ziemer, 2018]

Pour l'axe horizontal, la sonification repose sur l'évolution de la hauteur du son. Ils utilisent ici une gamme de Shepard continue²⁷. Ce son donne l'illusion que la hauteur diminue ou augmente indéfiniment²⁸. Si l'utilisateur se trouve à droite de la cible, la gamme de Shepard est ascendante (la hauteur semble augmenter). Si l'utilisateur se trouve à gauche de la cible, la gamme de Shepard descend (la hauteur semble diminuer). Plus l'utilisateur est proche de la cible, plus la hauteur varie lentement, et inversement.

L'axe vertical est séparé en deux. Si la cible se trouve au-dessus de la position de l'utilisateur, le son de Shepard est modulé en amplitude, il apparaît donc des battements (*beating* sur la Figure 9). Plus l'utilisateur s'approche de la cible, plus la modulation en amplitude "ralentit". Si la cible se trouve en dessous de l'utilisateur, le son de Shepard est manipulé pour qu'il devienne rugueux (voir la définition de la

²⁷ Nommée d'après Roger Shepard qui l'a créée en 1964, c'est un son constitué de sons de Shepard, qui sont des sons complexes synthétiques formés par l'addition de signaux sinusoïdaux de fréquences séparées par un intervalle d'octave.

²⁸ Il s'agit en fait de la répétition cyclique d'une séquence de sweep. Un sweep est un son qui balaye le spectre audio de 20 Hz à 20 kHz.

rugosité d'un son dans la sous-partie II. 1. b.). Plus on s'éloigne de la cible, plus la rugosité du son augmente (*roughness* sur la Figure 9).

Pour appréhender la sonification nous détaillerons le son entendu aux positions proposées par la Figure 9 (a). À la position 1, qui correspond à la cible, nous entendons un son pur dont le niveau sonore et la fréquence sont constants. À la position 2, le son est un peu rugueux et sa hauteur décroît très vite de manière répétée. À la position 3, la hauteur du son augmente lentement mais son niveau sonore est modulé très rapidement.

Un autre élément de sonification est ajouté : lorsque que l'on passe par la ligne horizontale qui passe par la cible, un court bruit sec est produit. Cela permet immédiatement de savoir que l'on a atteint l'ordonnée de la cible et qu'il faut désormais se déplacer uniquement sur l'axe horizontal.

Pour tester les performances de cette sonification, c'est-à-dire savoir si elle permet de trouver une cible invisible efficacement, 18 participants ont effectué une tâche de localisation de cibles. Après un premier entraînement de 30 min pour appréhender la sonification, ils devaient trouver sur un écran 20 cibles invisibles d'un rayon de 5 mm dans un carré de 20 cm de côté. Il leur est demandé de trouver la cible le plus rapidement possible en déplaçant la souris et en écoutant le son. Quand le participant pense se trouver sur la cible, il valide en cliquant. Au moment du clic, la trajectoire effectuée est enregistrée, le curseur retourne au centre du carré et la cible suivante est déterminée aléatoirement. Les participants ne sont pas informés s'ils touchent ou non les cibles.

Les résultats mis en avant sont les suivants :

- La sonification est interactivement interprétable, ce qui permet aux utilisateurs de correctement trouver les cibles. En effet, sur les 20 cibles, les participants en touchent entre 75% et 100%. En moyenne, les participants mettent entre 8 et 34 secondes pour trouver la cible.

- Les participants peuvent approcher la cible en suivant successivement chaque axe du plan, ce qui signifie que chaque axe sonifié est orthogonal à l'autre en perception. Cela est mis en évidence par la Figure 10 où l'on peut observer des trajectoires où les participants se déplacent d'abord selon l'axe x puis selon l'axe y, ou l'inverse.
- Les participants peuvent combiner l'information donnée par les deux axes et ainsi utiliser le chemin le plus court pour atteindre la cible. Cela est mis en évidence sur la Figure 10 par les trajectoires se rapprochant d'une ligne droite en diagonale.
- On observe un effet d'apprentissage chez les participants. Cela est montré par le fait que sur les 20 cibles présentées les 6 premiers "tirs" sont significativement moins bons en termes de rapidité que les 6 derniers. Ziemer suppose ainsi qu'un entraînement plus poussé avec cette méthode amènerait à des performances bien supérieures.²⁹

²⁹ Disponible uniquement sous Android, un jeu mobile de localisation de cible, CURAT, à été créé pour permettre d'apprendre cette méthode de guidage sonore.

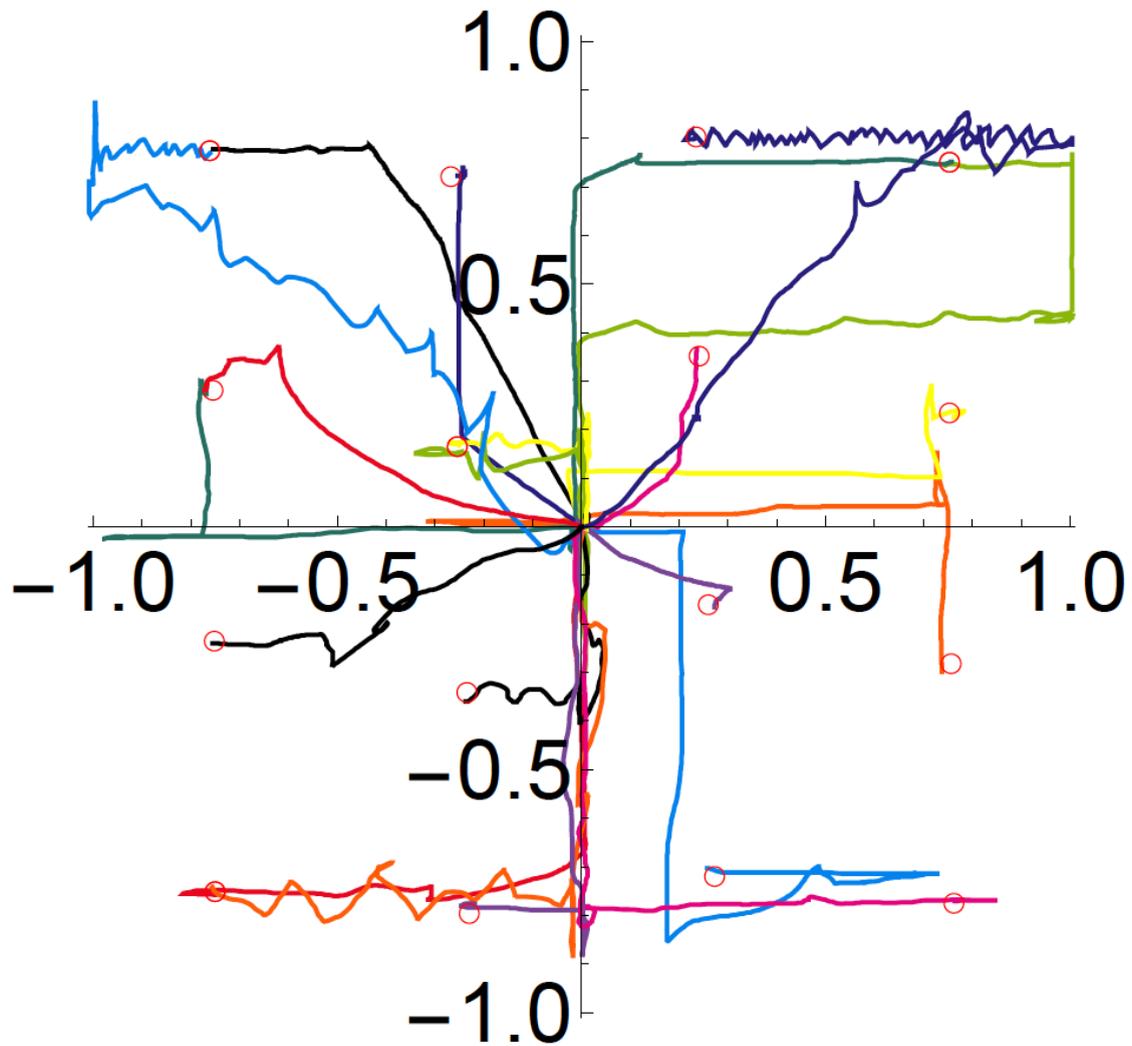


Figure 10 : Différentes trajectoires enregistrées pour les différentes cibles proposées.

Bien que notre problématique du FPS nous pousse à chercher une sonification du plan en deux dimensions, on peut tout de même relever que Ziemer et al. proposent en 2019 une méthode pour sonifier une cible dans un espace en 3 dimensions [Ziemer, 2019]. Pour résumer, ils ajoutent la brillance et la *fullness* (largeur timbrale) comme caractéristiques du son avec lesquels jouer pour sonifier la dimension supplémentaire.

De l'étude des travaux de Ziemer, nous retiendrons qu'il est possible de sonifier efficacement la position d'une cible sur un plan de deux dimensions en utilisant des paramètres psychoacoustiques qui interfèrent peu entre eux (ici hauteur, battements et rugosité).

5) Spatialiser lors de la visée ?

Les propositions de sonification présentées jusqu'à présent utilisent toutes un son monophonique pour indiquer où se trouve la cible. L'avantage avancé dans les études est qu'il peut donc être écouté sur n'importe quel système. Nous nous demanderons ici s'il ne serait pas possible d'utiliser notre capacité à distinguer si un son est plutôt à gauche ou à droite, afin de donner un indice sur la position de la cible. Pour cela nous nous inspirerons d'une solution proposée pour rendre accessibles les jeux vidéo de courses aux malvoyants.

Les jeux vidéo de course sont très populaires. Parmi les plus connus on peut citer *Need For Speed*, *Gran Turismo* et dans une version plus colorée, *Mario Kart*. Leur principe est simple : finir un circuit de course motorisé le plus rapidement possible avant ses concurrents. Cela les rend facilement compréhensibles mais la malvoyance entraîne évidemment des difficultés pour y jouer convenablement. Les joueurs DV mettent donc en place des stratégies pour adapter le jeu à leur handicap. Un joueur albinos (l'albinisme serait la cause de 5 à 10 % des malvoyances dans le monde) témoigne ainsi qu'il choisit toujours des véhicules aux couleurs vives. À l'heure actuelle, les indices sonores présents dans ce type de jeux permettent d'entendre le son du moteur de la voiture du joueur et le son des voitures aux alentours, afin de les éviter. Cependant, les joueurs malvoyants déplorent l'absence de signaux sonores qui pourrait indiquer la proximité d'un mur ou de barrières.

Des démarches ont été faites pour rendre accessible ce genre de jeux vidéo aux personnes malvoyantes. Le RAD, pour *Racing Auditory Display* (Interface audio de course), développé en 2018 par Brian A. Smith de l'Université de Columbia, en est un très bon exemple [Smith, 2018]. Dans son étude, il présente cette interface basée sur l'audio qui permet de guider un joueur sur un circuit de course, à l'aveugle, équipé d'un simple casque d'écoute.

Le principe de ce type de jeu est de parcourir un circuit le plus vite possible en anticipant les virages et en sortant le moins de fois de la route prévue. Pour parvenir à cette expérience de jeu, le principe du RAD repose sur ce que ses

développeurs appellent le *Sound Slider*³⁰. Celui-ci utilise la stéréophonie du casque audio et notre capacité à discriminer un son comme étant plutôt à gauche ou plutôt à droite. Il fonctionne sur le principe suivant : plus le joueur est susceptible de heurter le bord gauche/droit de la piste, plus le son est spatialisé à gauche/droite. Le but pour le joueur est de faire en sorte que le son reste au centre de l'image stéréo.

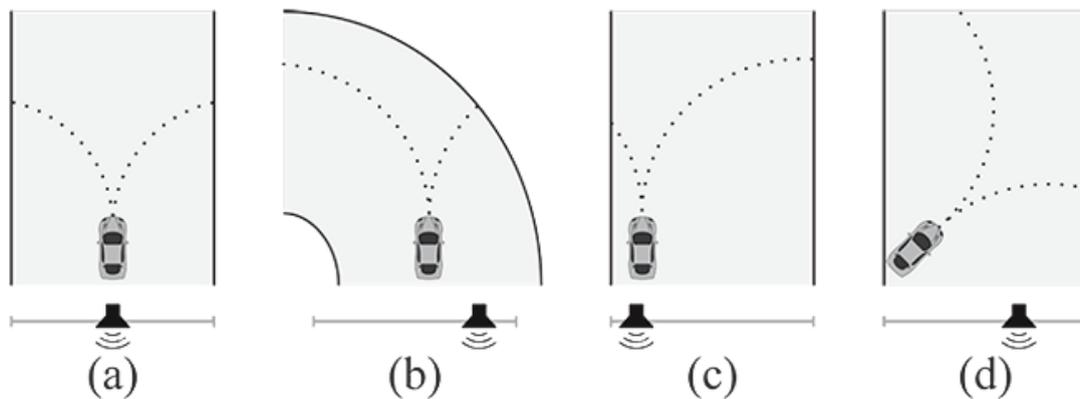


Fig. 11 : Principe du “Sound Slider” : Position du son en relation à la position de la voiture par rapport à l’évolution du circuit [Smith, 2018]

Ainsi, si le son est très à gauche, c’est-à-dire si la voiture du joueur est proche du bord gauche de la piste, il devra tourner très à droite afin de “ramener” le son le plus au centre possible. Cette simple idée de spatialisation permet de transmettre aux joueurs de multiples informations : la position latérale de la voiture sur la piste évidemment, mais aussi son cap par rapport à la piste.

Cette interface sonore semble efficace. Une vidéo disponible montre un joueur aveugle, qui, après trois essais termine un circuit sans le moindre souci, le sourire aux lèvres³¹. Ce système a pour vocation d’être intégré à n’importe quel jeu de course pour le rendre accessible aux aveugles. Malheureusement, à la date d’écriture de ce mémoire, aucun jeu grand public n’est équipé de cet outil. Nous pourrions néanmoins nous inspirer de l’exemple d’utilisation de spatialisation du *Sound Slider* pour notre sonification.

³⁰ Littéralement “ curseur sonore”.

³¹ <https://www.youtube.com/watch?v=8DI0a8ZufiQ>

PARTIE III : Sonifications interactives pour un jeu de tir adapté aux personnes déficientes visuelles

1) Concept du test et paramétrage

Notre but est de signifier au joueur par la seule modalité auditive où se trouve la cible. Nous souhaitons ainsi développer des principes de sonification qui pourraient être intégrés dans n'importe quel FPS, afin de les rendre accessibles aux personnes déficientes visuelles.

L'environnement de programmation orientée objet Max 8 a été choisi pour mettre en place ces expérimentations. C'est un logiciel qui permet notamment de faire de la synthèse sonore, de l'analyse et du traitement du signal, de l'enregistrement ainsi que du contrôle d'instruments MIDI. Max 8 est un logiciel de programmation dit "graphique", c'est-à-dire qu'il utilise un langage de programmation graphique dans lequel les programmes sont écrits en assemblant non pas des lignes de code mais des éléments graphiques présentés à l'utilisateur via son interface [Raigneau, 2018]. Le programmeur utilise des boîtes fonctionnelles qu'on appelle « objets », disposés spatialement dans ce qu'on appelle dans Max, un « patch ». En les reliant, les objets peuvent s'envoyer mutuellement des données au moyen de leurs entrées et sorties. Ce logiciel a été choisi car il permet de facilement synthétiser et manipuler des sons en temps réel.

Pour tester nos méthodes de sonification, le patch suivant (mode présentation³²) a été conçu (Figure 12) :

³² Le mode présentation de Max permet de sélectionner les éléments que l'on souhaite être visibles. Nous ne voyons donc pas tout le programme et les liens entre les objets.

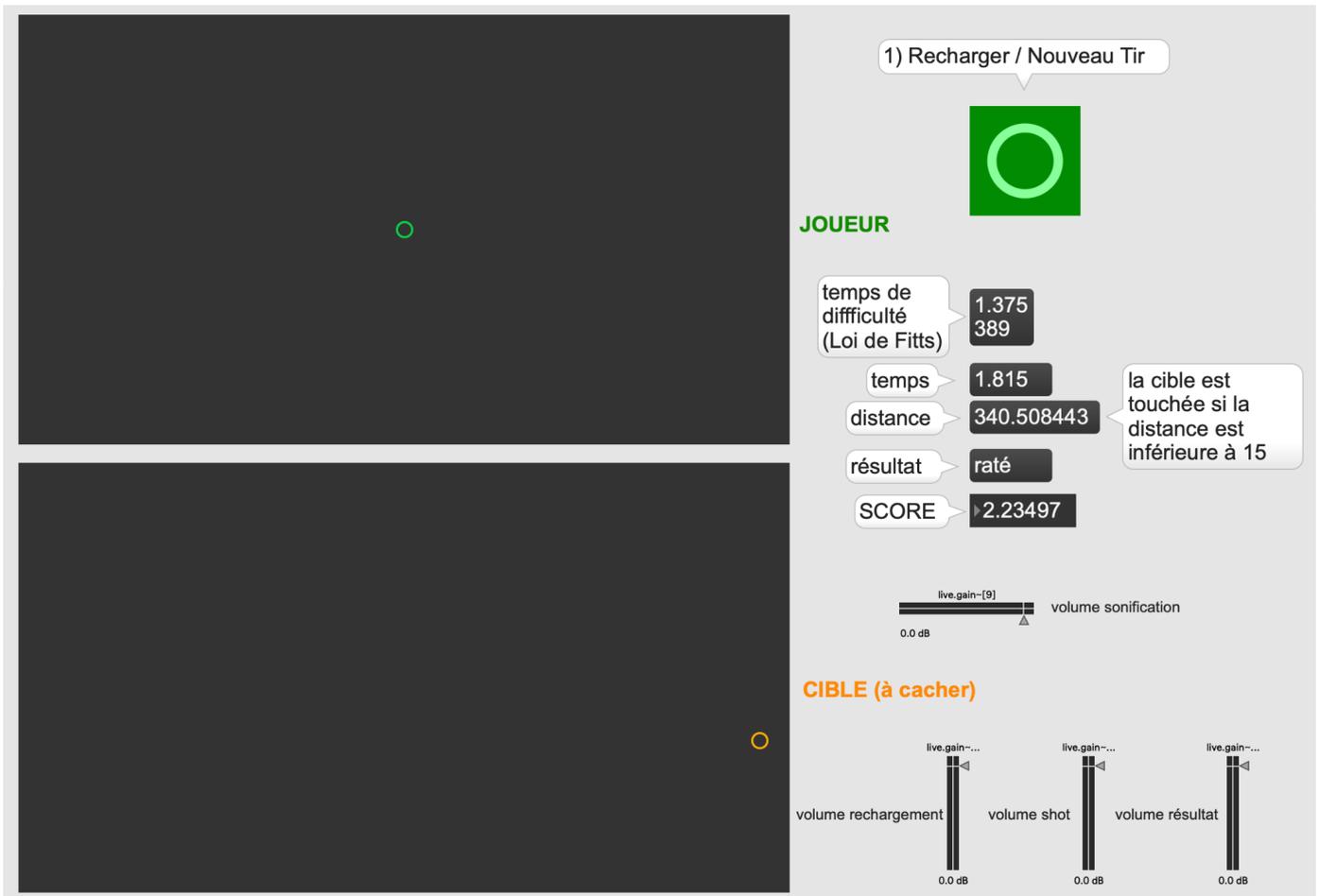


Figure 12 : Interface de l'application Max

L'application se base sur l'objet *pictslider* de Max. Cet objet permet à l'aide de la souris de déplacer un anneau dans un rectangle et de récupérer les coordonnées (abscisse et ordonnée) de cet anneau en temps réel. On utilise ici 2 *pictslider* (les 2 rectangles gris foncé sur la Figure 12). L'anneau orange représente la cible et l'anneau vert représente le joueur. C'est ce dernier que le joueur va déplacer. Le but de l'utilisateur est simple : déplacer l'anneau vert afin qu'il rejoigne la même position qu'occupe l'anneau orange dans son rectangle. Chaque anneau reste donc dans son rectangle mais il peuvent occuper la même position dans leur rectangle respectif. Tout au long du déplacement, le joueur est équipé de lunettes opaques pour l'empêcher de voir où se trouve la cible. Il ne se réfère donc qu'aux sons, synthétisés en temps réel, diffusés dans le casque d'écoute qu'il porte.

L'objet *pictslider* est totalement paramétrable. Il a ainsi fallu répondre aux questions suivantes :

- Quel est le format des rectangles ?

La plupart des FPS se jouant sur des écrans 16/9 nous choisirons un cadre avec ce ratio.

- Quel est la taille des rectangles ?

Il fallait que le *pictslider* soit assez grand pour que la tâche de localisation soit un défi mais tout en s'assurant que le test ne prenne pas trop de temps. Nous avons ainsi choisi un rectangle qui sur l'écran de l'ordinateur possède une largeur d'environ 7,8 cm et une longueur d'environ 14 cm.

- Quelles sont les valeurs maximales des coordonnées aux bords haut et droit du cadre ?

Les valeurs de sortie du *pictslider* sont paramétrables. Lorsque l'anneau se trouve tout en bas à gauche, ses coordonnées sont (0;0). Pour mieux comprendre comment fonctionne le *pictslider*, il faut le comparer à un tableau dans lequel l'utilisateur se déplace de case en case. Plus le nombre de cases est élevé, plus son déplacement est précis dans le tableau. En revanche, il mettra plus de temps à aller d'un point A à un point B. Ainsi, la valeur maximale sur le côté droit (abscisse) et la valeur maximale en haut (ordonnée) sont décisives à déterminer. Des valeurs élevées permettent de se déplacer de manière plus précise, mais en échange la rapidité de déplacement est réduite. Cela influence donc la sensibilité de la souris lors du déplacement de l'anneau.

Pour que la sensibilité de déplacement de la souris soit la même dans les deux axes il faut aussi que les "cases" du tableau soient carrées. Il faut donc que les valeurs maximales du *pictslider* répondent au même format que la forme du rectangle, soit un rapport de 16/9.

Après plusieurs tests pour obtenir une sensibilité de déplacement agréable et précise, et un calcul simple pour avoir un rapport de 16/9, les valeurs maximales ont été choisies : 711 sur le bord droit et 400 en haut du rectangle.

Si $A(x_A; y_A)$ est le point du joueur et $B(x_B; y_B)$ est le centre de la cible, nous calculons aisément la distance d à la cible avec la formule $d = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$. Avec les valeurs maximales de coordonnées choisies plus tôt on trouve une distance maximale d'environ 816 ($d = \sqrt{(711 - 0)^2 + (400 - 0)^2} \simeq 815,79$). Cela correspond à avoir le joueur et la cible de part et d'autre de la diagonale qui traverse le rectangle. Nous décidons que la cible sera touchée lorsque la distance après validation du joueur est strictement inférieure à 15. Cela correspond sur l'écran de l'ordinateur à une cible d'un diamètre de 1 cm. Elle occupe donc 3,14 cm² dans une surface de 109,2 cm², soit 2,88 % de la surface. Atteindre cette cible, à l'aveugle, simplement en suivant un son est donc un défi.

2) Sonifications envisagées

Suite aux recherches effectuées dans la partie II., cinq méthodes de sonification à comparer ont été envisagées. Le tableau 1 les explicite et indique par quels points de la partie II. elles ont été inspirées.

Méthode	Type de sonification	Information représentée	Paramètres sonores associés	Inspiré de

1	2D, avec référence sur l'axe horizontal	Distance horizontale X Distance globale	Spatialisation Gauche/Droite Augmentation de la fréquence	RAD Tir sportif, Sons d'alertes, Parseihian
2	2D, avec référence sur les 2 axes	Distance horizontale X Distance verticale Y	Spatialisation Gauche/Droite Augmentation du tempo de bips graves ou aigus	RAD Tir sportif, Parseihian (Tempo), radar de recul
3	2D, avec référence sur les 2 axes	Distance horizontale X Distance verticale Y	Spatialisation Gauche/Droite Shepard Tone augmentant ou diminuant	RAD Ziemer
4	2D, avec référence sur les 2 axes	Distance horizontale X Distance verticale Y	Shepard Tone Battements / Rugosité	Il s'agit de la méthode sur 2 dimensions de Ziemer
5	2D, avec référence sur les deux axes	Distance horizontale X Distance globale	Spatialisation Gauche/Droite Modulation Fréquentielle Multi-Bande (MFMB)	RAD Parseihian

Tableau 1 : Sonifications envisagées

Dans le temps imparti de ce mémoire, seules les deux premières méthodes ont été développées. Par la suite, nous appellerons la méthode 1 “Fréquence” et la méthode 2 “Radar”.

3) Sonification développées

a) Fréquence

Cette stratégie de guidage sonore fonctionne comme ceci :

- Si le son est à droite, la cible est située sur la droite. Si le son est à gauche, la cible est située sur la gauche
- La fréquence du son est maximale au centre de la cible.

Ainsi pour toucher la cible il faut chercher à avoir un son bien au centre et le plus aigu possible.

Comme Parseihian et al., nous utiliserons des sons synthétiques simples pour mieux contrôler leurs attributs. De futures recherches sont à faire pour créer des sons qui prennent aussi en compte la satisfaction auditive de l'utilisateur. Ces considérations n'entrent pas dans le cadre de ce travail.

Cette stratégie se base sur un son composé d'une onde sinusoïdale (son pur) et d'un signal en dents de scie 12 dB moins fort que l'autre onde. Le signal en dents de scie, contenant toutes les harmoniques entières, permet de suivre les recommandations vues dans les études sur les sons d'alarmes. Le son pourra ainsi être plus facilement entendu dans un environnement bruyant. La fréquence fondamentale de ces deux ondes est la même et dépend de la distance à la cible.

Deux paramètres sont à déterminer pour cette stratégie :

- Comment évolue la spatialisation du son en fonction de la position à la cible ?

Pour spatialiser le son tantôt à gauche, tantôt à droite, nous récupérons la différence des abscisses du joueur et de la cible. Dans le patch Max, si la cible est à gauche, la différence des abscisses est négative. Si la cible est à droite, elle est positive. Dans les conditions du test la différence des abscisses varie entre -691 et 691³³. Avec l'objet *scale* de Max on convertit l'échelle [-691;691] sur une échelle [0;1]. On multiplie ensuite le signal de gauche par ce chiffre entre 0 et 1, dépendant de la position à la cible. On fait de même avec le signal de droite.

Des premiers tests ont été effectués avec un système de panoramique³⁴ classique, basé sur la racine carrée. La Figure 13 montre l'évolution de l'intensité du signal dans l'oreille gauche et droite entre les valeurs 0 et 1. Lorsque le système reçoit la valeur 0 (qui correspond à -691) le signal est très à gauche. À l'inverse, lorsqu'il reçoit la valeur 1 (qui correspond à 691) le signal est très à droite.

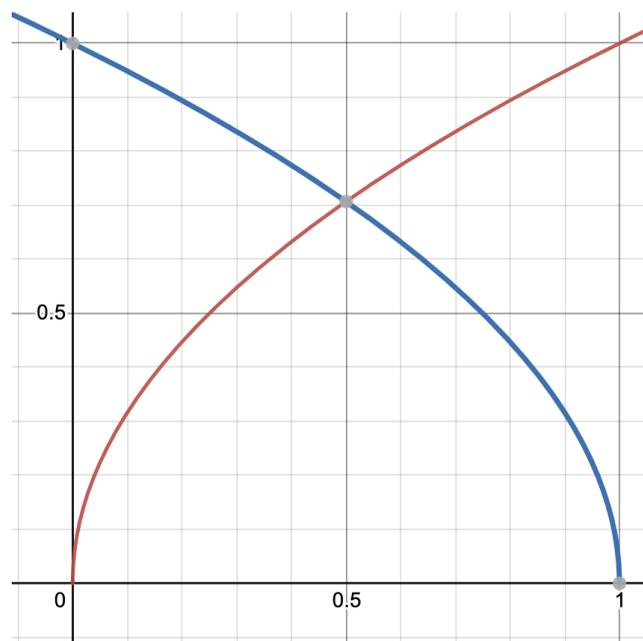


Figure 13 : En bleu la courbe d'évolution de l'intensité du signal à gauche et en rouge la courbe d'évolution de l'intensité du signal à droite, en fonction de la valeur entre 0 et 1.

Les premiers tests ont montré que ce panoramique était très peu précis pour déterminer à quel moment nous sommes alignés avec l'abscisse de la cible. Nous

³³La différence des abscisses ne varie pas entre -711 et 711 car la programmation du placement aléatoire de la cible est telle qu'elle ne se trouve jamais trop au bord du cadre.

³⁴ Réglage destiné à placer le son dans l'espace sonore de gauche à droite.

avons ainsi pensé à une méthode de panoramique où tant que nous ne sommes pas proche de l'abscisse de la cible, le son reste "collé" à l'oreille gauche ou à l'oreille droite. On souhaite ainsi trouver des fonctions ressemblant à la Figure 14.

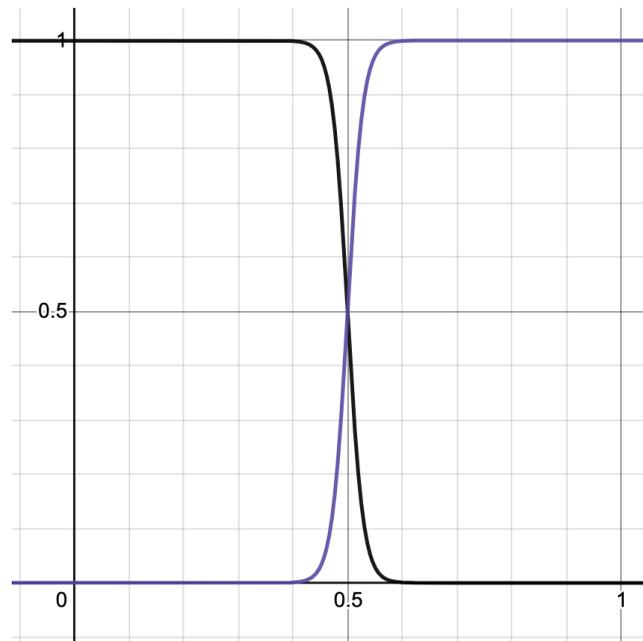


Fig. 14 : Fonctions recherchées pour le panoramique. En noir, l'évolution de l'intensité du canal gauche et en violet l'évolution de l'intensité du canal droit.

Ces formes de fonctions correspondent aux fonctions sigmoïdes. Ces fonctions mathématiques peuvent être de la forme $f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda(x-a)}}$. Si λ est négatif la courbe passe de 0 à 1. Si λ est positif la courbe passe de 1 à 0. Le facteur λ détermine la "vitesse" à laquelle la courbe passe de 0 à 1 ou de 1 à 0. Plus $|\lambda|$ est élevé, plus la courbe passe de 0 à 1 ou de 1 à 0 rapidement. Ainsi plus $|\lambda|$ est élevé, plus nous serons précis sur l'axe des abscisses, le son oscillant beaucoup lorsque l'on passe à gauche ou à droite de l'abscisse de la cible. Après plusieurs tests, il a été choisi $|\lambda| = 70$. L'opérateur a correspond à l'endroit où la courbe atteint la moitié de sa montée ou de sa descente. Comme on souhaite que le son soit au centre pour $x = \frac{1}{2}$, on choisit $a = \frac{1}{2}$. On obtient ainsi les fonctions suivantes dont les représentations graphiques correspondent en fait à la Figure 14 :

Evolution de l'intensité du canal gauche	Evolution de l'intensité du canal droite
$f(x) = \frac{1}{1+e^{70(x-0.5)}}, \quad C_f \text{ en noir}$ <p>sur la Figure 14.</p>	$g(x) = \frac{1}{1+e^{-70(x-0.5)}}, \quad C_g \text{ en violet}$ <p>sur la Figure 14.</p>

On émet l'hypothèse que cette méthode de panoramique permettra d'être très précis pour trouver l'abscisse de la cible.

- Comment évolue la fréquence du son en fonction de la distance à la cible ?

Dans la stratégie Fréquence, la fréquence du son est *mappée* sur la distance globale à la cible. Il nous reste à déterminer comment évolue cette fréquence.

Comme nous l'avons vu dans l'étude des sons d'alarmes, la perception du danger augmente lorsque la fréquence du son augmente. Nous avons donc choisi que la fréquence du son augmente lorsque l'on se rapproche de la cible. Il faut maintenant déterminer quelle fonction mathématique, définie sur l'intervalle $[0;816]$, appliquer à la fréquence. Une augmentation linéaire de la fréquence est exclue. En effet, dans les hautes fréquences cela serait très peu précis car un écart de 40 Hz entre 860 Hz et 900 Hz est bien moins discernable qu'un écart de 40 Hz entre 100 et 140 Hz. Cela est dû au fait que l'oreille humaine traite les fréquences de manière logarithmique. La perception des fréquence suivant un logarithme de base 2 (perception des octaves) en dessous de 1 kHz, la courbe que nous cherchons à approcher est de la forme : $h(x) = a \times \log_2(x + 1) + b$. L'addition "+ 1 " a été introduite car la distance peut être égale à 0. Or, une fonction logarithme n'est pas définie en 0.

Nous souhaitons que la fréquence minimale (au plus loin de la cible) soit de 150 Hz et qu'au centre de la cible elle soit de 1000 Hz³⁵. Pour déterminer a et b , on résout donc le système répondant aux deux égalités suivantes :

³⁵ Au delà de 1000 Hz, nous avons jugé que le son était trop désagréable à écouter. En dessous, cela ne laissait pas assez de marge de progression par rapport à 150 Hz.

$$(1) h(0) = 1000 \quad (1) a \times \log_2(1) + b = 1000$$

$$(2) h(816) = 150 \text{ soit } (2) a \times \log_2(817) + b = 150$$

On résolvant le système on trouve $a \approx -87,9$ et $b = 1000$. On obtient ainsi la fonction h définie sur l'intervalle $[0;816]$ telle que $h(x) = -87,9 \log_2(x + 1) + 1000$. La Figure 15 est la représentation graphique de la fonction h . Elle représente donc l'évolution de la fréquence du son en fonction de la distance à la cible.

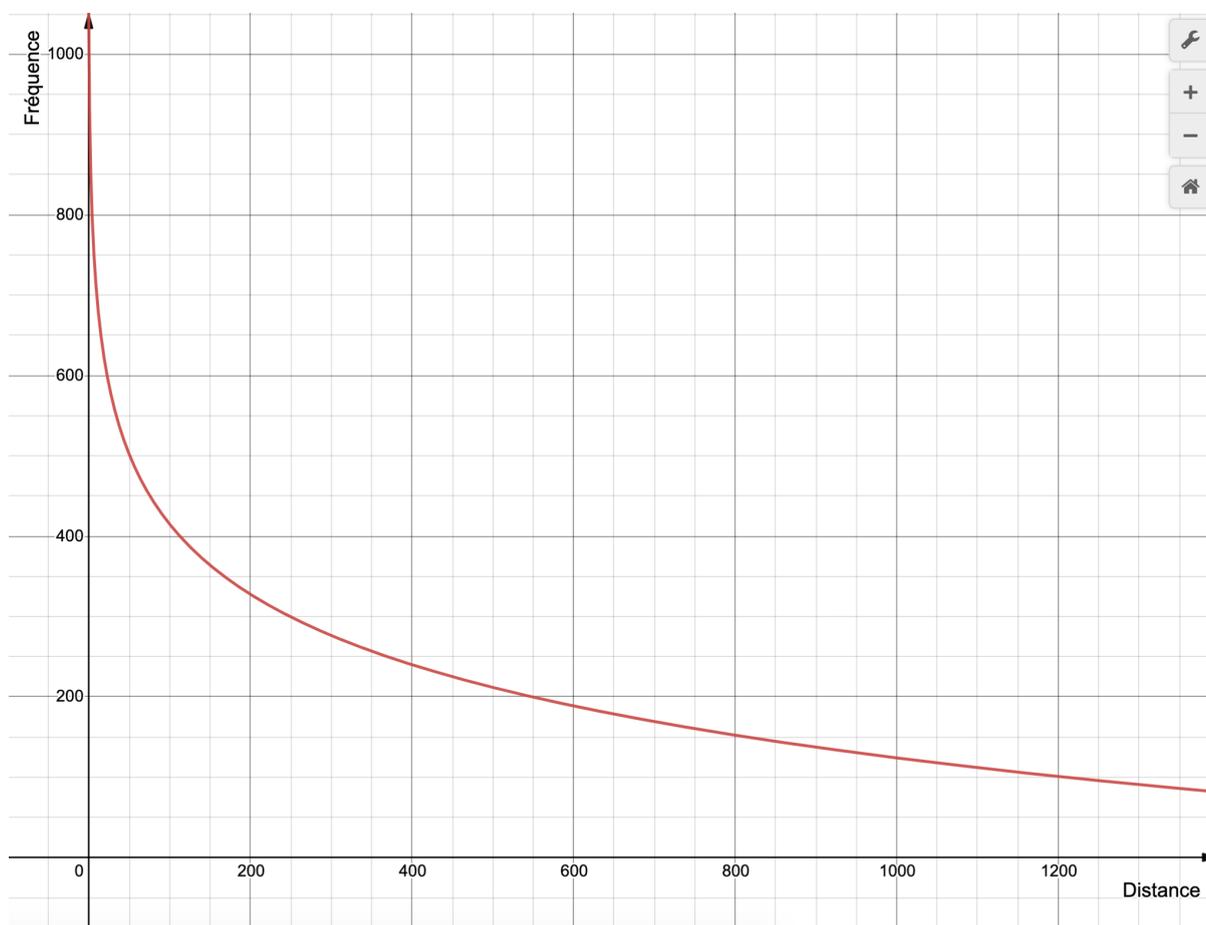


Figure 15 : Évolution de la fréquence du son en fonction de la distance à la cible.

Si la valeur minimale de la fréquence est de 150 Hz, on peut noter que la fréquence du son sera rarement en dessous de 180 Hz, car le joueur et la cible ont peu de

chances de se trouver à des distances aussi élevées. Dans les oreilles de l'auditeur, atteindre la cible correspond à avoir une fréquence supérieure à 650 Hz.

b) Radar

Cette stratégie de guidage sonore fonctionne comme ceci :

- Si le son est à droite, la cible est située sur la droite. Si le son est à gauche, la cible est située sur la gauche.
- Plus les bips sont rapides et courts plus on se rapproche de l'ordonnée de la cible.
- Si les bips sont graves, la cible est en bas (il faut descendre). Si les bips sont aigus, la cible est en haut (il faut monter). Les deux types de bips se confondent sur la fine ligne qui passe par l'ordonnée de la cible .

Pour atteindre la cible il faut donc avoir les bips bien au centre de l'espace stéréophonique et saisir le moment où les bips passent d'aigus à graves ou de graves à aigus.

La gestion de la spatialisation gauche/droite est la même que pour la stratégie Fréquence.

La sonification se base sur un signal en dents de scie modulé par un signal carré³⁶. La modulation par le signal carré crée des coupures, générant des bips. Si le joueur se trouve en dessous de la cible (et qu'il doit donc monter), le signal en dents de scie modulé a une fréquence de 400Hz. Si le joueur se trouve au-dessus de la cible (et qu'il doit donc descendre), le signal modulé a une fréquence de 200Hz. La fréquence du signal carré modulant varie de 1 Hz, au plus loin de l'ordonnée de la cible, à 10 Hz, à l'ordonnée de la cible. L'évolution de la fréquence du signal carré est linéaire. Cette fréquence évolue en temps réel suivant la distance à l'ordonnée de la cible.

³⁶ Un signal carré idéal alterne régulièrement et instantanément entre deux niveaux. Ici, il s'agit d'un signal tantôt égal à 1, tantôt égal à 0.

4) Feedbacks et gamification³⁷

Un tir se déroule à l'aide d'un opérateur assis à côté du participant dont les yeux sont masqués par les lunettes opaques. L'opérateur va appuyer sur le bouton vert (voir Figure 12) pour initialiser le tir : l'anneau vert se met alors au centre de son rectangle et l'anneau orange (la cible) se place aléatoirement dans le sien. Lorsque l'opérateur appuie sur le bouton vert, un son de rechargement d'arme est diffusé dans le casque du joueur. L'opérateur place ensuite, à l'aide du trackpad de l'ordinateur, le curseur du participant sur l'anneau vert. Dès que le participant est prêt, il appuie sur le clic gauche de la souris et la sonification démarre automatiquement. Il se déplace en gardant enfoncé le clic gauche. Lorsqu'il pense être sur la cible, il valide son tir en appuyant sur la barre espace. Un son de coup de feu est alors entendu, suivi d'un *feedback*³⁸ sonore indiquant s'il a touché ou non la cible. Si la cible est touchée, on entend un instrument de type cordes pincées jouant successivement un Do puis un Sol. Ces deux notes ont été choisies car elles forment un intervalle de quinte³⁹, intervalle le plus consonant après l'octave. Si la cible est ratée, on entend ce même instrument jouer un Fa#. Pour le tir suivant, l'opérateur appuie de nouveau sur le bouton vert et le processus se répète.

Pour évaluer la performance des deux méthodes et stimuler les participants, un système de score a été mis en place. Le score prend en compte trois paramètres :

- T : le temps de difficulté, calculé avec la Loi de Fitts (nous expliquerons cette loi dans le paragraphe suivant)
- t : le temps que met le joueur entre le moment où il clique sur la souris et où il valide son tir avec la barre espace.
- d : la distance finale, ou précision, après validation, entre le curseur du joueur et le centre de la cible (compris donc entre 0 et 816).

³⁷ La gamification consiste à transposer les techniques de motivation du jeu dans un domaine non ludique.

³⁸ Un *feedback* est un retour d'informations sur un événement causé ou non par le joueur et qui peut prendre différentes formes [Schultz, 2020].

³⁹ En acoustique, l'intervalle entre deux sons est le rapport de leur fréquence.

La loi de Fitts est une loi utilisée en ergonomie et en interaction Homme-Machine. Elle modélise le mouvement humain et indique la difficulté d'une tâche. La loi de Fitts est utilisée pour modéliser l'acte de pointer. Elle s'exprime de la manière suivante pour un mouvement suivant une unique dimension :

$$T = a + b \times \log_2\left(1 + \frac{D}{L}\right)$$

où

- T est le temps moyen pris pour effectuer le mouvement ;
- a et b sont des paramètres pouvant être déterminés empiriquement par régression linéaire ;
- D est la distance initiale séparant le point de départ du centre de la cible ;
- L est la largeur de la cible mesurée selon l'axe de mouvement.

Le loi de Fitts exprime donc le fait que le temps pour atteindre une cible n'est pas linéaire à la distance à laquelle se trouve cette cible et dépend de la taille de la cible. Dans notre application, ce temps est calculé à l'initialisation de chaque nouveau tir en fonction de la distance initiale à la cible. Pour faire simple, dans notre cas, il représente le temps que mettrait un joueur voyant l'interface pour atteindre la cible à une distance donnée.

Après calculs nous trouvons pour notre système que $T = 0,17 + 0,41 \times \log_2(1 + D)$, avec D en centimètres. Le paramètre L a disparu car le diamètre de la cible est de 1 cm.

Le calcul du score S est le suivant :

$$S = \frac{T}{t+d} \times 10^4$$

Comme t est strictement positif, nous ne risquons pas de diviser par 0.

Avec ce système de score, plus la distance finale est petite (grande précision) et plus le temps du tir est petit, plus le score est élevé. Pour exemple, un tir de difficulté $T = 1,33$ secondes réalisé en $t = 10,44$ secondes avec une précision de $d = 3$ rapporte un score d'environ 990. Un tir de même difficulté et de même précision réalisé en $t = 5$ secondes rapporte quant à lui un score de 1663.

5) Protocole de test

Notre but est de comparer les deux méthodes, afin de déterminer laquelle est la plus performante et savoir quels sont les défauts et les qualités de chacune.

32 participants ont passé les tests. Tous les participants étaient des novices vis-à-vis du système proposé. L'âge des participants va de 16 ans à 58 ans pour une moyenne d'environ 29 ans. La médiane des âges est 23. À la fin du test, les participants indiquent leur profession pour déterminer s'ils entrent ou non dans la catégorie des "experts" en audio⁴⁰. Parmi les 32 participants, on compte 18 experts et 14 non experts.

Le test se déroule dans une salle silencieuse. L'ordinateur utilisé est un MacBook Pro (15 pouces, 2018) sur lequel est branchée une souris HP. Le casque est un Audio-Technica ATH-M50x.

Le sujet du mémoire est brièvement présenté au participant. Les deux méthodes sont succinctement présentées une première fois. La méthode Radar est présentée en analogie à la sonification des radars de recul des voitures. Pour expliquer les consignes, les participants ont accès à la partie visuelle de l'interface. Le participant commence ensuite par une des deux sonifications. L'ordre de présentation des méthodes change pour le participant suivant pour ne pas influencer les résultats. Les deux méthodes sont expliquées de la même manière qu'au début des sections 3) a) et 3) b) de la partie III. Le participant peut tester une première fois la méthode en voyant l'interface graphique. On émet l'hypothèse que cette phase de compréhension visuelle pour le joueur voyant peut être compensée pour le joueur

⁴⁰ Ici, ont été considérés comme experts en audio, les étudiants en techniques audio, les enseignants de ces matières et les ingénieurs du son.

aveugle par une plus longue phase d'explication et d'entraînement. Le participant est ensuite équipé de lunettes opaques. Il a entre 2 et 3 essais pour s'entraîner à l'aveugle avant de réaliser 6 tirs dont les données seront enregistrées.

Le système de score est introduit. Il permet de stimuler le joueur et de l'inciter à essayer d'être rapide et précis comme dans un FPS. Le participant ne sait pas exactement comment est calculé le score mais il sait que sa précision et son temps sont valorisés. Après chaque tir, l'opérateur informe le participant de son score et de sa distance à la cible.



Figure 16 : Participante passant le test.

Pour la méthode Fréquence, la fréquence au centre de la cible (fréquence maximale) n'est pas explicitée aux participants. En effet, nous pouvons émettre

l'hypothèse que la connaissance du 1000 Hz pour les experts serait un avantage considérable.

Pour chaque tir, lorsque le participant valide son tir avec la barre espace, les données nécessaires à l'analyse des résultats sont envoyées automatiquement dans une feuille de calcul depuis Max : numéro du participant, numéro du tir, statut du tir (touché/raté), précision, temps, difficulté du tir et enfin le score effectué. Il y a une feuille de calcul pour chaque méthode⁴¹. Compte tenu du nombre élevé de tirs enregistrés, les données concernant la difficulté des tirs (distance initiale à la cible) seront peu intéressantes à analyser.

Après avoir effectué les 6 tirs pour les deux méthodes, le participant est invité à répondre aux questions suivantes pour chaque méthode :

- Sur une échelle de 1 à 10, 10 étant "très intuitive" et 1 étant "très peu intuitive", comment notez-vous la méthode Fréquence/Radar ?
- Sur une échelle de 1 à 10, 10 étant "très désagréables" et 1 étant "peu dérangeants" comment notez-vous les sons que vous avez entendus dans la méthode Fréquence/Radar ?

Ces questions permettront de déterminer les qualités et les défauts de chacune des méthodes.

La session de tests dure entre 15 et 20 minutes tout compris par participant. Des échanges informels où le participant donne de plus amples retours sur son expérience peuvent se dérouler à l'issue des tests. L'approche est donc majoritairement quantitative mais aussi qualitative.

⁴¹ Un extrait des données récoltées sur la feuille de calcul de la méthode Fréquence est disponible en annexe.

PARTIE IV : Résultats

Le tableau 2 rassemble les résultats de l'ensemble des 192 tirs enregistrés pour la méthode Fréquence. Le tableau 3 traite les résultats des 192 tirs enregistrés pour la méthode Radar. Les valeurs ont été arrondies à deux chiffres après la virgule.

	Touchée ? (%)	Precision moy.	Temps moy. (sec)	Score moy.	Intuitive	Désagréable
Stats Total	81.25	13.45	12.63	761.1	7.03	3.97
Stats Experts	97.22	4.56	11.3	961.8	6.89	4.06
Stats NonExperts	60.71	24.89	13.83	503.04	7.21	3.86
Stats < 35 ans	85.33	8.56	12.17	808.38	7.24	4
Stats >= 35 ans	66.67	30.91	14.27	592.22	6.29	3.86
Stats >= 35 ans Ex	94.44	6.67	9.73	877.34	6.67	3.67

Tableau 2 : Résultats de la stratégie Fréquence

	Touchée ? (%)	Precision moy.	Temps moy. (sec)	Score moy.	Intuitive	Désagréable
Stats Total	75	14.86	12.94	699.29	6.64	4.13
Stats Experts	86.11	8.73	8.83	870.43	6.28	4.72
Stats NonExperts	60.71	22.74	17	479.26	7.11	3.36
Stats < 35 ans	81.33	11.41	12.42	751.95	6.74	4.28
Stats >= 35 ans	52.38	27.2	14.82	511.23	6.29	3.57
Stats >= 35 ans Ex	72.22	13.11	7.5	721.88	6.33	5

Tableau 3 : Résultats de la stratégie Radar

- Comparaison quantitative des deux méthodes

Tout d'abord, il est intéressant de noter que les écarts types⁴² des valeurs recueillies (non présentés dans les tableaux 1 et 2) sont très importants pour les deux méthodes. Par exemple l'écart type du pourcentage de réussite est d'environ 30 % pour la méthode Fréquence et l'écart type de la précision pour cette même méthode est d'environ 22. Cela indique une grande disparité de résultats entre les participants pour les deux méthodes.

⁴² En mathématique, l'écart type est une mesure de la dispersion, autour de la moyenne, des valeurs d'un échantillon statistique.

Les résultats montrent que la méthode Fréquence permet de toucher plus souvent la cible (81 % de réussite contre 75 % pour la méthode Radar). Elle induit aussi des tirs légèrement plus précis pour un temps moyen presque similaire à la méthode Radar. Elle permet aussi d'obtenir en moyenne des scores plus élevés que la méthode Radar. Le meilleur score, qui est de 2828, a été obtenu avec Fréquence par le participant 29 avec un tir de difficulté $T=1,34$ d'une précision de $d=1,41$ en $t=4,7$ secondes.

Si les écarts ne sont pas très significatifs, nous pouvons aussi noter que la stratégie Fréquence est notée comme plus intuitive et moins désagréable que la méthode Radar. La méthode Radar a parfois été décrite comme "stressante" par les participants. Ce qui était, suivant le participant interrogé, tantôt un défaut, tantôt une qualité.

- Influence de l'âge et de l'expertise

Les personnes de plus de 35 ans semblent obtenir, pour les 2 méthodes, de moins bons résultats que les plus jeunes. Pourtant aucune relation de dépendance entre les variables âge et score n'a été établie à l'aide du calcul du khi-deux⁴³. Cela s'explique sûrement par la présence d'experts en audio parmi les plus de 35 ans. En effet, une relation de dépendance a été établie statistiquement entre le statut d'expert et le score moyen obtenu ($\chi^2 = 8,13$ pour la méthode Fréquence). Être un expert permet d'obtenir des résultats au-dessus de la moyenne.

- Retours qualitatifs

Globalement, l'axe horizontal (latéralisation gauche/droite) est très bien compris par les participants. L'analyse visuelle de leur trajectoire pendant le jeu montre qu'ils résolvent le plus souvent cet axe en premier. Deux participants (8 et 30) ont cependant été perturbés par le fonctionnement de la spatialisation. Ils ont indiqué qu'ils auraient inversé le fonctionnement : "si le son est à droite, j'ai envie de ramener le son à gauche, donc je vais vers la gauche". Cela correspond au

⁴³ Le test du khi-deux ou khi-carré est un test statistique qui permet notamment de tester l'indépendance entre deux variables.

fonctionnement du RAD que nous avons décidé d'inverser pour proposer une version centrée sur la cible.

Il a été observé que 95 % des participants trouvaient la cible en se déplaçant axe par axe. Le participant 5, qui a obtenu le meilleur score pour la méthode Radar, a réussi à intégrer les différents paramètres et à se déplacer en diagonale, c'est-à-dire qu'il prenait en compte simultanément la latéralisation et la nature des bips, afin d'emprunter le chemin le plus court vers la cible. Ce participant a préféré la méthode Radar car il avait "envie d'avoir ce moment où les 2 types de bips se confondent et d'obtenir ainsi une vraie référence".

Dans les entretiens post-test, la méthode Radar a souvent été décrite comme moins intuitive mais la plupart des participants pensent qu'elle peut donner de meilleurs résultats si on est plus entraîné. Le participant 28 a exprimé, en opposition aux autres, que la méthode Radar est "plus intuitive car plus stressante comme dans une voiture. On sent plus la proximité du danger".

On peut noter que le participant 10 a appris la fréquence de référence de 1000 Hz pendant les entraînements et a ainsi réussi à obtenir 6 tirs avec une précision de 0 (pile au centre de la cible). Il a mis tout de même en moyenne 24 secondes par tir pour obtenir ces résultats, ce qui est deux fois supérieur à la moyenne.

L'expérience a globalement été appréciée par les participants. Si le participant 7 a décrit l'expérience comme "étrange", le participant 22 a exprimé qu'on "aurait envie de passer plus de temps dessus pour s'améliorer" et le participant 18 a même décrit le mini-jeu comme "addictif".

PARTIE V : Discussion

Nos deux méthodes permettent de répondre à la question de recherche. En effet, on peut affirmer que les deux méthodes sont efficaces pour trouver une cible à l'aveugle, avec un meilleur taux de réussite pour la méthode Fréquence.

La domination du jeu par les experts suggère un fort impact de l'entraînement auditif et de la compréhension des paramètres du son. Un joueur novice pourrait donc avoir de meilleures performances avec un temps plus long de compréhension du système. En effet, contrairement à l'étude de Ziemer où l'entraînement durait 30 min, on peut noter qu'ici il dure moins de 5 minutes pour chaque sonification. Les participants ont aussi mis, en moyenne, deux fois moins de temps que dans l'étude de Ziemer pour trouver la cible. Cependant dans l'expérience de Ziemer l'espace où se trouvait la cible était plus grand et la tâche était donc plus difficile.

Pourtant évoqué au cours de l'étude sur les sons d'alarmes, le paramètre de niveau sonore n'a pas été utilisé, faute de temps. C'est une remarque qui a été faite à deux reprises par les participants : le niveau sonore est le même que l'on soit très proche ou très loin de la cible. Nos méthodes pourraient bénéficier d'une augmentation du niveau sonore à mesure que l'on se rapproche de la cible.

Les méthodes ont été testées sur une population de voyants avec les yeux bandés. Pour confirmer le fonctionnement des stratégies nous devons par la suite les tester auprès de personnes présentant des déficiences visuelles.

Le questionnaire aurait pu être plus détaillé. Par exemple, une question supplémentaire sur la méthode que le participant a préféré aurait pu être ajoutée.

CONCLUSION

L'accès à l'information, à l'éducation et à la culture sont des droits humains fondamentaux. Pourtant les jeux vidéo grand public sont, à l'heure actuelle, trop peu accessibles aux personnes déficientes visuelles. Un ajout significatif d'audiodescription et une inspiration des mécaniques des jeux audio sont nécessaires. Un des défis d'un jeu qui s'appuierait sur l'audio est aussi de ne pas surcharger l'auditeur en sons, ce qui pourrait causer de la confusion.

L'étude de travaux autour de la sonification de la visée nous a amenés à développer deux sonifications sur cinq propositions. Ces deux méthodes permettent de répondre à la question de recherche sur la visée dans un FPS. Avec nos systèmes de sonification, les premiers niveaux d'un jeu mobile comme Sniper 3D (2020) seraient facilement accessibles à un joueur DV. Le patch Max créé peut aussi servir de base pour implémenter les sonifications proposées restantes afin d'effectuer une comparaison plus poussée de plusieurs sonifications à grande échelle.

La limitation principale de ce travail est qu'ici, nous nous sommes intéressés à la sonification de la visée pour une seule cible qui apparaît sans difficulté de jeu. Que se passe-t-il si plusieurs ennemis apparaissent en même temps ? De plus, nous avons testé les sonifications avec une configuration clavier/souris, qu'en est-il avec une manette de console classique ? Il reste également à tester nos méthodes dans un vrai jeu en 3D, en liant le patch Max en OSC⁴⁴ avec le logiciel Unity⁴⁵ par exemple.

Pour améliorer l'expérience du joueur, nous pouvons aussi penser à ajouter du son binaural pour donner des indices avant la visée sur la position de l'ennemi. Le jeu pourrait aussi profiter de l'ajout de retour haptique pour compléter le son [Westin, 2011]. En effet, Morelli et al. [2010] ont montré qu'il était plus agréable et

⁴⁴ Open Sound Control (OSC) : Format de transmission de données entre ordinateurs, synthétiseurs, robots ou tout autre matériel ou logiciel compatible, conçu pour le contrôle en temps réel.

⁴⁵ Moteur de jeu en temps réel utilisé pour développer des jeux vidéo.

plus facile d'obtenir des scores élevés avec une approche dite "multimodale" (haptique, tactile et sonore).

Il est intéressant de noter que les recherches en accessibilité ne semblent pas suivre assez rapidement les avancés technologiques. Si la VR est en plein développement, très peu de joueurs DV semblent l'avoir déjà pratiquée.

Au-delà de la volonté affichée par Smith [2018] de rendre les jeux accessibles de manière équivalente, on pourrait imaginer un FPS multijoueur coopératif où le joueur DV n'aurait pas le même rôle que le joueur voyant. Par exemple, il pourrait jouer le rôle d'un sniper et aurait ainsi plus de temps pour viser tout en participant activement à l'avancée du jeu. On parle alors, selon Gonçalves et al. [2020], de gameplay asymétrique. Une solution vers des jeux plus inclusifs ?

Bibliographie

Études

[Andrade, 2019] Andrade Ronny et al., Playing Blind: Revealing the World of Gamers with Visual Impairment, in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Glasgow, UK. Paper No. 116, 2019, 14p.

[Aures, 1985] AURES W., Berechnungsverfahren für den sensorischen wohlklang beliebiger schallsignale (A model for calculating the sensory euphony of various sounds), *Acustica*, vol. 59, no. 2, pp. 130–141, 1985, 12p.

[Coleman, 2016] COLEMAN J., Classroom Guitar and Students with Visual Impairments : A Positive Approach to Music Learning and Artistry, *Journal of Visual Impairment & Blindness* 110, 1, 63–68, 2016, 6p.

[Dubus, 2013] DUBUS G. et BRESIN R., Sonification of physical quantities throughout history: a meta-study of previous mapping strategies, *Proceedings of the 17th International Conference on Auditory Display (ICAD 2011)*, Budapest, Hongrie, 2011, 8p.

[Edworthy, 1991] EDWORTHY J. et al., Improving auditory warning design : relationship between warning sound parameters and perceived urgency, *Human Factors* 33, 205–231, 1991.

[Ferguson, 2006] FERGUSON S. et al., Using psychoacoustical models for information sonification, in *Proc. 12th International Conference on Auditory Display (ICAD 2006)*, London, 2006, 8p. <http://hdl.handle.net/1853/50694>

[Fitch, 1994] FITCH, W. T. et KRAMER, G., Sonifying the Body Electric: Superiority of an Auditory over a Visual Display in a Complex, Multivariate System, in G. Kramer (Ed.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 307-326, 1994, 20p.

[Fridberg, 2004] FRIDBERG J. et al., Audio games : New Perspectives on game audio, in *Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI international conference on advances in computer entertainment technology*, (pp. 148-154), Singapore, 2004

[Gonçalves, 2020] GONÇALVES David et al. 2020. Playing With Others: Depicting Multiplayer Gaming Experiences of People With Visual Impairments, In *ASSETS '20: ACM Conference on Computers Accessibility*, October 26–28, 2020, Athens, Greece, ACM, New York, NY, USA, 2020, 20p. <https://doi.org/10.1145/1122445.1122456>

[Graham, 1999] GRAHAM R., Use of auditory icons as emergency warnings : evaluation within a vehicle collision avoidance application, *Ergonomics* 42, 1233–1248, 1999.

[Grimshaw, 2007] GRIMSHAW M., The acoustic ecology of the First-Person Shooter, 2007, 15-30, 382p.

[Hermann, 2004] HERMANN T. & HUNT, A. The Discipline of Interactive Sonification, *Proceedings of the Int. Workshop on Interactive Sonification*, Bielefeld, Germany, 2004, 9p. <http://www.interactive-sonification.org>

[Ho, 2009] HO C., and SPENCE C., Using peripersonal warning signals to orient a driver's gaze, *Human Factors*, 51, 539–556, 2009.

[Hunt, 2011] HUNT A. et HERMANN T., Interactive Sonification, in *The Sonification Handbook*, Eds. Logos Publishing House, 273-298, 2011, 26p.

[Kapperman, 2017] KAPPERMAN G., An Assessment of the Tinder Mobile Dating Application for Individuals Who Are Visually Impaired, *Journal of Visual Impairment & Blindness* 111, 4, 369–374, 2017.

[Kirke, 2018] KIRKE A., When the Soundtrack Is the Game: From AudioGames to Gaming the Music, In *Emotion in Video Game Soundtracking*, Duncan Williams and Newton Lee (Eds.), Springer, Cham, CH, 65–83, 2018, 20p.

[Kramer et al., 1999] K. Kramer, B. Walker, T. Bonebright, P. Cook, J. Flowers, N. Miner, J. Neuhoff, *Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda*, Faculty Publications, Department of Psychology, 1999, 33p.

[Kuwano, 2007] KUWANO S. et al., Subjective impression of auditory danger signals in different countries, *Acoustical Science and Technology* 28(5), 360–362, 2007, 3p.
<https://doi.org/10.1250/ast.28.360>

[Loveless, 1975] LOVELESS N. E. et SANFORD A. J., The impact of warning signal intensity on reaction time and components of the contingent negative variation, *Biological Psychology* 2, 217–226, 1975, 12p.

[Mangiron, 2016] MANGIRON C. et ZHANG X., Game Accessibility for the Blind: Current Overview and the Potential Application of Audio Description as the Way Forward. In: Matamala A., Orero P. (eds) *Researching Audio Description*. Palgrave Studies in Translating and Interpreting, Palgrave Macmillan, London, 75-95, 21p.
https://doi.org/10.1057/978-1-137-56917-2_5

[Morelli, 2010], MORELLI T. et al., VI-Tennis : a vibrotactile/audio exergame for players who are visually impaired. in *FDG '10: Fifth International Conference on the Foundations of Digital Games 2010*, 147-154, 2010, 8p.

[Nakatani, 2009] NAKATANI M. et al., A Study of Auditory Warning Signals for the Design Guidelines of Man-Machine Interfaces, 2009, 9p.

[Parker, 2008] PARKER J. et al., Audio Interaction in Computer Mediated Games, in *International Journal of Computer Games Technology*, 2008, 9p.

[Parseihian, 2016] PARSEIHIAN Gaëtan et al., Comparison and Evaluation of Sonification Strategies for Guidance Tasks, *IEEE Transactions on Multimedia*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, 29p.

[Patterson, 1982], PATTERSON R. D., Guidelines for the auditory warning systems on civil aircraft, London : Civil Aviation Authority, paper 82017, 1982, 97p.

[Sanchez, 2007] SANCHEZ J. et ELIAS M., Guidelines for Designing Mobility and Orientation Software for Blind Children, in INTERACT 2007, 375-388, 2007, 14p.

[Simpson, 1980] SIMPSON, C. A., et WILLIAMS, D. H., Response time effects of alerting tone and semantic context for synthesized voice cockpit warnings, *Human Factors* 22, 319–330, 1980, 11p.

[Smith, 2018] SMITH Brian A. et NAYAR Shree K., The RAD: Making Racing Games Equivalently Accessible to People Who Are Blind, in *Proceedings of 2018 CHI Conference on Human Factors on Computing*, Montréal, 2018, 12p.

[Stockman, 2005] STOCKMAN Tony, Interactive Sonification of spreadsheets, in *Proceedings of ICAD 05-Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display*, Limerick, Ireland, 2005, 6p.

[Westin, 2011] WESTIN T. et al., Advances in Game Accessibility from 2005 to 2010, In Stephanidis C. (eds) *Universal Access in Human-Computer Interaction, Users Diversity, UAHCI 2011*, Lecture Notes in Computer Science, vol 6766. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, 11p.

[Wheale, 1982] WHEALE J., Decrements in performance on a primary task associated with the reaction to voice warning messages, in *British Journal of Audiology* 16, 265–272, 1982, 8p. <https://doi.org/10.3109/03005368209081471>

[Wilson, 2007] WILSON B. et al. Swan: System for wearable audio navigation, in *Proceedings of the 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable*

Computers, Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2007, pp. 1–8.
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1524303.1524851>

[Yuan, 2008] YUAN B., Blind Hero: Enabling Guitar Hero for the Visually Impaired, *in Proceedings of the 10th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Halifax, Nova Scotia, Canada, 2008, 9p.

[Yuan, 2011] Yuan B. et al., Game accessibility : a survey, *Universal Access in the Information Society* 10, 1 (2011), 81–100, 2011, 20p.

[Ziemer, 2018] ZIEMER T., & SCHULTHEIS H., A Psychoacoustic Auditory Display for Navigation, *24th International Conference on Auditory Displays (ICAD2018)*, Houghton, MI, Juin 2018, 9p.

[Ziemer, 2019] ZIEMER Tim & SCHULTHEIS Holger, Psychoacoustical Signal Processing for Three-Dimensional Sonification, *in 25th International Conference on Auditory Display (ICAD2019)*, Newcastle, Juin 2019, 8p.

Littérature

[Hermann, 2011] HERMANN T. et al., *The Sonification Handbook*, Eds. Logos Publishing House, 2011, 586p. <https://sonification.de/handbook/chapters/>

[Fastl, 1999] FASTL H. et ZWICKER E., *Psychoacoustics : Facts and Models*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999,
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4>

Mémoires

[Raigneau, 2018] RAIGNEAU Valère, *Représentation de protéines par la sonification d'objets 3D*, Mémoire de l'ENS Louis-Lumière, 2018, 101p.

[Schultz, 2020] SCHULTZ Clothilde, *Sons et silence dans le jeu vidéo*, Mémoire de l'ENS Louis-Lumière, 2020, 110p.

Rapports

[Mader, 2019] MADER Stéphanie et al, Rapport d'activité - Projet DIM-RFSI - Chien Guide Virtuel, 2019, 20p.

Ministère de la Santé et de la Solidarité, Définition de l'accessibilité, Une démarche interministérielle, 2006, 66p.

Organisation Mondiale de la Santé, Changements dans la définition de la cécité, 5p.

Sites web

Fédération des aveugles de France : <https://aveuglesdefrance.org/>

Can I Play That ? : <https://caniplaythat.com/>

IBSA, International Blind Sports Federation : <https://ibsasport.org/>

Annexes

joueur	numero	statut	precision	temps	difficulte	score	Expert en Audio ?	Age	Intuitif de 1 à 10	Désagréable de 1 à 10
1	1	1 rate	34.06	26.29	1.53	253.5211268	non	25	6	7
1	2	2 rate	19.42	10.67	0.74	245.92888	non	25		
1	3	3 rate	18.03	11.83	1.62	542.5318151	non	25		
1	4	4 rate	15.65	11.8	0.96	349.726776	non	25		
1	5	5 touche	3.61	8.62	1.23	1005.72363	non	25		
1	6	6 touche	14.76	10.03	1.13	455.8289633	non	25		
2	1	1 rate	89.27	9.62	1.21	122.3581758	non	16	9	5
2	2	2 rate	38.59	7.51	1.73	375.2711497	non	16		
2	3	3 rate	36.12	8.78	1.07	238.3073497	non	16		
2	4	4 rate	19	10.25	1.65	564.1025641	non	16		
2	5	5 touche	12	20.32	0.77	238.2425743	non	16		
2	6	6 rate	16.64	15.78	0.96	296.1135102	non	16		
3	1	1 rate	36.06	24.19	0.48	79.66804979	non	16	7	1
3	2	2 touche	14.42	22.61	1.05	283.5538752	non	16		
3	3	3 rate	27.51	24.92	1.33	253.6715621	non	16		
3	4	4 rate	26.68	18.93	0.74	162.2451217	non	16		
3	5	5 rate	20.25	22.13	1.64	386.9749882	non	16		
3	6	6 touche	14.42	22.61	1.05	283.5538752	non	16		
4	1	1 touche	10	6.21	1.46	900.6785935	oui	29	9	3
4	2	2 touche	1	4.82	1.3	2233.676976	oui	29		
4	3	3 touche	3.61	5.73	1.28	1370.449679	oui	29		
4	4	4 touche	2.83	4.82	0.44	575.1633987	oui	29		
4	5	5 touche	0	7.3	1.59	2178.082192	oui	29		
4	6	6 touche	2.24	4.79	0.53	753.918065	oui	29		
5	1	1 touche	2.24	4.75	1.43	2045.779685	oui	22	6	5
5	2	2 touche	3.16	5.99	1.18	1289.617486	oui	22		
5	3	3 touche	9.43	5.17	1.07	732.8767123	oui	22		
5	4	4 touche	5.1	7.68	1.2	938.9671362	oui	22		
5	5	5 touche	3	7.32	1.27	1230.620155	oui	22		
5	6	6 touche	3.61	11.17	1.37	926.9282815	oui	22		

Annexe 1 : Premières données brutes récoltées pour la méthode Fréquence.

Annexe 2 : Entretien avec Anthony Chalençon

Lucas Artis : J'ai vu plusieurs documentaires et vidéos sur vous et j'aimerais revenir sur votre parcours. Qu'est-ce qui vous a amené à faire du biathlon paralympique?

Anthony Chalençon : Je suis né dans une station de ski et au début je faisais du ski alpin. J'avais 2 ans quand j'ai commencé le ski. Je voyais encore. J'ai perdu la vue à 3 ans. J'ai eu de la chance que mes parents me laissent tout le temps sur les skis. Ça c'était cool. Après du coup j'ai commencé la compétition en alpin jusqu'en 2011. Faute de résultats qui me satisfaisaient, j'ai décidé d'arrêter l'alpin. Et au final vu que ça me manquait un peu, j'ai essayé le ski de fond pour voir et c'est parti comme ça. Quand tu arrives en ski de fond, tu peux faire du biathlon donc j'ai essayé le biathlon. Et voilà ça c'est fait comme ça.

L.A. : Il y a beaucoup de biathlètes malvoyants en France ?

A.C. : Non, on était 3 [français] aux Jeux de Pyeongchang. Les deux autres ont arrêté. Il y avait un ancien de 35 ans qui avait fait un peu le tour, et il y avait un tout jeune, qui avait à peu près 20 ans, et lui a décidé de se consacrer à ses études donc il a arrêté aussi. Donc en catégorie non-voyants en France, je suis le dernier qui fait vraiment de la compétition. Après ça existe un petit peu en loisir. Si tu vas au championnat de France, il y a des anciens qui en font. Mais en international il n'y a que moi en France.

L.A. : Je me suis intéressé aux systèmes que tu utilises. Est ce que tu peux me décrire comment fonctionnent ces systèmes, depuis combien de temps tu les utilises ?

A.C. : J'utilise le même système depuis que j'ai commencé, il n'y a pas eu d'évolution. Au début, il y avait des problèmes avec le soleil qui interférait un peu avec le laser. Et sur les nouveaux qu'ils ont refait, il n'y a plus ce problème. Moi j'ai une vieille carabine que j'avais au début et une nouvelle.

Comment ça marche ? C'est une carabine laser. Le générateur d'électricité est dans la cible. Il y a un grand câble qui part de la cible et qui est relié à un petit écran. Sur ce petit écran sont branchés la cible, la carabine et un casque audio. Tout ça est posé à côté de nous, à notre droite sur le tapis du biathlon. Quand tu arrives pour tirer, tu mets le casque sur la tête et au début le son est en fréquence (il n'est pas continu, ça fait bip-bip-bip) et plus tu t'approches de la cible plus les sons se rapprochent jusqu'à devenir continus. Quand le son est continu, ça veut dire que tu es à côté de la cible, mais si tu tires, tu n'es pas dedans. Et donc après il faut chercher le plus aigu possible. Tu as une petite fenêtre où là c'est la cible, et là tu peux tirer. Si tu te déplaces horizontalement, le son devient de plus en plus aigu, plus tu es au milieu. Après quand tu as passé le milieu, ça devient plus grave. Verticalement c'est exactement pareil. Si tu poses la carabine sur un appui et que tu la fais bouger tout doucement, tu entends vraiment la différence de son.

L.A : Donc si tu es à droite ou à gauche, il n'y a pas de différence ?

A.C. : Voilà c'est ça, tu n'as pas vraiment d'informations pour savoir si tu es au dessus, à droite, à gauche. C'est à toi de chercher pour arriver à te repérer là-dedans, t'arrêter sur la cible et après faire ton tir.

L.A : Et c'est Ecoaims le système c'est ça ? E-BSS ?

A.C. : Oui c'est ça. E-BSS c'est peut-être le nom du modèle ?

L.A : Oui je crois. C'est ce que j'ai trouvé.

A.C. : Oui c'est possible (rires).

L.A : J'ai vu des vidéos avec des biathlètes voyants qui testaient le système et qui avaient vraiment du mal, donc je voulais savoir combien de temps ça t'avait pris pour te familiariser avec l'objet et combien de temps il fallait en moyenne pour s'entraîner ?

A.C. : Je pense qu'au bout de 10-15 séances tu commences à vraiment bien capter le son et tu arrives régulièrement, au repos, à bien mettre des balles. Par contre à l'effort c'est beaucoup plus dur. Ça bouge beaucoup et il faut vraiment être précis sur le son.

L.A : C'est dans ce cas où vous utilisez des techniques pour ralentir le cœur et la respiration ?

A.C. : Ouais, c'est ça.

L.A : Donc toi tu l'as pris en main assez vite finalement ?

A.C. : J'ai commencé fin 2011, et ma première coupe du monde je l'ai faite en 2014. Mes premiers tirs en coupe du monde, j'ai fait des 18/20, donc des tirs corrects.

L.A : Il y a des notes ?

A.C. : En fait selon la course tu as par exemple 10 cibles à abattre et tu as une note selon ce que tu as abattu. Les cibles se trouvent à 10 mètres. Et la cible en coupe du monde fait 21 mm de diamètre.

LA : Et la cible n'est jamais en mouvement ?

A.C. : Ouais, la cible est fixe.

LA : J'ai vu qu'il y avait aussi le tir en intérieur, tu as déjà essayé ?

A.C. : Non.

LA : J'ai trouvé des informations assez contradictoires là-dessus, le son serait saccadé au milieu, mais j'ai trouvé ça bizarre car c'est l'inverse de ce que tu me dis, c'est peut être une fausse information que j'ai trouvé ?

A.C. : Je ne sais pas. Les informations que j'ai eu sur le sport c'est que c'est à peu près le même système que nous, mais je ne sais pas si il y a des personnes qui pratiquent ça en France. On a eu un peu de contact avec le tir sportif. On est allé faire un ou deux stages dans leur base d'entraînement à Paris, mais je n'ai pas vu de non-voyants. J'ai vu des tireurs en situation de handicap mais je n'ai pas vu de non-voyants. Donc, est ce que ça se pratique en France, je ne sais pas, mais j'avais l'impression que c'était un peu le même système que nous, mais pas sûr.

L.A : En dehors des entraînements, tu as des moyens de t'entraîner chez toi ?

A.C. : J'habite dans une maison avec un jardin, donc je peux mettre mon tapis avec la cible à 10 mètres. Vu qu'on ne tire pas de balles mais que c'est au laser c'est l'avantage : je peux m'entraîner partout. Alors qu'un valide qui tire à 50 mètres, il a intérêt à se mettre dans un endroit sécurisé. Moi je peux y passer du temps, et me mettre ce son dans l'oreille. Sur la coupe du monde, ils avaient plusieurs types de casques audio et ça changeait un peu le son. Cette année ce sont quasiment tous les mêmes sur la carabine, et c'est vachement mieux. Avant c'était très perturbant. Les vieux casques changeaient un petit peu le son, c'était un peu chiant.

L.A. : Maintenant c'est standardisé ?

A.C. : Ça a bougé oui, c'est plus cool.

L.A. : Est-ce qu'on peut essayer le système quelque part ou il faut l'acheter ? C'est cher ? Et est ce qu'il faut être obligatoirement professionnel pour le tester ?

A.C. : Oui alors ça coûte cher. Ça coûte à peu près 5000 euros. Pour l'essayer, il y a parfois des comités. Je sais pas si tu connais le fonctionnement du sport mais il y a des comités par département qui organisent des événements, gèrent les clubs. C'est leur rôle. Souvent ça arrive qu'ils aient des carabines donc ils font des événements de sensibilisation. Moi aussi j'en fais parfois. Mettre deux carabines à disposition et expliquer aux gens qui voulaient venir tirer, leur montrer la cible. Ça arrive sur des

événements qu'on les sorte et qu'on les fasse essayer à tout le monde. Mais on est pas beaucoup à le faire, donc il faut tomber au bon endroit au bon moment.

L.A : Comment trouves-tu le dispositif actuel, est-ce que tu verrais des améliorations ?

A.C. : Bonne question. Alors il y a toujours un problème sur notre fonctionnement à nous : ce sont des carabines standards, donc qui ne sont pas forcément à notre taille. En coupe du monde ils sont obligés d'avoir un matériel standard pour tout le monde, et que l'on tire avec leurs carabines et pas les nôtres. Sinon il pourrait y avoir des tricheries. Mais du coup elles ne sont pas à notre taille. Ça c'est sur l'organisation. Après sur le matériel en lui-même, je trouve que ça marche très bien. Peut-être que si on avait une information pour savoir si c'est haut, bas, droite ou gauche, ce serait bien mais ce n'est pas forcément évident à mettre en place.

L.A : Et il faudrait ré-apprendre aussi.

A.C. : Oui oui c'est ça.

L.A. : J'ai vu sur des vidéos que tu as des guides qui t'aident aussi, c'est quoi leur rôle exactement ?

A.C. : C'est surtout sur le ski. Ils sont à environ 3 ou 4 mètres devant moi. Ils ont un haut-parleur dans le dos qui est branché à un microphone. Le principe c'est qu'il parle tout le temps pour que ça me fasse un point sonore que je puisse suivre. Si il tourne à droite, je vais l'entendre tourner à droite. Il va dire "droite droite droite" mais je vais suivre aussi le couloir de son, dès que j'entends que je m'éloigne trop par rapport au haut parleur, je corrige ma trajectoire. C'est ça le gros rôle du guide. Après dans les descentes on a le droit de se tenir, il me donne son bâton. Ensuite sur le tir, il n'a pas de rôle : il me pose sur le tapis, il recule derrière une ligne, je fais mon tir et il me récupère.

L.A : J'ai des questions plus axées jeux vidéo, je ne sais pas si tu en pratiques ?

A.C. : Pas du tout. Je ne vais pas être d'un grand secours.

L.A. : Jeux de société ?

A.C. : Oui ça m'est arrivé de jouer un peu aux cartes, des trucs comme ça. Des cartes en braille. Sinon pas tant que ça, je suis pas un *gamer*.