



Projet de Fin d'Études : Mémorisation de l'environnement spatial

Floriane Payen

Encadrant-e-s : Christophe Hurter (ENAC), Arnaud Prouzeau (INRIA) et
Maria Jesus Lobo-Gunther (IGN)



2025-09-01

3A-SN-IMM - master PSMSC

Glossaire

Définitions

Terme	Sigle	Définition
<i>Augmented Reality</i>	AR	Environnement réel enrichi par des éléments virtuels : combine le réel et le virtuel en temps réel.
<i>Beacon</i>		Instruction sensorielle émanant de la destination.
<i>Between-subject</i>		Méthode expérimentale où les participants sont répartis en groupes et chaque groupe est exposé à une condition différente.
<i>Battement Par Minute</i>	BPM	Unité de mesure du tempo musical, indiquant le nombre de battements par minute.
<i>Extended Reality</i>	XR	Regroupe toutes les technologies immersives, comme la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR).
<i>Landmark</i>		Objet ou bâtiment qui se démarque de son voisinage par sa taille, sa couleur, etc. : sa visibilité.
<i>Motion sickness</i>		Mal des transports, souvent ressenti lors de l'utilisation de la réalité virtuelle.
<i>NavMesh</i>		Système de navigation dans Unity basé sur des maillages permettant de calculer des chemins navigables sur une surface définie (en évitant les obstacles).
<i>Time stretching</i>		Technique audio qui permet de changer la durée d'un son sans changer sa hauteur.
<i>Virtual Reality</i>	VR	Environnement 3D généré par ordinateur, interactif dans lequel une personne est immergée.
<i>Within-subject</i>		Méthode expérimentale où les mêmes participants sont exposés à toutes les conditions.

Questionnaires

Terme	Sigle	Définition
<i>NASA Task Load Index scale</i>	NASA-TLX scale	Auto-évaluation du niveau de charge mentale au moment où le questionnaire est rempli.

<i>Santa Barbara Sense Of Direction scale</i>	SBSOD scale	Auto-évaluation du niveau en orientation spatiale.
<i>User Experience Questionnaire Short version</i>	UEQ-S	Permet de mesurer l'expérience utilisateur de produit interactif.

Sigles

Terme	Sigle	
<i>Ecole Nationale de l'Aviation Civile</i>	ENAC	
<i>Global Positioning System</i>	GPS	
<i>Intelligence Artificielle</i>	IA	
<i>Large Language Model</i>	LLM	

Technologies

Terme	Sigle	Définition
<i>Google Text-to-Speech</i>	gTTS	Librairie Python permettant d'utiliser l'API Google Translate text-to-speech afin de convertir du texte en parole.
<i>OpenStreetMap</i>	OSM	Cartographie en ligne, open-source et collaborative.
<i>OSMnx</i>	OSMnx	Librairie Python pour travailler avec les données OpenStreetMap.
<i>Open Source Routing Machine</i>	OSRM	API open-source permettant de calculer des itinéraires à partir de données OpenStreetMap.

Table des matières

1. Introduction	7
1.1. Présentation du lieu de stage	7
1.2. Présentation du sujet initial	7
1.3. Plan du rapport	7
2. Étude bibliographique : Étude de l'influence des dispositifs de navigation sur la mémorisation de l'environnement spatial	8
2.1. Introduction	8
2.2. Les facteurs impactant la mémorisation spatiale	9
2.3. Aides à la navigation	12
2.4. Évaluations	17
2.5. Bilan	21
3. Formulation de la question de recherche	23
3.1. Objectifs	23
3.2. Design de l'expérience	23
3.3. Hypothèse	24
4. Mise en place de l'expérimentation	25
4.1. Création de l'environnement 3D	25
4.2. Création de la musique	31
4.3. Choix des routes	31
4.4. Évaluation de la mémorisation spatiale	34
4.5. Questionnaires	35
5. Expérimentation	37
5.1. Pilote	37
5.2. Participants	37
5.3. Protocole expérimental	39
5.4. Données sauvegardées	42
5.5. Expérience	42
6. Résultats	43
6.1. <i>Santa Barbara Sense Of Direction scale (SBSOD scale)</i>	43
6.2. Préférences utilisateurs	43
6.3. Stratégies de mémorisation	48
6.4. Comment définir l'erreur ?	49
6.5. Analyse de la mémorisation	50
6.6. NASA-TLX	51
6.7. Impact de la VR	52
6.8. Les analyses que nous aimerions faire	52
6.9. Limitations	54
7. Conclusion	55
Références	56
Annexes	60
A Choix de la ville 3D	60

B Amélioration de la ville 3D	62
B1 Les bâtiments	62
B2 Éléments décoratifs	63
B3 Routes	64
B4 Ciel	65
C Implémentation du GPS	65
D Exemple d'instructions	67
D1 Instructions précédant le parcours du chemin	67
D2 Instructions pendant le parcours du chemin	68
E Création des musiques	68
E1 Musique à écouter avant le trajet	68
E2 Musique à écouter pendant le trajet	69
F Choix des routes	71
G Questionnaires	71
G1 Questionnaire 1	71
G2 Questionnaire 2 : SBSOD	72
G3 Questionnaire 3 : NASA-TLX scale	73
G4 Questionnaire 4 : UEQ_S	74
G5 Questionnaire 5 : Parlées VS Chantées	75
G6 Questionnaire 6 : Subset de I-Group presence questionnaire et SSQ questionnaire	76
H Résultats	76
H1 Scores au <i>SBSOD scale</i>	76
H2 Réponses au <i>User Experience Questionnaire Short version (UEQ-S)</i>	77
H3 Erreurs des participants	78
H4 Réponses au questionnaire Parlées VS Chantées	83

Remerciements

Je remercie mes encadrant-e-s : Christophe HURTER, Arnaud PROUZEAU et Maria JESUS LOBO-GUNTHER pour leur encadrement et leurs conseils tout au long de ce stage.

Je remercie également Mario, doctorant rattaché à NUS (National University of Singapore), pour sa grande implication et sa précieuse aide dans la création des musiques, dans les préparatifs de l'expérience et dans l'analyse des résultats.

Je remercie aussi tous mes collègues à l'ENAC pour leur gentillesse et leur aide : Guillaume, Alexandre, Linda, Zakaria et Emilie.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont pris de leur temps pour participer à mon expérimentation et ainsi rendre l'aboutissement de ce stage possible.

1. Introduction

1.1. Présentation du lieu de stage

Ce stage s'est déroulé à l'*Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC)*, école d'ingénieurs toulousaine centrée sur la formation aux métiers de l'aviation tels que contrôleur aérien et pilote de ligne. Plus précisément, le stage a eu lieu au sein du laboratoire de recherche OPTIM, un des trois laboratoires de l'école. Ce laboratoire est spécialisé dans l'optimisation, en particulier appliquée à l'aéronautique. Il s'axe sur quatre thématiques principales : Intelligence Artificielle (IA), Mathématiques de l'Optimisation et Recherche Opérationnelle (MORO), Probabilités, Statistiques, Graphes (PSG), Systèmes Dynamiques (SysDyn) [1].

Cependant, le contenu du stage est très éloigné de l'aviation et des axes de recherche initiaux du laboratoire. Au cours de ce stage, j'ai été encadrée par Christophe Hurter (*ENAC*), Arnaud Prouzeau (INRIA) et Maria Jesus Lobo-Gunther (IGN).

1.2. Présentation du sujet initial

Le stage avait initialement deux objectifs. Le premier était de répliquer en *Extended Reality (XR)* les limites de la navigation GPS au niveau de la mémorisation et de la compréhension de l'environnement lorsque l'on parcourt une route. Le second objectif était d'améliorer la mémorisation et la compréhension de l'environnement spatial en intégrant des repères visuels en *XR*.

Après une première phase de recherche, l'étude bibliographique a conduit à une évolution progressive du sujet. Le sujet est ainsi devenu : Comment améliorer la mémorisation de l'environnement spatial lorsque l'on parcourt une route avec une aide à la navigation ? La piste de recherche qui nous a paru la plus novatrice et que nous avons voulu explorer est l'utilisation de la musique.

1.3. Plan du rapport

Le stage se déroule du 24 mars au 19 septembre 2025 et est structuré en quatre parties qui formeront l'architecture du rapport :

- une étude bibliographique afin de mieux cerner le sujet et de trouver une piste afin améliorer la mémorisation de l'environnement spatial
- la conception d'une expérience en *Virtual Reality (VR)* pour tester l'impact de cette piste
- la réalisation de l'expérience
- l'analyse des résultats

2. Étude bibliographique : Étude de l'influence des dispositifs de navigation sur la mémorisation de l'environnement spatial

Abstract

Reproduire un itinéraire précédemment suivi à l'aide d'un système de navigation peut s'avérer difficile. Il est donc essentiel de favoriser la mémorisation de l'environnement spatial lors des déplacements assistés.

Cette partie présente une étude bibliographique portant sur différentes approches existantes pour améliorer la mémorisation de l'environnement spatial dans le cadre de l'utilisation d'aides à la navigation. Au cours de ces dernières décennies, de nombreuses stratégies ont émergé dans la littérature visant à maximiser la mémorisation spatiale. Certaines reposent sur des modalités visuelles ou auditives, d'autres s'appuient sur des points d'intérêt appelés *landmarks*, d'autres utilisent simplement les noms de rues.

Enfin, cette partie aborde également les principaux défis à relever pour conduire une expérimentation afin de tester l'efficacité d'aides à la navigation sur la mémorisation spatiale.

2.1. Introduction

Au quotidien, toute personne est amenée à se déplacer : à se rendre d'un point A à un point B. Parfois dans des endroits connus, parfois dans des endroits qui sont entièrement inconnus. Depuis son invention, l'utilisation du *Global Positioning System (GPS)* n'a fait que grandir au sein de la population. Son utilisation est très pratique dans de nombreuses situations, comme l'étude réalisée par [2] le montre : que ce soit pour connaître la localisation des bouchons ou simplement trouver un itinéraire (de manière simple, et efficace). Cependant, des études ont montré, au fil des années, que l'utilisation de celui-ci réduisait nos capacités de mémorisation de notre environnement spatial à court [3] comme à long terme [4].

Comme expliqué dans [5], les conducteurs de taxis londoniens doivent, dans le cadre de leur formation, apprendre toutes les routes de Londres. Ils ont donc une excellente connaissance de leur environnement spatial. Cependant, ces personnes consacrent plusieurs années à étudier l'ensemble de la ville, ce qui n'est pas envisageable pour la majorité des individus. L'effort demandé serait trop conséquent.

Nous allons donc étudier comment essayer d'améliorer cette mémorisation de l'espace qui nous entoure lorsque l'on parcourt un chemin avec une aide à la navigation.

Dans une première partie, nous nous concentrerons sur les études sur l'amélioration de la mémorisation. Ensuite, nous nous intéresserons aux différentes aides à la navigation existantes. Finalement, nous nous pencherons sur la manière de concevoir une expérimentation visant à évaluer l'impact de ces aides à la navigation sur la mémorisation de l'environnement spatial.

2.2. Les facteurs impactant la mémorisation spatiale

Dans notre cas d'étude, le but est de maximiser la mémorisation de l'environnement spatial, en minimisant l'effort de l'utilisateur pour cette tâche. Une première question se pose alors : qu'est-ce que la mémorisation de l'environnement spatial ?

2.2.1. Mémorisation de l'environnement spatial

La mémorisation spatiale (*spatial knowledge acquisition*) peut se découper en 3 niveaux de mémorisation [6, 7] :

- connaissance des points d'intérêt dans l'environnement, des bâtiments qui se démarquent par leur taille ou leur couleur, etc. : de *landmark* (*landmark knowledge*)
- connaissance du chemin, de l'enchaînement des choix à chaque intersection (*route knowledge*)
- connaissance plus globale, capacité à prendre un nouveau chemin, à adapter le chemin lorsqu'il y a des travaux ou des bouchons par exemple (*survey knowledge*)

Ces différentes mémorisations sont importantes pour pouvoir refaire un même chemin, guider quelqu'un d'autre ou encore rebrousser chemin. Elles sont acquises progressivement au fur et à mesure de l'exposition à cet environnement [7].

2.2.2. Différents types de mémoire

Afin d'améliorer la mémorisation spatiale, il faut tout d'abord identifier le type de mémoire visée. Certaines mémoires vont permettre un stockage d'information à court terme, d'autres à long terme. La mémoire autobiographique, qui permet de se rappeler, de revivre des événements passés, est divisée en deux catégories [8]:

- la mémoire épisodique : elle permet de se souvenir d'événements uniques qui nous sont personnels et dont on a fait l'expérience.
- la mémoire sémantique : elle permet de stocker des connaissances générales à propos de soi (nom, adresse, etc.).

Le rappel de l'événement situé dans la mémoire autobiographique peut notamment être déclenché par l'écoute de musique [9].

La mémorisation spatiale est avant tout de la mémorisation, ces principes peuvent donc être appliqués dans ce cadre.

2.2.3. L'importance de la répétition

La répétition est un facteur important pour la mémorisation [10]. Par exemple, dans [6], les participants doivent réaliser dix fois un même trajet. Pour les deux premiers essais, ils sont guidés, mais pour les essais suivants, ils doivent se débrouiller seuls. Une amélioration de la mémorisation de l'environnement au cours des essais est constatée pour les trois types de connaissance spatiale : *landmark knowledge*, *route knowledge* et *survey knowledge*. Cela montre l'importance de la répétition pour la mémorisation.

2.2.4. L'attention

Pour mieux mémoriser, il faut se concentrer, porter attention [10]. Celle-ci est clé dans la mémorisation. Beaucoup de techniques d'aide à la navigation ont essayé de l'exploiter, notamment en essayant de diriger l'attention de l'utilisateur sur des éléments particuliers : c'est le cœur de l'utilisation des *landmarks* [7].

2.2.5. L'importance du mouvement, de l'engagement

Dès 1974, il a été constaté une différence notable entre la mémorisation spatiale de ceux qui prenaient le bus et ceux qui conduisaient leur propre voiture ou se déplaçaient à pied : les cartes tracées étaient moins détaillées et moins cohérentes [11]. Cette différence peut s'expliquer par l'état passif dans lequel

sont les passagers du bus, ils ne sont pas maîtres de leurs mouvements. Ils sont simplement, au mieux, témoins de l'évolution de l'environnement autour d'eux.

L'importance d'être actif pendant la navigation pour mieux mémoriser l'environnement a été montrée par une étude : les chemins parcourus par les utilisateurs au cours desquels ils étaient guidés, mais maîtres de leur mouvement étaient bien mieux retenus que ceux où ils étaient passifs (déplacés comme s'ils étaient dans un bus qui les emmenait directement à destination) [12]. Le simple fait d'être actif, de contrôler ses mouvements, s'est révélé avoir un impact positif sur la mémorisation. Leurs tests ont été réalisés dans un monde virtuel sur de courts chemins (30 secondes de trajet).

La proprioception est donc importante, la simple visualisation ne suffit pas.

2.2.6. La motivation

Dans leur étude, les auteurs de [13] ont cherché, entre autres, à évaluer l'impact de la motivation sur la mémorisation de l'environnement. Pour cela, ils ont demandé aux participants de réaliser des chemins d'environ 40 secondes suivant trois conditions :

- navigation passive : les participants sont déplacés, ils peuvent regarder autour d'eux mais ne contrôlent pas leurs mouvements.
- navigation guidée : le chemin à prendre est indiqué, les participants contrôlent leurs mouvements.
- navigation active : aucun chemin n'est indiqué, les participants doivent trouver le chemin et se déplacer par eux-mêmes.

Après avoir fait le chemin, les participants devaient le refaire sans aide. Cela a permis d'évaluer la mémorisation de l'environnement. Les auteurs ont aussi demandé aux participants de noter leur niveau de motivation pour chaque méthode sur une échelle de Likert à 7 points, une échelle graduée avec 7 valeurs permettant d'exprimer un certain degré d'accord ou de désaccord avec une affirmation. Ils n'ont observé aucune corrélation entre la performance à réaliser la tâche de reproduction du chemin et la motivation des participants.

Bien que, les auteurs de [13] n'aient pas trouvé de lien significatif entre la motivation des participants pour l'une ou l'autre des méthodes et leur performance, ils évoquent que d'autres articles ont pu aboutir à ces conclusions.

Plusieurs facteurs peuvent donc influencer la mémorisation de l'environnement spatial, certains pourraient même permettre de l'améliorer.

2.2.7. La musique comme aide à la mémorisation

L'impact de la musique sur la mémorisation est assez mitigé. Certaines études ont démontré un impact négatif, d'autres ont montré un impact positif. Cela dépendait beaucoup du contexte.

Lorsque le contenu à mémoriser n'a rien à voir avec la musique, c'est là qu'elle peut avoir un impact négatif, elle agit alors comme une distraction [14]. Afin d'observer cet effet, les auteurs ont réalisé une expérience rassemblant trois groupes : un sans musique, un avec de la musique relaxante et un avec de la musique lyrique. Ces trois groupes devaient mémoriser un ensemble de syllabes, de nombres et de poèmes avec rimes. La présence de musique au cours de l'apprentissage correspondait avec des scores de mémorisation moins bons.

Au contraire, d'autres études ont trouvé un effet positif de la musique sur la mémorisation : une liste de mots chantée est mieux mémorisée qu'une liste de mots parlée [15]. L'impact positif de la musique est d'autant plus présent lorsque la répétition est utilisée. La musique, lorsqu'elle est répétée, est mieux mémorisée qu'un simple texte relu autant de fois [16].

Ainsi, il existe différentes manières d'améliorer la mémorisation. La non-mémorisation de l'environnement ou d'un chemin peut se révéler problématique dans certaines situations : panne du

téléphone qui servait de *GPS*, perte du signal, etc. . De nombreuses études ont donc cherché à améliorer la mémorisation spatiale au cours des trajets en trouvant de nouvelles manières d'apporter une aide à la navigation. Ainsi, la partie suivante présente les différentes aides à la navigation existantes.

2.3. Aides à la navigation

De nombreuses aides à la navigation existent. Certaines cherchent à favoriser la mémorisation spatiale, d'autres cherchent à privilégier le confort. Certaines s'axent sur un type de mobilité en particulier (piétons, cyclistes, automobilistes), d'autres sont plus généralistes.

On peut donc classer les aides à la navigation en plusieurs catégories comme suit :

- le sens privilégié (visuel, auditif, haptique),
- la population ciblée (âge, mode de transport, etc.),
- le type de guidage (instruction par instruction, direction générale),
- le moment où l'aide à la navigation doit être utilisée (avant le départ, pendant le trajet, après le trajet),
- l'objectif de l'aide à la navigation (favoriser la mémorisation, le confort, la performance, etc.),
- utilisation ou non de *landmarks*,

2.3.1. Types de guidage

Deux types de guidage existent. Le premier, le plus répandu, fournit des instructions étape par étape, indiquant la route à suivre à chaque intersection. Le second repose sur des informations plus globales : il donne à l'utilisateur la direction générale, la localisation de la destination. Il est caractérisé par l'utilisation d'un *beacon* - instruction sensorielle émanant de la destination - audio [17, 18] ou visuel [19, 20], ancrant la position de la destination.

2.3.2. Mode de transport

Certaines aides à la navigation ne sont pas du tout adaptées à certains modes de transport. En voiture ou à vélo, la rapidité du déplacement et la nécessité de porter une grande attention à l'environnement rendent impossible l'utilisation d'aides à la navigation demandant trop d'attention. De plus, des questions vis-à-vis de la sécurité peuvent se poser avec l'utilisation de la réalité augmentée pour donner des indications.

2.3.3. Les sens

Différents sens peuvent être utilisés pour guider les utilisateurs. Les plus courants sont l'ouïe et la vue.

La vue

La vue fut l'un des premiers sens utilisé pour aider à la navigation, notamment lorsque la personne est seule et que personne ne peut la guider. Au début, des cartes étaient utilisées, mais d'autres méthodes ont émergé. Des recherches ont été réalisées pour essayer d'optimiser au mieux ces cartes : par exemple en faisant des études sur comment dessiner les *landmarks* [7].

Une autre méthode classique d'aide à la navigation qui utilise la vue est l'utilisation de cartes interactives. Sur celles-ci, la position de l'utilisateur est inscrite, tout comme le chemin à prendre qui évolue en temps réel [21].

Une méthode visuelle d'aide à la navigation consiste à utiliser des flèches directionnelles, que ce soit sur un écran ou directement ajoutées sur la vision du monde extérieur en réalité augmentée (AR) [20]. Cela correspond à une navigation *turn-by-turn* (TBT) : à chaque intersection, la direction à prendre est donnée à l'utilisateur (tourner à gauche, droite, etc.).

La réalité augmentée permet de faire plus facilement le lien entre les instructions et la direction à prendre. Au contraire, faire le lien entre la réalité et une carte demande un effort. Des méthodes d'aides à la navigation utilisant la réalité augmentée ont donc été testées. Par exemple, BeeAR [22], consiste à superposer sur la réalité un tube indiquant la position de la destination. L'utilisateur n'a alors qu'à marcher en direction de ce tube pour arriver à destination, il est libre dans le choix de son chemin.

Une autre méthode visuelle utilisant l'AR consiste à dessiner un trait sur le sol pour indiquer le chemin à suivre [13, 21].

L'ouïe

Une utilisation classique de l'ouïe est l'utilisation d'instructions vocales pour guider l'utilisateur pas à pas, en lui donnant des indications sur la route à suivre à chaque intersection. Une grande variété d'instructions vocales sont possibles :

- basées sur des *landmarks* (que nous détaillerons dans une autre section),
- basées sur les noms de rues, les distances à parcourir, et les directions à prendre (gauche, droite, tout droit),
- consistant à donner uniquement des informations sur la localisation de la destination, par exemple en jouant un son ou un bruit qui semble provenir de la direction de la destination. Méthode connue sous le nom de *beacon*.

Afin de maximiser le confort pendant la navigation, certaines études ont cherché à minimiser les nuisances des instructions en les intégrant dans la musique écoutée. Pour cela, la musique est modifiée pour sembler provenir spatialement d'un endroit particulier :

- de la destination (comme un *beacon*) [17, 18],
- un peu en avant du trajet [18],
- de la direction à prendre à chaque intersection (comme un *turn-by-turn*) [23].

Une étude a essayé de minimiser d'autant plus l'impact sur le confort de l'utilisateur en ne modifiant que certaines pistes de la musique (notamment celle vocale) pour donner les indications de navigation [24].

Cependant, l'approche par *beacon* audio, est difficile à mettre en place pour les voitures ou les vélos, l'utilisation par des piétons était privilégiée. Parmi les articles cités précédemment, seul [18] a testé l'utilisation de *beacon* audio pour les cyclistes.

Les études ont principalement cherché à utiliser la musique pour améliorer le confort des utilisateurs lorsqu'ils utilisent une aide à la navigation [18, 23, 24]. Les résultats sur cette amélioration du confort sont assez encourageants. Toutefois, aucune étude ne s'est penchée sur son impact sur la mémorisation.

En ce qui concerne l'ouïe, une étude s'est penchée sur l'impact sur la sécurité des distractions sonores pendant la conduite [25]. Ils ont constaté qu'écouter la radio en conduisant ne mettait pas le conducteur en danger. Cependant, l'attention portée à ce qui était raconté à la radio diminuait lors des passages pour lesquels la conduite était plus complexe.

Toutefois, d'autres sens moins courants peuvent aussi être utilisés, comme l'utilisation de vibrations au poignet pour guider les utilisateurs [26].

Enfin, différents sens peuvent être combinés, le plus courant étant l'association d'instruction vocale et de cartes interactives sur un écran, comme le *GPS* classique.

2.3.4. Les *landmarks*

Tout d'abord, un *landmark* est un objet ou bâtiment qui se démarque de ses voisins par sa taille, sa couleur, ... : sa visibilité [7]. Il est donc facilement repérable et parfois même mémorable.

La découverte de l'importance de l'utilisation de *landmark* n'est pas récente. Dès 1994, des chercheurs se posaient la question. Le papier [27] montre l'importance des *landmarks*, notamment pour limiter le nombre d'erreurs au cours d'un trajet. Lorsqu'il y avait des *landmarks*, les participants se trompaient presque quatre fois moins.

[28] expose le fait que, d'après une étude de [29], les gens préfèrent, lorsqu'ils demandent la direction, avoir par ordre de préférence :

- des directions gauche-droite,
- les *landmarks*,
- d'autres informations comme les numéros de routes, les noms de rues, les distances et le nombre de rues à voir avant de tourner.

Les *landmarks* sont donc importants pour indiquer la direction à prendre.

Dans le papier [30], les auteurs ont réalisé une expérimentation consistant à guider 2 groupes de participants sur un même chemin (assez court : 1.2 km dans Athènes, Grèce). Le premier groupe était guidé grâce à des instructions relatives aux *landmarks*, le second était guidé par des instructions données sous la forme de distances et de noms de rues. Ils n'ont pas constaté de grandes différences au niveau des résultats entre les deux groupes en ce qui concerne la mémorisation. Pour évaluer la mémorisation, les auteurs ont, entre autres, demandé aux participants de dessiner la route parcourue ainsi que les landmarks croisés. Ce test est appelé *sketching map test*. Cependant, lors de ce test, , au niveau des *landmarks* placés, les participants du premier groupe ont placé en moyenne deux *landmarks* de plus que ceux qu'on leur avait donné originellement. Ceux du second ont placé en moyenne sept *landmarks*. Le groupe n'ayant pas été guidé avec des *landmarks* en ont mémorisé presque autant que l'autre groupe. Les *landmarks* sont donc utilisés en général pour retenir un chemin et guider les personnes, ils sont privilégiés par rapport à la mémorisation de distance ou de noms de rues.

Dans [20], les auteurs ont mis au point une nouvelle méthode de navigation basée sur les *global landmarks* : *Virtual Global Landmark* (VGL). Au cours du trajet, lorsque des *global landmarks* ne sont plus visibles, ils sont affichés en *Augmented Reality* (AR). En accentuant les *landmarks*, d'autant plus de *landmarks* ont été mémorisés par les participants que lorsqu'ils étaient guidés par de simples flèches en AR. Cependant, l'expérience n'a été conduite que sur 5 participants et ils avaient aussi une carte avec leur emplacement actuel, les emplacements de départ et d'arrivée ainsi qu'une proposition de chemin. Il est donc difficile de savoir comment les participants ont fait pour s'orienter le long du trajet. De plus, le nombre de *landmarks* mémorisé avec cette méthode ne surpassait pas suffisamment les résultats précédents, d'autant plus que les routes étaient assez courtes (environ 350m, et seulement deux-trois virages en général).

Dans [31], les auteurs ont réalisé deux expérimentations. Leur but était de montrer que l'on retenait mieux si l'on avait été guidé grâce à des références à des *landmarks* plutôt qu'un guidage GPS classique. Ils s'intéressent tout particulièrement à la mémoire à long terme : ils ont espacé l'expérience de navigation et le test sur la mémorisation spatiale de trois semaines. L'expérimentation a été réalisée grâce à un simulateur de conduite (avec volant et pédales), permettant aux participants de se déplacer comme s'ils étaient dans une voiture dans une ville virtuelle. Leurs résultats se sont montrés concluants : la *landmark knowledge* et la *route knowledge* étaient significativement plus élevées pour le groupe ayant reçu des instructions basées sur des *landmarks*.

Des questions peuvent alors se poser :

- comment sélectionner les *landmarks* ?
- comment les afficher ou les décrire ?

[7] ont fait une étude sur le design des *landmarks* sur une carte. Les participants ont préféré lorsque les *landmarks* étaient les plus réalistes possibles et non abstraits. Dans [31], les auteurs ont testé différentes manières de décrire les *landmarks* : soit en les décrivant de manière redondante (« Tourner à la librairie, vous pouvez y acheter des livres »), soit de manière personnalisée pour les participants en fonction de leur goût (« Tourner à la librairie, vous pouvez y acheter *Le seigneur des anneaux* », si le participant aime ce livre). La personnalisation des instructions n'a pas eu d'effet notable.

[32] ont construit une application pour être guidé grâce aux *landmarks* plutôt qu'à l'aide des noms de rues, basé sur *OpenStreetMap* (OSM). Cependant, cela ne fonctionnait pas très bien dans les zones

pour lesquelles la densité d'information sur *OSM* est faible. De plus, ce ne sont pas du tout les mêmes *landmarks* que ceux utilisés par des personnes décrivant le chemin : les ponts ne sont pas utilisés, certains bâtiments étaient notés comme non visibles alors qu'ils l'étaient, etc. . Cependant, concernant le premier point, ces dernières années, la couverture d'*OSM* a grandement augmenté, ce qui doit limiter ce problème.

2.3.5. Prise de décision

Certaines études se sont demandées le rôle de l'implication de l'utilisateur sur la mémorisation. Si l'utilisateur a la possibilité de faire des choix, de ne pas simplement suivre des instructions, aura-t-il une meilleure acquisition de l'environnement spatial ?

Ainsi, dans [33], les instructions vocales ne sont pas données à chaque intersection. Le participant peut donc choisir quelle est, selon lui, la direction à prendre pour arriver à destination. Cette méthode de navigation est appelée Free-Choice-Navigation. Ce genre d'aide à la navigation, bien que non pratique si l'on doit arriver rapidement à la destination, peut être adapté dans le cadre de déplacements touristiques. Les résultats sur la mémorisation de l'environnement spatial ne se sont cependant pas révélés significativement meilleurs que ceux obtenus avec des instructions vocales *turn-by-turn*.

Dans [13], bien que les auteurs aient constaté une nette amélioration de la mémorisation de l'environnement spatial lorsque les participants contrôlaient leur déplacement, ils n'ont pas trouvé de différence notable lorsque les participants pouvaient choisir le chemin qu'ils empruntaient.

2.3.6. Impact de l'utilisation du GPS sur la mémorisation

Il existe donc de nombreuses aides à la navigation, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Cependant, de nombreuses études se sont portées sur le plus classique de tous : le *GPS* tel qu'on le connaît, avec ses instructions audio et sa carte interactive. Ces études ont questionné l'impact que celui-ci pouvait avoir sur la mémorisation de l'environnement spatial et des trajets.

[4] ont montré que l'usage répété d'un *GPS* pour se déplacer pouvait affecter l'acquisition spatiale d'information. Pour cela, ils ont réalisé une expérience avec des conducteurs de taxis qui utilisaient fréquemment le *GPS* depuis plus ou moins longtemps. En montrant des vidéos de chemin parcouru sur un ordinateur à ces conducteurs de taxis dans un lieu qu'ils ne connaissaient pas, ils ont constaté que l'utilisation à long-terme d'aide à la navigation était corrélée avec un apprentissage spatial (*landmark knowledge* et *survey knowledge*) moins bon. L'apprentissage de la route n'était cependant pas affecté. Au cours de l'expérience menée, les participants savaient qu'ils seraient évalués sur leur connaissance spatiale, ce qui a pu affecter leur comportement et leur mémorisation.

Il existe donc des effets à long-terme de l'utilisation du *GPS* sur la mémorisation de l'environnement spatial. Des effets à court terme ont aussi été constatés.

Dans [3], une expérience a été menée pour comparer la mémorisation spatiale entre deux groupes de personnes : l'un utilisant une carte papier avec le trajet à prendre d'inscrit sur celle-ci, l'autre recevant des instructions vocales (*turn-by-turn*) pendant la navigation. Cette expérience sur la mémorisation au cours de la navigation a été réalisée grâce à un simulateur de conduite, les participants évoluaient ainsi dans un monde virtuel (avec des routes, quelques bâtiments et arbres). Les résultats suite aux tests sur la mémorisation spatiale se sont révélés meilleurs pour le premier groupe. Les auteurs ont relevé que les participants utilisant des instructions vocales et non une carte papier étaient moins stressés. L'absence de stress pourrait donc être une des raisons de l'impact négatif du *GPS* sur la mémorisation. Cependant, ces résultats sont à nuancer car les participants se déplaçant à l'aide d'une carte avaient eu plus de temps pour l'étudier avant le début du trajet et certaines méthodes d'évaluation de la mémorisation (comme le *map sketching*) favorisaient le groupe ayant plus étudié la carte. En effet, l'évaluation par *map sketching* consistait à dessiner les routes et les *landmarks* mémorisés. L'autre

méthode d'évaluation consistait à reconnaître si des images avaient été prises sur le chemin parcouru ou non et à déterminer dans quel ordre ces images avaient été vues.

Dans [7], les auteurs soulèvent le fait que lors de l'utilisation du *GPS*, l'état de l'utilisateur est plus passif.

Dans [34], les auteurs ont constaté un lien entre la dépendance au *GPS* et les capacités d'orientation spatiale des participants. Le sens de ce lien n'a pas pu être établi. Le *GPS* pourrait aussi avoir un impact négatif sur les capacités d'orientation spatiale.

Les études citées précédemment ont dû trouver un moyen de mesurer la mémorisation spatiale afin de savoir si la méthode proposée est meilleure ou non que celles existantes. La prochaine partie abordera donc ces méthodes d'évaluation.

2.4. Évaluations

Construire une expérimentation n'est pas toujours simple. Il faut s'assurer que les résultats obtenus pourront être fiables : qu'il n'y a pas de biais dans le groupe de participants, que les tests permettent de mesurer ce que l'on souhaite mesurer, etc. . Il peut aussi être utile de pouvoir comparer les résultats d'une nouvelle étude avec ceux déjà parus, en reprenant donc des conditions d'expérimentation similaires (même environnement, même catégorie de participants, mêmes tests, etc.). Nous allons donc étudier dans cette partie comment les études précédentes ont été réalisées.

2.4.1. Avant la navigation

La mémorisation spatiale ne dépend pas seulement de l'aide à la navigation utilisée, elle est différente pour chaque personne. Réaliser une expérimentation *within-subjects* permet ainsi de mieux contrôler le fait que chaque personne est différente. On peut ainsi comparer les résultats d'une même personne sur différentes méthodes de navigation. Pour réaliser une expérimentation *between-subjects*, il est nécessaire de s'assurer que les groupes sont équivalents.

Dans les deux cas, il est intéressant de mesurer les capacités spatiales des participants. D'un côté, pour s'assurer que les groupes sont équivalents en compétences, de l'autre, il peut être intéressant de pouvoir mesurer si les améliorations se font plutôt pour les personnes ayant de bonnes compétences spatiales ou pour celles en ayant de moins bonnes. Par exemple, [7] a constaté qu'un visuel réaliste pour les *landmarks* sur les cartes avait un impact positif sur les personnes avec de faibles capacités spatiales tandis que les personnes fortes n'étaient pas affectées. Pour mesurer les capacités spatiales, différents tests existent :

- *SBSOD scale* : défini dans [35] est une auto-évaluation permettant de connaître sa capacité à s'orienter et à naviguer dans l'environnement [12, 13, 20–22, 30, 31, 33, 34, 36, 37]
- PTSOT (Perspective Taking/Spatial Orientation Test) : défini dans [38] et révisé pour être adapté à une utilisation sur ordinateur dans [39], est utilisé pour tester la capacité à imaginer différentes perspectives et orientations (ex : le participant doit imaginer se situer à un endroit, face à un objet et il doit pointer la direction dans laquelle serait alors un autre objet) [7, 36, 40] lien du test : <https://osf.io/wq3kd>
- RFPT (Reference Frame Proclivity Test) : est utilisé pour mesurer si le participant préfère avoir un cadre de référence allocentrique (repère extérieur fixe comme un objet ou un bâtiment) ou égocentrique (propre corps pour repère) pour un trajet [31]
- Spatial Visualization Ability : Hooper Visual Orientation test [12]

Les capacités spatiales peuvent être corrélées à la dépendance au *GPS* comme une étude l'a montré [34]. Elles pourraient aussi être corrélées avec la capacité de mémorisation spatiale, d'où l'importance de ces tests.

Des questionnaires démographiques sont parfois utilisés [7, 40], surtout dans le cadre d'expérimentation *between-subjects* car il faut s'assurer que les groupes sont les plus similaires possible.

Avant de commencer la navigation, en plus de questionnaires comme ceux cités précédemment, il faut aussi expliquer le but de l'expérimentation aux participants, leur expliquer ce qu'ils vont devoir faire. Certains aspects peuvent être volontairement omis pour ne pas influencer le comportement des participants. Par exemple, le fait de savoir ou non qu'un test de mémorisation de l'environnement aura lieu influence le comportement des participants (*spatial learning strategies* et *visual attention behavior*) [7]. Dans [7], les participants avaient été avertis, dans [31] ils ne savaient pas.

L'état de motivation peut aussi être un facteur influençant la mémorisation comme le souligne [13]. Une plus grande motivation peut mener à une plus grande attention, ce qui peut mener à une meilleure mémorisation. Des questionnaires pour évaluer le niveau de motivation qu'apporte une méthode de navigation peuvent aussi être utilisés [13].

2.4.2. Comment choisir les routes pour une expérimentation ?

Lors d'une expérimentation sur la mémorisation de l'environnement spatial lorsque l'on utilise des aides à la navigation, il est important de bien choisir la route qui va être parcourue. Si l'on souhaite tester plusieurs méthodes de navigation sur un même utilisateur, il faut prévoir plusieurs routes. Cependant, pour que les résultats soient valables, il faut que les routes soient équivalentes afin que la route ne devienne pas une variable indépendante qui influence différemment les résultats.

Dans [41], les auteurs ont tout d'abord constaté que de nombreuses études impliquant de la navigation spatiale ne donnaient pas assez d'informations sur les routes choisies pour l'expérimentation. Les résultats n'étaient donc pas répliquables, ni comparables avec d'autres méthodes faites sur des routes différentes. Ils ont remarqué que la moitié des articles ne mentionnaient que la longueur de la route et le type d'environnement que la route traversait (zone résidentielle, campus, etc.); un tiers des articles mentionnait le nom de la ville de l'expérimentation. En général, le nombre de points de décision, soit d'intersections, était également précisé, tout comme le nombre de points de décision nécessitant un virage.

Pour pallier ce problème, ils ont développé un outil permettant de trouver la meilleure route possible pour réaliser une expérimentation dans une zone géographique choisie. Pour cela, ils essaient de prendre la route la plus proche de la moyenne des différentes routes respectant un certain nombre de critères de la zone choisie (*average route*). Cet outil permet de définir notamment :

- la zone géographique à analyser
- la longueur de la route à parcourir (min et max)
- le nombre de points de décision (*decision points*, DPs) : nombre d'intersections sur une route qui n'est ni le début ni la fin.
- les données utilisées pour déterminer les POI (*points of interest*) : par défaut, ceux d'OpenStreetMap sont utilisés.

Cependant, trouver cette route nécessite beaucoup de calcul : l'outil peut mettre de nombreuses heures (et même de nombreux jours) pour trouver la route optimale. Les critères choisis ainsi que la dimension de la zone à analyser peuvent influencer ces temps de calcul.

Dans [42], ils se sont ensuite penchés un peu plus sur le sujet en tentant de trouver des routes similaires dans trois villes : Vienne (Autriche), Florence (Italie) et Brême (Allemagne). Pour cela, ils ont défini certains critères pour caractériser une route :

- la longueur de la route
- la longueur des sous-routes, c'est-à-dire la distance entre chaque point de décision (moyenne, écart-type, médian)
- le nombre de points de décision (intersections),
- la fréquence des virages gauches et droites ainsi que des lignes-droites
- orientation des segments de routes par rapport au nord
- nombre de choix possible à chaque intersection (moyenne et répartition)
- régularité des intersections (somme des angles entre les options et une intersection régulière)

Le but n'était alors pas de trouver la plus proche d'une route moyenne, mais la route la plus proche de celle sélectionnée dans la première des villes (proche d'une route moyenne).

Étudier les expériences précédentes peut aussi aider à choisir la route à parcourir : à fixer sa longueur, sa complexité. En effet, pour pouvoir comparer l'impact de deux méthodes d'aides à la navigation sur la mémorisation, il faut que les routes soient suffisamment longues. Si les routes sont trop courtes, elles pourraient être entièrement mémorisées par les participants dans les deux cas testés. Il serait donc impossible de conclure. Mais, il faut aussi que la route à parcourir ne soit pas trop longue. Cela

pourrait rendre l'expérimentation trop longue, introduire de la fatigue ou de la perte de patience chez le participant. Il est de ce fait important de trouver un juste-milieu.

De nombreuses études se sont penchées sur la mémorisation des *landmarks*, leurs routes avaient tendance à être assez courtes (moins d'un kilomètre) avec peu d'intersections car le but était de mesurer la mémorisation des *landmarks* et non juste du chemin. De même, les études impliquant des déplacements à pied choisissaient généralement des trajets courts, probablement afin de limiter la durée de l'expérience.

On peut s'inspirer des études précédentes pour choisir la route à faire parcourir lors de notre expérience, mais il est cependant important de prendre en compte que chaque étude possède des besoins particuliers. Observer le comportement des participants pour décrire un trajet ne nécessitera pas le même trajet qu'étudier la mémorisation d'un chemin par des conducteurs de taxis. Le fait que les participants sachent (dans [4], [12]) ou non (dans [31]) qu'ils seront évalués sur leur mémorisation de l'environnement influence la longueur de la route.

2.4.3. Comment minimiser la *motion sickness* en VR ?

Dans le monde réel, de nombreux facteurs ne sont pas contrôlables : la météo, les obstacles, etc., ce qui rend la réalisation d'expérimentations plus compliquée. Pour pallier ce problème, l'expérimentation peut être réalisée dans un monde virtuel, en VR. Cependant, la VR pose d'autres problèmes, notamment celui de la *motion sickness*.

En VR, lorsque notre champ de vision varie, notre corps reste en général statique, immobile. Ce décalage peut rendre nauséux ou malade au bout de quelques minutes, voire immédiatement. Il faut donc trouver une parade à cet effet.

Dans leur conception de Google Earth VR, les employés ont été confrontés à ce problème. En effet, leur but était de créer une application dans laquelle les utilisateurs pourraient se déplacer sur la Terre en réalité virtuelle. Ils ont ainsi essayé de minimiser cet effet négatif. Ils ont présenté toutes leurs découvertes lors de la *Game Developers Conference* et de la conférence SIGGRAPH de 2017 [43, 44]. Une des solutions trouvées consiste à ne pas présenter un déplacement continu vers la destination, mais de faire appel à la téléportation. Cependant, cela réduit considérablement l'immersion de l'utilisateur. Il est donc important de trouver un équilibre entre confort de l'utilisateur et immersion. Ils ont également réalisé de nombreuses itérations de leur application à l'aide de tests utilisateurs pour trouver les ajustements suivants :

- ajout d'une grille fixe dans le référentiel de l'utilisateur (environ 15 % du champ de vision)
- assombrissement des bords de l'écran (*tunneling*)
- ajout d'une ligne d'horizon

En 2021, une étude répertoriant plus d'une centaine de méthodes de déplacement en VR est paru [45]. Les différentes méthodes ont été comparées, en évaluant à chaque fois différents critères (si la technique de déplacement provoque ou non des nausées, si elle casse ou non l'immersion, si elle est intuitive ou non, etc.). Pour rendre ces informations plus accessibles, ils ont développé un site web répertoriant les différentes techniques de déplacement en VR : *Locomotion Vault*.

2.4.4. Comment mesurer la mémorisation ?

Dans la littérature, de nombreuses expériences ont été menées, que ce soit pour montrer que les commandes vocales du GPS impactaient la mémorisation ou pour tester de nouvelles aides à la navigation visant à favoriser une meilleure mémorisation. Ils ont donc fait tester l'aide à la navigation à des participants, que ce soit dans un monde virtuel ou réel. Mais pour voir l'impact de l'aide à la navigation sur la mémorisation, il faut réussir à évaluer la mémorisation spatiale des participants.

De nombreuses méthodes ont été proposées. Certaines visent plutôt la mémorisation des *landmarks*, d'autres de la route, et d'autres une mémorisation plus globale de l'environnement. Les différentes méthodes d'évaluation de la mémorisation spatiale ne peuvent pas toujours être séparées en ces trois catégories, car elles permettent parfois d'évaluer plusieurs types de mémorisation à la fois. Une classification en fonction du type de mémorisation qu'elles évaluent principalement a tout de même été tentée dans cette étude bibliographique.

Landmark knowledge

La mémorisation des *landmarks* peut être évaluée de différentes manières :

- **landmark recognition task** : pour chaque image représentant un landmark, le participant doit indiquer si la photo a bien été prise sur le chemin parcouru ou non [6, 21]
- **landmark recall** : le participant doit citer tous les *landmarks* dont il se souvient [37]

Route knowledge

La mémorisation de la route peut aussi être évaluée à l'aide d'autres tâches :

- **scene sorting task** : le participant dispose d'un ensemble d'images représentant des landmarks ou des intersections, il doit les remettre dans l'ordre qu'il les a vues, en retirant les images ne correspondant pas à une scène déjà vue [3, 6, 7, 31]
- **route recognition task** : pour chaque image d'intersection, le participant doit indiquer la direction prise (droite, gauche, tout droit, intersection non présente pendant le trajet) [7, 21, 31]
- **route drawing task** : dessiner la route empruntée sur une carte avec juste les routes et les points de départ et d'arrivée d'indiqués [6, 22, 33]
- refaire le chemin sans indication [12, 31]

Survey knowledge

Enfin, la mémorisation plus globale de l'environnement peut être évaluée à l'aide des tâches suivantes :

- **estimer la distance parcourue** [7, 22, 33] ou la longueur de chaque segment de la route [30]
- **pointing task** : à la fin de chaque route (ou sous route) le participant doit pointer dans la direction dans laquelle se trouve le point de départ [21, 22, 33] ou la direction des landmarks depuis le point de départ [30] ou depuis des positions aléatoires [37], ou encore se trouver sur la position d'un landmark et devoir pointer dans la direction d'un autre [7]
- **spatial relocation task** : pour chaque image de landmark et d'intersection, le participant doit les placer sur une carte simple (sans noms de rues, mais avec point de départ et d'arrivée d'indiqués) [21]
- **abstract route drawing task** : le participant doit dessiner la route parcourue sur une feuille blanche (avec le bon nombre de virages, dans le bon ordre et en précisant les intersections sans changement de direction) [22, 33]
- **map sketching** : le participant doit dessiner sur une feuille blanche la carte (routes et landmark) [3, 11, 21, 30, 31, 37]
- le participant doit ajouter les POI sur une carte simple [22, 33]

Ainsi, il est possible d'évaluer le niveau de mémorisation de l'environnement spatial à l'aide des méthodes précédemment définies. Dans certaines études, les participants devaient réaliser les tâches en temps limité, dans d'autres non. Dans certains cas, les participants réalisaient les tâches immédiatement après avoir parcouru le chemin, dans d'autres la tâche devait être réalisée quelques minutes après (voire quelques semaines après [31]). Parfois, avant de faire les tâches, les participants devaient faire une autre activité comme compter à l'envers [12] pour leur faire penser à autre chose.

[37] soulève le problème que lorsque l'on évalue la mémorisation, il ne faut pas rajouter d'autre difficulté : dessiner une carte demande de l'abstraction, de changer de perspective si l'on a appris la route en marchant, sans la voir de dessus par exemple.

2.4.5. *flush memory*

Si l'on ne souhaite pas évaluer la mémorisation immédiate, il convient de faire exécuter une tâche aux participants entre le moment où ils ont terminé l'étape de mémorisation et le moment où on évalue leur mémorisation. Cette tâche, qui doit durer au moins 30 secondes, permet de vider la mémoire immédiate [46]. Plusieurs tâches peuvent être utilisées comme compter à l'envers [47] ou avoir une conversation de deux minutes [48]. Cette pratique se nomme *flush memory* et permet de s'assurer que l'on évalue bien la mémorisation à long terme et non la mémoire immédiate.

2.4.6. Après la navigation

Lorsque l'on cherche à comparer plusieurs aides à la navigation, il peut être intéressant de faire remplir des questionnaires aux participants pour avoir un aperçu de leur ressenti.

Il existe :

- des **questionnaires de préférence** entre différentes méthodes de navigation [20]
- des questionnaires pour mesurer la ***simulation sickness*** : 3 questions sur une échelle de Likert en 4 points (« nausea », « headache », et « dizziness ») [31] ou [13] en utilisant le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [49]
- des questionnaires pour mesurer le *workload* (la charge mentale qu'occupe l'aide à la navigation) : ***NASA Task Load Index scale (NASA-TLX scale)*** [7, 20, 22, 31, 33]. Ce questionnaire demande notamment si la méthode de navigation engendre de la frustration, demande beaucoup ou peu d'efforts, permet ou non une meilleure performance.
- des questionnaires pour mesurer l'utilisabilité du système : **System Usability Scale (SUS)** [22, 33]
- des questionnaires pour mesurer l'expérience utilisateur : ***UEQ-S*** défini dans [50] et [51] (version courte) et utilisé dans [22, 33]
- des questionnaires pour mesurer l'immersion, l'interaction et le sentiment de présence dans le monde virtuel : **Igroup Presence Questionnaire** défini dans [52] et utilisé dans [13]

Ces différents questionnaires peuvent aider à mesurer l'impact de l'aide à la navigation.

Un questionnaire a également été créé pour pouvoir comparer les différentes méthodes de navigation entre elles, en particulier lors de l'utilisation de musique [18].

Il est important qu'une nouvelle aide à la navigation ne fasse pas qu'améliorer la mémorisation spatiale. Elle doit aussi être agréable à utiliser et intuitive. D'où l'importance de ces tests demandant l'avis aux utilisateurs sur l'aide à la navigation.

2.5. Bilan

Dans cette étude bibliographique, nous avons pu observer l'étendue des aides à la navigation existantes. Les méthodes de navigation diffèrent, tout comme leur impact sur la mémorisation. Tous les modèles d'aides à la navigation ne sont pas toujours adaptés. Certains sont moins efficaces pour emmener à une destination précise [53], d'autres ne sont pas adaptés quand on est avec d'autres personnes (écoute de musique) [18, 23, 24], d'autres ne fonctionnent pas dans certains environnements (présence d'impasses [22]). Un large éventail de méthodes de navigation existent, et c'est à l'utilisateur de choisir celle qui lui convient le mieux sur le moment.

Il est important de noter que l'amélioration de la mémorisation ne doit pas se faire au détriment de la sécurité. Focaliser l'attention du participant sur la mémorisation de la route ne doit pas compromettre la sécurité du participant lors de la conduite. Une grande partie de l'attention doit donc être consacrée à la route et à l'environnement pour éviter tout danger.

Dans cette étude bibliographique, nous avons aussi étudié comment réaliser une expérimentation pour analyser l'impact de l'aide à la navigation sur la mémorisation de l'environnement spatial. D'une part en étudiant comment agencer l'expérimentation, et d'autre part en listant les méthodes utilisées

pour évaluer la mémorisation d'un trajet dans la littérature. Nous avons également vu comment choisir les routes que parcourront les participants, ainsi que comment minimiser la *motion sickness* en VR.

Au cours des recherches, une absence d'études sur l'utilisation de la musique comme aide à la navigation dans le but d'améliorer la mémorisation de l'environnement spatial a pu être constatée. Dans la littérature, seul l'aspect du confort a été abordé. Or, lorsqu'elle n'est pas une distraction, la musique peut être un outil pour améliorer la mémorisation, en particulier lorsqu'elle est répétée. Cet aspect devra donc être étudié.

3. Formulation de la question de recherche

L'utilisation généralisée du *GPS* a soulevé des interrogations quant à son impact sur la mémorisation spatiale : retient-on aussi bien les trajets parcourus lorsqu'on utilise ce type d'assistance à la navigation ? De nombreuses recherches se sont intéressées à des alternatives visant à améliorer la mémorisation des itinéraires, en explorant de nouvelles façons de guider une personne d'un point A à un point B.

Parmi ces alternatives, plusieurs approches visuelles ont été développées, telles que la visualisation de la destination en réalité augmentée (par exemple via un tube représentant la position de la destination) ou la comparaison de différents types de cartes. D'autres travaux se sont inspirés des stratégies naturelles utilisées par les humains pour se guider mutuellement, notamment l'utilisation de repères visuels (*landmarks*).

En revanche, l'usage de la musique dans le contexte de la navigation a, jusqu'à présent, principalement été envisagé sous l'angle du confort ou de l'expérience utilisateur, et non dans une perspective de renforcement de la mémorisation spatiale. L'étude décrite dans la suite de ce rapport porte précisément sur cet aspect inexploré dans la littérature.

3.1. Objectifs

Le stage a deux objectifs principaux. Le premier est de concevoir une aide à la navigation guidant les utilisateurs grâce aux paroles d'une musique, informationnelle, spécifiquement conçue pour décrire un trajet. Le second objectif est d'évaluer l'effet de ce guidage musical sur la mémorisation de l'itinéraire parcouru, par rapport aux aides à la navigation classiques (*GPS*).

Pour ce deuxième objectif, il est donc nécessaire de réaliser une expérience afin de pouvoir évaluer l'impact. Nous allons présenter la conception de celle-ci dans la sous-partie suivante.

3.2. Design de l'expérience

L'étude bibliographique, réalisée en début de stage et décrite dans la partie précédente, a permis de répondre à bon nombre de questions quant au design de l'expérience. Nous nous y référerons à plusieurs endroits.

La musique peut avoir un impact négatif sur la mémorisation lorsque celle-ci forme une distraction (Chapitre 2.2.7). Ici, la musique sera utilisée comme support pour contenir les informations à retenir, ce qui peut avoir un impact différent de celui constaté dans les études dans lesquelles la musique n'avait rien à voir avec la tâche à accomplir. Les paroles auront un sens utile pour la tâche et contiendront les informations à mémoriser.

Aides à la navigation testées

Il a été choisi de tester l'impact de la musique dans deux cas différents :

- lorsque la musique est présente pour préparer la navigation,
- lorsque la musique est présente pendant la navigation.

Les deux aides à la navigation testées seront donc :

- avoir les instructions du chemin à suivre avant de faire le chemin,
- avoir les instructions au fur et à mesure du parcours du chemin (comme un *GPS* classique).

Pour chacune des deux aides à la navigation, il y a deux variations : dans un cas les instructions sont simplement parlées, dans l'autre cas les instructions forment les paroles d'une musique et sont donc chantées. Les instructions sont les mêmes dans les deux cas, seule la forme auditive qu'elles prennent varie.

Il est important de noter que les deux aides à la navigation - celle pour préparer la navigation et celle pour aider pendant la navigation - représentent deux expériences bien distinctes et indépendantes. Les deux expériences sont réalisées à la suite, avec les mêmes participants, mais elles sont belles et bien distinctes. Ainsi, la première expérience se concentre plus sur l'impact de la musique sur la mémorisation, de manière plus globale. La seconde se concentre plus précisément sur la mémorisation pendant la navigation spatiale.

Stratégie expérimentale

Chaque participant testera les deux paires de conditions expérimentales décrites ci-dessus : la stratégie employée est donc du *within-subject*. Nous avons choisi cette stratégie car une approche *between-subject* aurait nécessité un meilleur équilibre entre les groupes et plus de participants.

Choix complémentaire

Au début, nous souhaitions que le chemin soit répété plusieurs fois afin de voir l'impact de la répétition sur la mémorisation. Le rôle de la musique pour la mémorisation est, comme nous avons pu le voir dans l'étude bibliographique (Chapitre 2.2.7), particulièrement présent avec la répétition. Ajouter cette hypothèse et modifier le protocole pour la vérifier aurait rendu l'expérience trop longue pour les participants, il a donc été décidé de ne pas la garder.

Évaluation de la mémorisation

La dernière partie de l'étude bibliographique a permis d'identifier comment réaliser l'évaluation de la mémorisation (Chapitre 2.4.4).

De nombreuses possibilités existent pour évaluer la mémorisation du chemin. Il a été choisi de demander aux participants de faire le chemin sans aucune aide pour vérifier leur mémorisation de celui-ci.

L'expérience permettra ainsi de mesurer, lors du parcours d'une route, l'impact de l'utilisation de la musique sur la mémorisation de celle-ci : que celle-ci soit présente avant de parcourir le chemin ou pendant celui-ci.

3.3. Hypothèse

En se basant sur l'ensemble des recherches réalisées précédemment, on peut supposer que la musique a un effet positif sur la mémorisation d'un trajet : moins d'erreurs sont commises lorsque les instructions sont sous forme chantées.

C'est cette hypothèse que nous chercherons à valider.

Pour résumer, nous souhaitons construire une expérimentation dans laquelle les participants parcourent différents chemins avec des méthodes d'aides à la navigation différentes, l'objectif des participants étant de mémoriser les chemins. Dans un premier temps, ils écoutent une suite d'instructions (chantées ou parlées) avant de parcourir le chemin. Dans un second temps, ils sont guidés en temps réel sur le chemin (par des instructions chantées ou parlées). Cela permet de tester l'impact de la musique dans deux cas différents.

4. Mise en place de l'expérimentation

4.1. Création de l'environnement 3D

Réaliser l'expérience dans le monde réel soulève plusieurs problèmes. D'une part, il est indispensable de s'assurer que les participants ne sont pas mis en danger. D'autre part, de nombreux paramètres ne peuvent pas être contrôlés : la météo, les autres usagers de la route, etc. . La variation de ces paramètres peut empêcher la réalisation de l'expérience ou empêcher la comparabilité des résultats aussi bien entre les différents participants qu'au sein d'un même participant utilisant plusieurs méthodes différentes.

Nous avons donc décidé de conduire l'expérimentation en [VR](#) afin de recréer une situation proche du réel tout en maîtrisant l'environnement et en empêchant la mise en danger des participants. Comme nous avons pu le voir dans l'étude bibliographique, la [VR](#) a beaucoup été utilisée précédemment dans le cadre de la navigation spatiale. La [VR](#) permet de conserver une immersion forte dans l'environnement, de pouvoir contrôler celui-ci et de ne pas mettre en danger le participant. Utiliser la [VR](#) est donc un choix nécessaire et justifié, même si rien ne garantit que les résultats trouvés en [VR](#) soient applicables dans la réalité.

Concernant le moyen de déplacement, deux méthodes ont été envisagées : à pied ou en voiture. Le déplacement en voiture s'est révélé le plus pertinent pour différentes raisons. D'une part, il permet de parcourir de longues distances, rapidement, et le tout sans engendrer de fatigue chez le participant. Cela permet de choisir des chemins plus longs et complexes, ce qui est essentiel pour éviter une mémorisation trop rapide, trop facile du chemin. D'autre part, la mise en place d'un déplacement à pied en [VR](#) aurait été complexe pour être fidèle à la réalité, que le participant ait bel et bien l'impression de marcher. De plus, nous disposions déjà d'un volant et de pédales, ce qui a permis de simuler le déplacement en voiture de manière plutôt réaliste.

Ainsi, le choix d'un déplacement en voiture dans un environnement 3D nous a permis de concilier réalisme, sécurité et rigueur expérimentale.

4.1.1. Choix du logiciel

Afin de gagner du temps dans la mise en place de l'expérimentation, l'utilisation d'un moteur de jeu que je connaissais déjà a été privilégiée. Le choix s'est porté entre Godot et Unity. Compte tenu des besoins spécifiques liés à la réalité virtuelle, Unity s'est imposé comme la solution la plus simple et la plus adaptée.

4.1.2. Modèle 3D de la ville virtuelle

Le premier défi a été de trouver un modèle 3D de ville dans lequel on pourrait naviguer.

Trouver une ville 3D

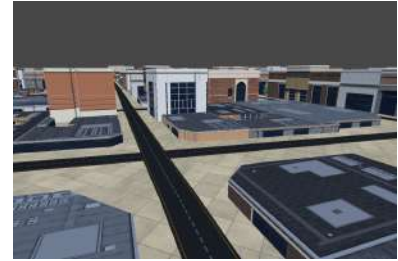
L'Annexe A présente les différentes approches envisagées pour trouver une ville 3D. Au final, la solution retenue a été de récupérer les données géographiques d'une partie de Paris et de les importer dans Unity, le tout à l'aide de [MapBox](#) [54].



(a) Vue de dessus



(b) Vue de loin



(c) Vue de près

Fig. 2. – Modèle 3D de la ville virtuelle

Une portion de Paris (depuis la position Longitude : 2.2965, Latitude : 48.840 avec un rayon 2,5 km) a été sélectionnée pour obtenir une zone dense en bâtiments, sans grande étendue vide.

Rendre la ville plus attrayante

Afin d'obtenir une modélisation plus attrayante, des modifications (décrites dans l'Annexe B) ont été réalisées. Elles incluent l'ajout d'un ciel plus réaliste, ainsi que des textures et des reliefs aux routes.

Dans le but de rendre la ville un peu moins répétitive et plus attrayante, nous avons ajouté différents éléments un peu partout. Pour cela, nous avons utilisé des modèles 3D provenant de plusieurs assets Unity. Ceux-ci sont explicités dans l'Annexe B.

Cependant, comme l'étude bibliographique l'a soulevé, les *landmarks* sont un facteur important de la mémorisation : il faut pouvoir les contrôler afin que les différentes routes soient équivalentes. Le fait que les bâtiments aient les mêmes textures et qu'il n'y ait pas trop d'éléments différenciants, excepté les objets rajoutés (arbres, bancs, etc) permet d'avoir deux routes visuellement équivalentes. Il faut donc faire attention à répartir équitablement les éléments décoratifs le long des différentes routes.

Sur les routes finales choisies, il y a trois éléments décoratifs directement sur la route et trois sur des routes adjacentes, qui peuvent être aperçus depuis la route. Il y a aussi un élément décoratif au départ et un à l'arrivée du chemin. Des exemples de ces éléments placés sur les routes sont présentés ci-dessous (Fig. 3).



Fig. 3. – Application des éléments décoratifs le long des routes.

Une fois la ville 3D modélisée, il convenait de trouver comment se déplacer dans celle-ci.

4.1.3. Méthode de déplacement

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le choix a été fait d'un déplacement en voiture des participants.

Afin de pouvoir parcourir d'assez grandes distances en maximisant l'écologie dans le monde 3D, il a été décidé que les participants se déplaceraient en voiture. Il est important que les distances parcourues soient longues, pour éviter que la mémorisation du chemin complet, dès le premier essai, soit trop facile. En effet, si le trajet est trop court, trop facile à mémoriser, les participants pourraient retenir le chemin en entier, et ce quelque soit la méthode d'aide à la navigation utilisée. Les techniques existantes seraient suffisantes. Ainsi, il serait possible de distinguer si la nouvelle technique proposée est moins performante, mais impossible de savoir si elle est plus performante. Il faut donc éviter d'atteindre un plateau où les participants mémoriseraient le chemin en entier quelque soit la méthode utilisée.

Un autre avantage de la conduite sur la marche est que la voiture permet de reproduire un déplacement similaire en 3D et dans la réalité : la personne est immobile.

Pour faciliter l'avancement du projet, une voiture déjà existante a été utilisée et adaptée aux besoins : adaptation des entrées utilisateurs (*inputs*), de la caméra, ajout d'un [GPS](#), ajout de vitres teintées ... (Fig. 4). La voiture et son code pour la contrôler, Ezereal Car Controller, peuvent être trouvés sur l'[Unity Asset Store](#). Cette voiture avait déjà l'intérieur de modélisé, et tout son fonctionnement déjà en place (accélération, freinage et d'autres fonctionnalités dont nous n'avons finalement pas eu besoin comme le clignotant). Cela nous a permis de d'accélérer le développement de l'expérimentation.



(a) Vue intérieure de la voiture



(b) Vue d'ensemble de la voiture

Fig. 4. – Voiture choisie

Contrôles

Pour contrôler le véhicule en *VR*, nous disposons d'un volant (Fig. 6b) et de deux pédales (Fig. 6c). Nous les avons donc reliés aux contrôles existants de la voiture importée. L'utilisation du casque de *VR* (Fig. 6a) permet une meilleure immersion, de contrôler facilement ce que l'on voit et de regarder autour de soi.

Le matériel utilisé est :

- casque *VR* : Lenovo Windows Mixed Reality (Fig. 6a)
- Volant et pédales de voiture : *Logitech NASCAR Racing Wheel* (Fig. 6b, Fig. 6c)



Fig. 5. – Vue d'ensemble du matériel utilisé pour le contrôle du véhicule en *VR*



(a) Casque de réalité virtuelle



(b) Volant de voiture



(c) Pédales de voiture

Fig. 6. – Matériel utilisé pour le contrôle du véhicule en *VR*

Nous avons limité la vitesse maximale de la voiture afin que cela soit plus écologique et que le participant ne puisse pas réellement conduire à une vitesse supérieure à 55 km/h en ville, ce qui serait incohérent. Cependant, le compteur de vitesse affiché dans la voiture n'a pas été modifié : lorsque la vitesse est de 55 km/h, il affiche 140 km/h au niveau du compteur.

Problématique du déplacement en VR

L'un des problèmes principaux qu'apporte l'utilisation de la VR est la provocation de *motion sickness*. En effet, notre champ de vision nous donne l'impression de nous déplacer tandis que nos muscles restent immobiles. Ce décalage entre la vue et ce que le corps ressent peut provoquer des nausées, appelé *motion sickness*.

Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique (Chapitre 2.4.3), des ingénieurs de Google Earth VR ont essayé de résoudre ce problème. Leur première approche fut de trouver une méthode de déplacement diminuant cet effet secondaire. Cependant, dans notre cas, il était important de conserver le déplacement en voiture. Nous nous sommes donc concentrés sur l'implémentation des autres solutions qu'ils ont proposées : l'utilisation d'une grille fixe dans le référentiel de l'utilisateur ainsi que du vignetage pour réduire le champ de vision du participant (*tunneling*).

Pour appliquer le principe du tunneling, nous avons décidé d'assombrir les bords lorsque la voiture se déplace ou tourne trop rapidement (Fig. 8). Nous avons aussi assombri les vitres des portières de la voiture dans l'optique de réduire l'effet de *motion sickness* (Fig. 7b).

En ce qui concerne l'utilisation d'une grille fixe dans le référentiel de l'utilisateur, les ingénieurs de Google Earth VR ont identifié qu'il fallait qu'au moins 15 % du champ de vision de l'utilisateur soient fixes dans le référentiel de l'utilisateur. Pour répondre à ce problème, nous avons placé la caméra de sorte que les utilisateurs voient une grande partie du cockpit de la voiture (Fig. 7a).



(a) Vue du cockpit de la voiture



(b) Vitres teintées



(c) Vignetage : assombrissement des bords

Fig. 7. – Solution face au *Motion sickness*

D'autres approches de déplacement sont possibles pour limiter le *motion sickness*: « bonds », téléportation, etc. Cependant, il est nécessaire de trouver le juste milieu entre immersion et *motion sickness*.

4.1.4. Choix des instructions

Pour limiter l'ajout de biais, les instructions données aux participants sont fixées à l'avance pour chaque route. Les instructions chantées et parlées sont identiques.

Il a été choisi de donner les instructions en français afin que cela corresponde à la langue maternelle de la majorité des participants, et correspondre ainsi à la langue dans laquelle est leur *GPS* habituel.

4.1.5. Avant le trajet

Les instructions données avant de faire le trajet doivent permettre aux participants de réaliser le chemin sans aide, en l'ayant jamais fait auparavant. Il ne doit donc y avoir aucune ambiguïté sur la route à suivre. Les instructions doivent être claires.

Pour répondre à cette problématique, il a été décidé d'adapter les instructions classiques données par les *GPS*. Toute mention de distance a été supprimée. À la place, les instructions donnaient le numéro de l'intersection à prendre : « Prenez la troisième à gauche. », « Prenez la seconde à droite. », etc.

Les instructions de chaque route sont disponibles dans l'Annexe D1.

4.1.6. Pendant le trajet

En ce qui concerne les instructions données durant le trajet, elles ont pour but de reproduire au mieux le comportement classique du *GPS*. Les instructions sont donc : « Tournez à gauche. », « Tournez à droite. ». Lorsque les routes sont longues, « Dans 100m » est ajouté avant l'instruction.

Les instructions de chaque route sont disponibles dans l'Annexe D2.

4.1.7. Implémentation d'un GPS classique comme témoin

Visuel

Dans l'utilisation d'un *GPS* classique, il y a toujours un appui visuel sur une carte en plus des instructions audio. Nous avons donc essayé de reproduire ce fonctionnement pour être le plus écologique possible (Fig. 4).

La route à suivre a délibérément été mise dans une couleur plutôt discrète (en gris) afin de ne pas attirer le regard : notre but était tout de même que les utilisateurs se focalisent sur les instructions audio et non sur le *GPS* visuel.

L'étendue visualisée avec le *GPS* est volontairement assez limitée, elle ne permet pas d'avoir une grande vue d'ensemble de la ville et du chemin. Cela permet de ne pas donner trop d'informations aux participants, et encore une fois mettre plus l'appui sur les instructions audio.

Ce *GPS* visuel a été placé au niveau du panneau de bord de la voiture, à la position d'un *GPS* classique. La position de la voiture sur celui-ci est symbolisée par un logo simple de voiture (Fig. 4).

L'implémentation plus précise de ce *GPS* est présentée dans l'Annexe C.



Fig. 4. – Visuel du GPS.

Audio

Pour générer les instructions audio, la librairie python [Google Text-to-Speech \(gTTS\)](#) [55] a été utilisée. À partir d'un texte, elle peut générer un fichier audio de ce texte lu, et cela, dans de nombreuses langues. Cela donne un audio monotone mais clair, proche de ce que l'on peut entendre dans un [GPS](#) classique.

Des exemples de liste d'instructions traduites au format audio pour servir d'instructions vocales sont présentés dans l'Annexe D2.

Des points placés dans le monde 3D quelques mètres avant l'intersection permettent de lancer la lecture de ces instructions au bon moment.

En combinant le visuel du [GPS](#) et les instructions audio, un fonctionnement similaire au [GPS](#) classique a été reproduit.

4.2. Création de la musique

Ce n'est finalement pas moi qui ai réalisé cette partie du projet par manque de temps. Mario, un doctorant de mon encadrant à l'[ENAC](#), s'en est occupé.

Le but est de créer les musiques qui donneront les instructions [GPS](#). Dans le cadre de l'expérience, deux types de musique sont nécessaires :

- les musiques écoutées avant le trajet qui contiennent les instructions [GPS](#) les unes à la suite des autres,
- les musiques écoutées pendant le trajet qui contiennent les instructions [GPS](#) et doivent les donner au fur et à mesure que le participant avance sur le chemin, et ce, peu importe sa vitesse.

Le second point s'est avéré nettement plus difficile que le premier. Mes recherches ainsi que la méthode choisie par Mario sont présentées succinctement en Annexe E.

Les musiques générées, ainsi que les instructions audio parlées, peuvent être écoutées ici : [lien audio](#). Les musiques écoutées pour préparer un chemin font un peu moins d'une minute. Les musiques à écouter durant un trajet durent entre trois et quatre minutes.

4.3. Choix des routes

Pour choisir les routes que les participants allaient parcourir, plusieurs critères ont été fixés :

- une distance (ou un temps de trajet) : environ 1km,
- autant de virages à gauche qu'à droite : trois à gauche et trois à droite,
- un nombre d'intersections fixé : dix intersections.

Plus de détails sur le choix des routes sont disponibles dans l'Annexe F.

Pour l'expérience, les participants ont besoin de réaliser quatre chemins différents. Nous avons donc sélectionné quatre routes suivant les critères précédemment cités. Il a été décidé de ne pas faire passer les routes près de l'eau, donc de la Seine, ou par des ronds-points, car cela aurait apporté des repères visuels trop forts.

Malheureusement, la route 3 a dû être modifiée après le premier pilote comme l'une de ses sous-routes tournait naturellement sans pour autant compter comme un virage car il n'y avait pas d'intersection. Cela a causé de la confusion chez le participant. La nouvelle route 3 qui l'a remplacée n'avait plus ce défaut. Cependant, elle possède treize intersections au lieu de dix. La route 3 est donc plus complexe, puisque plus longue que les précédentes. Il a été décidé de la garder ainsi parce que cela permet de voir s'il y a un impact différent des méthodes d'aides à la navigation en fonction de la complexité de la route.

De plus, la distribution du nombre de choix possible à chaque intersection varie légèrement d'une route à l'autre comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous (Fig. 5). Cela contribue au fait que les routes sont de différentes difficultés.

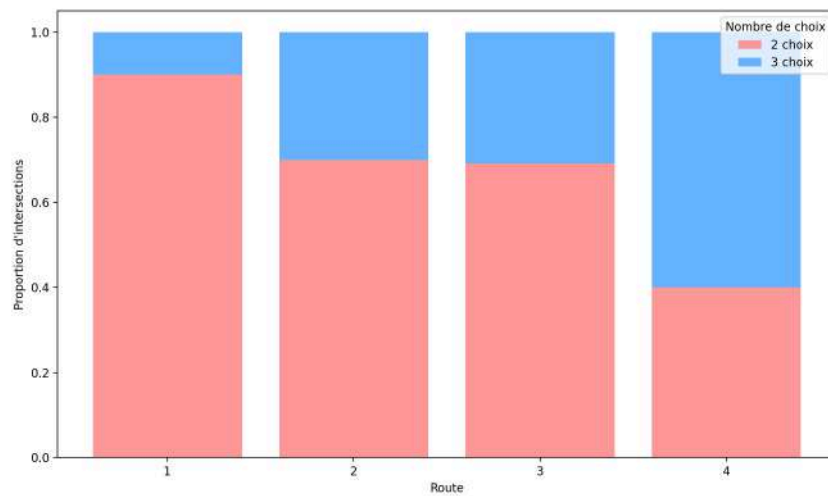


Fig. 5. – Distribution du nombre de choix possible à chaque intersection pour les différentes routes.

Voici la longueur de chaque route :

- route 1 : 935 m
- route 2 : 937 m
- route 3 : 1216 m
- route 4 : 1022 m

Les routes choisies peuvent être visualisées dans Python sur la Fig. 6 et sur Unity dans la Fig. 8. Comme on peut le voir sur la figure Fig. 7, les différentes routes ne se croisent pas.



Fig. 6. – Routes choisies pour l'expérience.

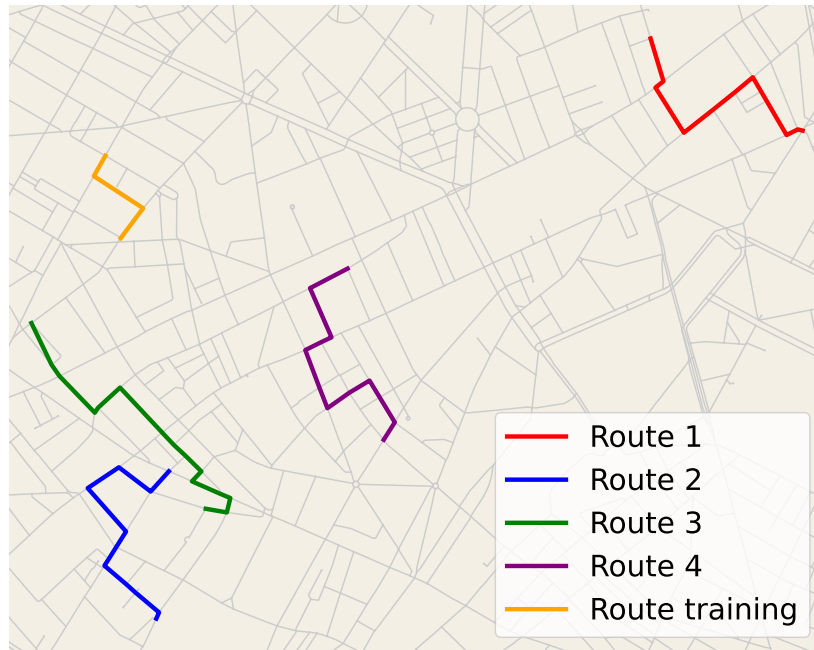
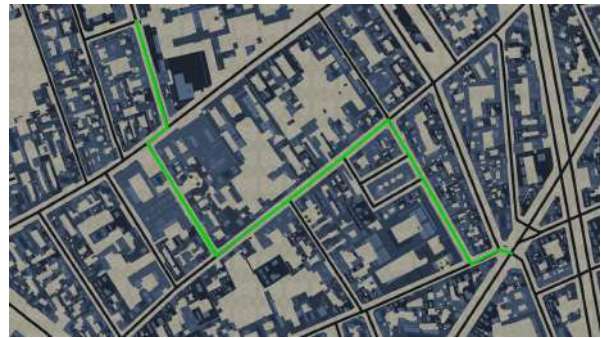


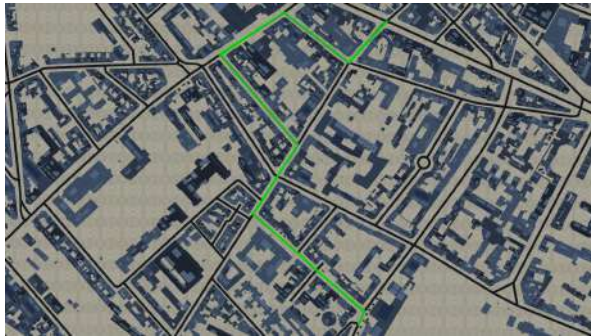
Fig. 7. – Ensemble des routes choisies pour l'expérience.



(a) Route d'entraînement



(b) Route 1



(c) Route 2



(d) Route 3



(e) Route 4

Fig. 8. – Routes choisies pour l'expérience visualisée dans Unity.

La question de créer plus de routes pour qu'il n'y ait pas de biais en fonction des routes a été relevée. Cependant, créer plus de routes aurait pris trop de temps à préparer, notamment au niveau de la création des musiques avec les instructions. L'idée a donc été abandonnée.

En ce qui concerne le chemin d'entraînement, permettant aux participants de prendre en main le véhicule et de se familiariser avec la forme des instructions, il a été choisi de le garder très court (400m) avec seulement un virage à gauche et un à droite (Fig. 6, Fig. 8a). Cela permet de ne pas trop allonger la durée de l'expérience tout en laissant suffisamment de temps aux participants pour prendre en main le véhicule et les instructions. La plupart des participants maîtrisaient le véhicule après avoir réalisé deux fois ce chemin d'entraînement.

4.4. Évaluation de la mémorisation spatiale

Comme expliqué dans l'étude bibliographique, il existe de nombreuses méthodes pour évaluer la mémorisation spatiale. Dans le cadre de ce stage, nous avons choisi de nous baser sur la méthode suivante : refaire faire le trajet aux participants sans aucune indication.

Pour cela, nous éteignons le *GPS* visuel présent dans la voiture (Fig. 9) et le participant ne recevra aucune instruction audio.



Fig. 9. – Cockpit sans GPS visuel

Lorsque le participant se trompe dans la direction à prendre à une intersection, la voiture est déplacée quelques mètres avant l'intersection manquée. Il peut alors prendre la bonne direction. On ne peut pas le laisser continuer dans la mauvaise direction car il n'atteindra probablement pas la destination finale. Il serait de plus difficile de comparer les résultats des participants entre eux s'ils ont pris des chemins différents.

Pour évaluer la mémorisation, nous nous sommes donc concentrés sur la connaissance du chemin pris (*route knowledge*). Nous n'avons pas évalué les autres formes de connaissance de l'environnement (*survey knowledge* et *landmark knowledge*).

4.5. Questionnaires

Grâce à l'étude bibliographique, trois questionnaires couramment utilisés ont pu être sélectionnés :

- *SBSOD scale* (Annexe G2) : il permet d'obtenir l'avis des participants sur leurs capacités d'orientation et de navigation. Certaines études ont montré un comportement différent entre les personnes avec des niveaux variés en navigation, cette information peut donc être utile pour l'analyse des résultats.
- *NASA-TLX scale* (Annexe G3) : il permet d'évaluer la charge cognitive des participants pendant l'expérience. Ce questionnaire permet d'obtenir l'impact des différentes méthodes de navigation sur la charge cognitive, et ainsi de les comparer (savoir quelle méthode demande le plus d'effort, laquelle est la plus frustrante, etc).
- *UEQ-S* (Annexe G4) : il permet d'obtenir l'avis des participants pour chaque méthode d'aide à la navigation utilisée.

Une étude a montré que les réponses à un questionnaire varient selon qu'il s'agisse de la première exposition à celui-ci ou non [56]. Il aurait donc été préférable de faire passer le *NASA-TLX scale* et le *UEQ-S* une première fois juste après le chemin d'entraînement afin d'éviter ce biais. Cependant, cela aurait rallongé la durée de l'expérience, nous avons préféré ne pas le faire.

Comme expliqué dans l'étude bibliographique, pour qu'on puisse imaginer transférer les résultats trouvés en *VR* à la réalité, il faut que l'expérience en VR soit suffisamment proche de la réalité, qu'elle ne soit pas affectée par des désagréments. Nous souhaitons demander aux participants de remplir le I-Group presence questionnaire et le SSQ questionnaire. Cependant, ces questionnaires sont longs à répondre et toutes les questions n'étaient pas pertinentes pour notre étude. Nous avons donc choisi de ne garder qu'une partie des questions de ces questionnaires :

- SSQ : 5 questions sur 16
- I-Group presence questionnaire : 2 questions sur 14

En effet, le but de notre étude n'était pas de proposer un nouveau simulateur en VR mais de comparer des méthodes d'aide à la navigation. Nous n'avions donc pas besoin de résultats aussi précis, d'où le choix de ne prendre qu'un sous-ensemble de questions. Ces questionnaires sont répondus à la fin de l'expérience pour avoir le ressenti global sur l'expérience en [VR](#).

Tous les questionnaires ont dû être remplis au format papier par les participants : nous souhaitons permettre aux participants de prendre une pause de la [VR](#) afin de diminuer le risque qu'ils tombent malades.

5. Expérimentation

Pour réaliser une telle expérimentation, il est nécessaire d'obtenir l'accord du CER (Comité d'Éthique de la Recherche). Nous n'avons pas pu avoir cette autorisation à temps. Nous avons tout de même procédé à l'expérimentation car la conférence visée (CHI, conférence sur les interactions hommes-machines) ne le nécessitait pas.

5.1. Pilote

Avant de réaliser l'expérimentation, nous avons dû conduire un pilote. Un pilote est lorsque l'on fait faire l'expérience à des personnes afin de déterminer certaines variables. Un pilote a été réalisé pour déterminer notamment :

- le nombre de fois que les participants devaient écouter les instructions avant de faire le trajet
- le nombre de fois que les participants devaient refaire un même trajet

Nous ne voulions pas trop allonger le temps d'expérimentation et donc ne pas prendre des routes plus longues. Cependant, la première personne à avoir essayé l'expérience n'a fait aucune erreur en écoutant trois fois les instructions. Nous avons donc décidé de réduire ce nombre d'écoutes à un. Les trajets n'étaient pas assez longs et complexes pour que les participants ne fassent pas de sans-fautes la fois suivante : il a donc été décidé de ne faire passer les participants qu'une seule fois sur chaque route. Cela permet aussi d'alléger l'expérience.

Le pilote a permis aussi d'adapter certains paramètres pour que l'expérimentation soient plus agréable pour les participants. Par exemple, la puissance de la voiture ainsi que la manière de donner les consignes ont été ajustées. Les consignes étaient initialement présentées sur un panneau directement dans l'environnement *VR*, afin que le participant puisse les lire. Toutefois, cette méthode prenait plus de temps qu'une simple explication orale des consignes. De plus, elle aurait entraîné un allongement du temps passé en *VR*, ce que nous cherchons à limiter afin d'éviter que les participants tombent malades. Nous avons donc décidé de simplement expliquer les consignes à l'oral aux participants. Certaines lignes droites étaient assez longues et ennuyeuses, nous avons augmenté la puissance de la voiture, et ainsi sa vitesse, pour que les longues lignes droites paraissent plus courtes et nous avons ajusté un paramètre des roues pour qu'elles soient dirigeables de manière correcte.

Le pilote nous a aussi permis de voir que les routes n'étaient pas toutes de la même difficulté. Il est trop difficile de les équilibrer parfaitement. La condition testée pouvait rendre certaines routes plus faciles à mémoriser que d'autres, tandis que pour une autre condition, les routes considérées comme plus faciles à mémoriser seraient différentes. Lors de l'écoute des instructions audio - avant de faire le trajet - des répétitions ou des alternances d'instructions peuvent favoriser la mémorisation, tandis que lors de l'écoute d'instructions pendant le trajet, les originalités visuelles vont favoriser la mémorisation. Comme évoqué précédemment, le pilote a permis d'identifier qu'une des routes était problématique et apportait de la confusion lorsque les participants la parcouraient. Elle a donc été changée à la suite de ce pilote.

5.2. Participants

Pour recruter les participants, un mail a été envoyé à l'ensemble des personnes travaillant dans la recherche à l'*ENAC*, du porte à porte a été fait dans le bâtiment Z et une affiche a été accrochée à la cantine. Cela a permis de recruter dix-huit participants.

Il n'y a pas eu de critère de sélection autre que la personne doit avoir une bonne vue ou corrigée à la normale ainsi qu'une bonne ouïe ou corrigée à la normale.

Le premier formulaire Annexe G1 rempli par les participants a permis de savoir que, sur dix-huit personnes, quinze avaient le permis de conduire et que dix avaient déjà fait de la *VR* (Fig. 10). Les deux des trois participants qui n'avaient pas le permis s'apprêtaient à le passer ou venaient de le rater. La

plupart des participants avaient donc déjà une expérience en termes de conduite de voiture. En ce qui concerne la *VR*, certains participants n'avaient fait de la *VR* que quelques minutes tandis que d'autres ont eu des expériences plus longues. Nous n'avons pas constaté de difficulté à la prise en main de la *VR* par les participants.

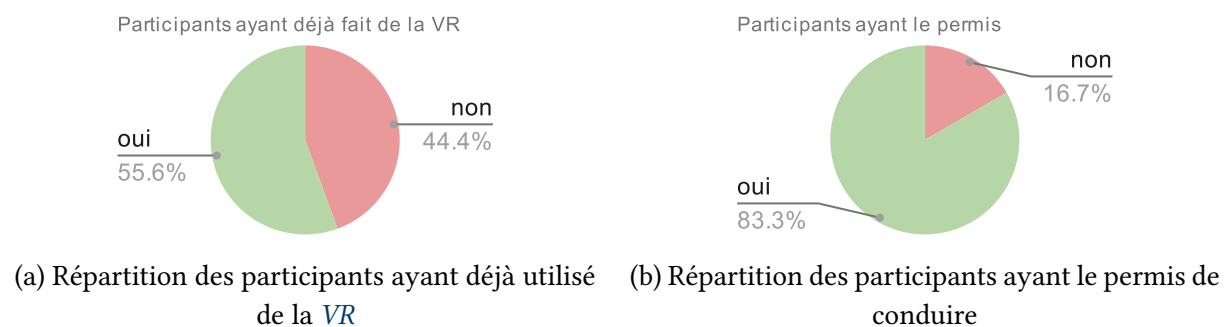


Fig. 10. – Caractéristiques des participants

Comme on peut le voir sur Fig. 11, la majorité des participants utilisent le GPS de manière régulière.

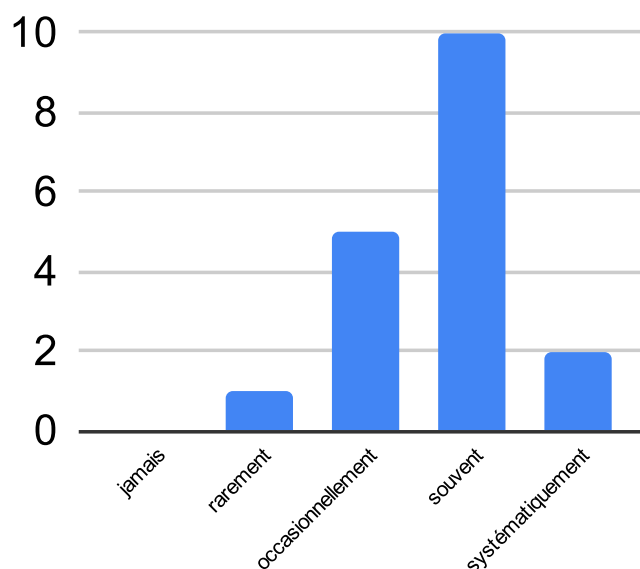


Fig. 11. – Répartition des participants par fréquence d'utilisation du GPS.

Par hasard, sur l'ensemble des participants, la parité a été presque respectée (10 femmes, 8 hommes). Cependant, nous ne nous y attendions pas donc nous n'avons pas pu équilibrer les conditions en fonction du genre. Celui-ci pourrait éventuellement avoir un impact sur les résultats. En ce qui concerne l'âge des participants, nous n'avons pas récolté cette donnée. Cependant, une grande majorité des participants étaient des doctorants à l'*ENAC*, donc plutôt jeunes. L'âge des participants peut avoir un impact sur les résultats, tant au niveau de la navigation [57] qu'au niveau de la mémorisation [12]. Il aurait donc pû être intéressant de recruter des participants d'âge varié afin de vérifier l'impact de l'âge. Cependant, nous avons eu des difficultés à recruter des participants, nous ne pouvions pas nous permettre de vouloir équilibrer les tranches d'âge.

Pour tester toutes les configurations possibles, il aurait fallu $4! * 2 * 2 = 96$ participants. En effet, il y a quatre routes différentes et pour chaque condition il y a deux possibilités, soit les instructions sont chantées en premier, soit elles sont parlées. Cela n'est pas possible. Nous avons donc essayé de

contrebalancer seulement les conditions : le fait que les instructions soient d'abord chantées ou parlées. Cela fait tomber le nombre de configurations à 2 pour chaque condition. L'ordre des deux conditions n'est pas échangeable car la navigation avec les instructions avant de faire le chemin a toujours lieu en premier, par choix. En effet, il a été pensé que cette condition demanderait un effort plus important de la part des participants, il ne faut donc pas que ceux-ci soient trop fatigués au moment de la réaliser, d'où la nécessité de la placer en premier. Ce choix empêche de comparer les deux conditions (instructions pendant et avant le chemin) mais permet de réduire le nombre de participants nécessaire. Ainsi, il faut simplement un nombre pair de participants.

Je ne me suis pas chargée de calculer le nombre nécessaire de participants pour garantir une détection fiable d'un effet potentiel mais il a été estimé à 20 participants.

5.3. Protocole expérimental

L'expérience s'est déroulée en plusieurs étapes. La figure Fig. 12 présente un aperçu de ces étapes, qui sont détaillées dans les figures Fig. 13, Fig. 14 et Fig. 15. Au cours de l'expérience, les participants ont dû remplir plusieurs questionnaires, tous situés en annexe (Annexe G).

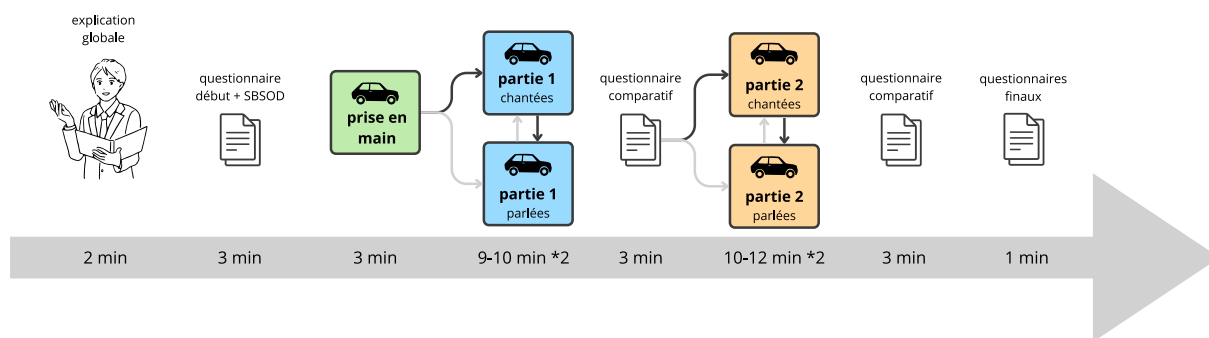


Fig. 12. – Protocole expérimental : Vue d'ensemble

Dans un premier temps, nous avons donné aux participants les informations globales de l'expérience : l'expérience se déroule en *VR* où il faudra conduire une voiture sur différents chemins avec différentes aides à la navigation, le but étant d'être capable de faire les trajets sans aucune aide à la navigation par la suite. Puis, ils ont dû signer un consentement avant même de commencer. Le participant réalisera deux chemins dans le cadre de la première partie (un avec des instructions parlées et l'autre avec des instructions chantées) et deux dans le cadre de la seconde partie (avec encore une fois un avec des instructions parlées et l'autre avec des instructions chantées). La première partie a toujours lieu avant la seconde, cependant au sein d'une même partie, le fait que les instructions soient d'abord chantées ou parlées sera alterné entre chaque participant, tout comme l'ordre des routes parcourues. Cela permet de réduire les biais qui pourraient apparaître en raison de la fatigue, des chemins, etc. Sur Fig. 12, les chemins en gris sont les alternatives d'ordre possibles pour les conditions.

Ensuite, les participants ont dû remplir deux questionnaires : l'un est le *SBSOD scale* pour réaliser une autoévaluation de leur capacité à s'orienter et à naviguer dans un environnement, le second permet de savoir s'ils ont le permis ou non, s'ils ont déjà fait de la *VR* et leur rythme d'utilisation du GPS.

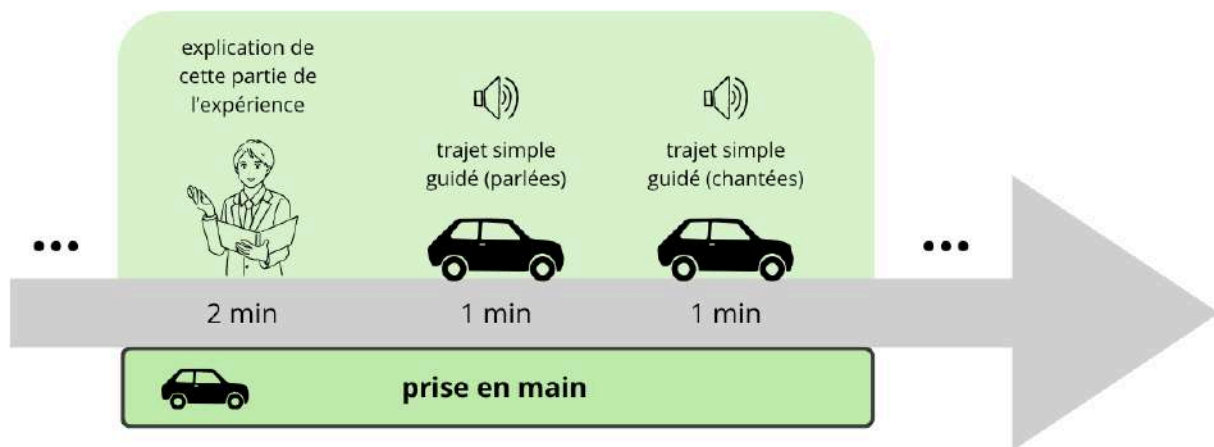


Fig. 13. – Protocole expérimental - Entraînement

Une fois les questionnaires remplis, le participant peut s'équiper du casque *VR* et du casque audio et effectuer un premier chemin simple en *VR*. Le chemin consistait en un virage à gauche et un virage à droite. Il permet de prendre en main la voiture, les pédales et le volant. Ce chemin permet aussi de voir à quoi les instructions audio ressemblent. Ainsi, le participant réalise deux fois ce même chemin : une fois avec des instructions audio parlées et la seconde avec les instructions chantées. Au bout de ces deux trajets, la plupart des participants maîtrisent la voiture. Le participant est averti qu'il peut rouler sur les trottoirs et qu'il n'a pas besoin de respecter le code de la route.

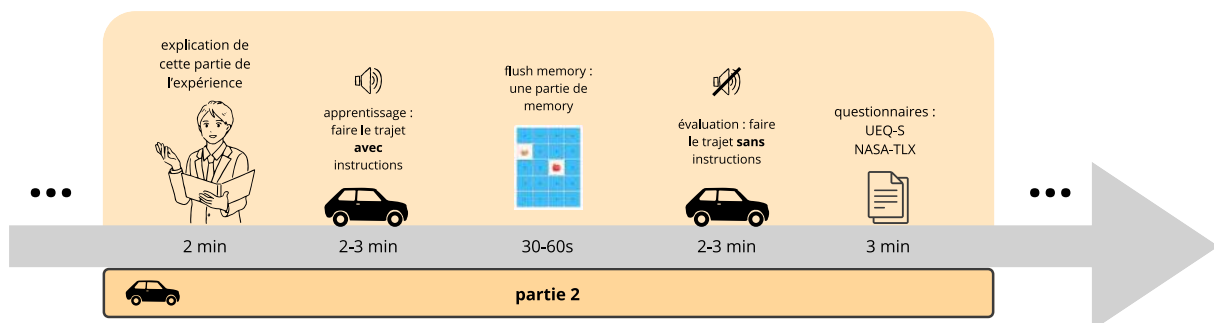


Fig. 14. – Protocole expérimental - Première partie

Après le parcours de ce premier chemin d'entraînement, le participant retire le casque *VR*.

Pour la première partie de l'expérience (Fig. 14), le participant doit d'abord écouter une liste d'instructions audio (parlées ou chantées) correspondant au chemin qu'il devra faire en *VR* par la suite. Il ne peut écouter les instructions qu'une seule fois.

Puis, il doit jouer à un jeu de *Memory* (faire des paires identiques de carte). Cette activité a pour but de rendre la tâche plus difficile, et d'éviter que la mémoire immédiate soit utilisée pour se souvenir du chemin, comme l'étude bibliographique l'a soulevé.

Ensuite, le participant met le casque *VR* et doit parcourir le chemin en *VR* sans aucune aide. En cas d'erreur, une croix est affichée et la voiture est replacée juste avant l'intersection où le participant a fait une erreur (Fig. 16a).

Une fois arrivé à destination, soit après avoir atteint un rond vert dessiné sur le sol (Fig. 16b). Le participant retire le casque *VR*, remplit deux questionnaires : *NASA-TLX scale* et *UEQ-S*.

Enfin, il doit refaire la même chose suivant l'autre condition : si les instructions étaient chantées, elles sont désormais parlées et inversement.

Après ces deux trajets, le participant doit répondre à quelques questions (Annexe G5) pour comparer les deux méthodes d'aides à la navigation qu'il vient de tester. Le participant passe ensuite à la seconde partie de l'expérience (Fig. 15).

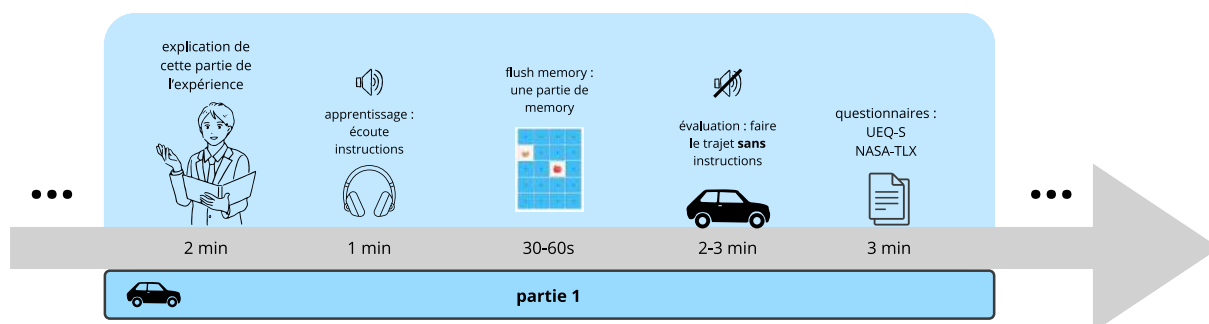


Fig. 15. – Protocole expérimental - Seconde partie

Pour la seconde partie de l'expérience, le participant doit dans un premier temps parcourir le chemin en *VR* à l'aide d'instructions audio, mais il peut aussi s'appuyer sur le GPS visuel. Ensuite, comme dans la partie précédente et pour les mêmes raisons, il doit jouer au Memory. Enfin, il doit refaire le chemin en *VR* sans aucune aide.

Puis, il refait la même procédure avec l'autre condition.

Il doit ensuite remplir à nouveau le questionnaire comparatif entre les deux conditions (Annexe G5).

L'expérience est alors finie, il ne lui reste plus qu'à remplir un court questionnaire sur son expérience en *VR* (Annexe G6).

Sur les figures Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 et Fig. 15, on peut voir le temps approximatif que prend chaque étape.

Si le participant emprunte le mauvais chemin, que ce soit au moment où il essaie de faire le chemin de mémoire ou le moment où il découvre le chemin en étant guidé dans la seconde partie, une croix rouge est affichée et il est ramené juste avant l'intersection où il a pris la mauvaise direction (Fig. 16a). Il peut alors tenter une nouvelle direction.



(a) Visuel en cas de mauvais chemin emprunté :
Croix rouge



(b) Visuel à l'approche de la destination :
Cercle vert

Fig. 16. – Visuels pouvant apparaître sur le chemin

5.4. Données sauvegardées

Afin d'analyser les résultats, plusieurs types de données sont enregistrés tout au long de l'expérience :

- la position de la voiture, relevée chaque seconde
- l'orientation du casque [VR](#), mesurée toutes les 0.5 seconde
- les actions du participant (accélération, freinage, rotation du volant)
- les erreurs commises aux intersections
- le flux visuel présenté au participant via le casque [VR](#)

Un script Python dédié a ensuite été développé pour traiter et visualiser l'ensemble de ces données.

5.5. Expérience

Une fois le protocole établi et les participants recrutés, l'expérience a pu être réalisée.

J'ai fait passer les participants sur deux semaines au mois d'août. Dans la pratique, l'expérience dure entre 40 minutes et 1 heure.

Les premiers passages m'ont permis de perfectionner le script pour les suivants.

5.5.1. Amélioration du script lu aux participants

Par exemple, dans la deuxième partie de l'expérience, lorsque les participants étaient guidés sur le chemin et que l'instruction était « Dans 100m, tournez à gauche/droite », les participants avaient tendance à tourner aussitôt et donc à prendre la mauvaise direction. J'ai donc précisé ce point pour les passages suivants, ce qui n'a pas suffi à arrêter ces erreurs mais les a réduites.

Lors de la conduite, certains participants avaient tendance à effectuer des mouvements brusques avec le volant, provoquant un comportement en slalom du véhicule et favorisant l'apparition de nausées. J'ai donc insisté sur l'importance de manipuler le volant avec douceur et progressivité.

5.5.2. Problèmes techniques rencontrés

Le simulateur de conduite, avec les différentes formes d'aides à la navigation, a dû être implémenté assez rapidement pour respecter le temps imparti du stage. L'application n'a donc pas pu être testée suffisamment, notamment en condition réelle. Ainsi, plusieurs problèmes ont été rencontrés lors de l'expérience :

- de manière occasionnelle, le casque [VR](#) utilisé présentait des discontinuités dans les positions fournies à Unity, se traduisant par des déplacements soudains vers un autre point de l'espace virtuel. L'origine de ces sauts de position n'a pas pu être clairement identifiée. Il avait lieu lorsque le casque [VR](#) était manipulé. Nous replaçons alors la position du participant au niveau de la voiture.
- lorsque les hors-piste pris par les participants étaient trop importants, la sauvegarde de la position de la voiture avant le franchissement de l'intersection n'était pas enregistrée. Ainsi, quand celui-ci se trompait à cette intersection, il était ramené beaucoup plus en arrière : à l'intersection précédente. Il pouvait ensuite reprendre son chemin sans aucun souci.
- afin de simplifier la liste des actions possibles pour le participant, nous n'avions pas mis à sa disposition la possibilité d'effectuer une marche arrière. Cependant, certains participants ont loupé des virages et foncé dans des murs, se retrouvant coincés. Nous avons donc dû leur activer la marche arrière pour qu'ils puissent reculer et continuer l'expérience.

Ces problèmes étaient désagréables mais n'ont pas empêché la réalisation de l'expérience.

Une fois tous les participants passés, nous avons pu analyser les résultats. Nous les présentons dans la partie suivante.

6. Résultats

Les résultats de chaque participant ont été rassemblés et analysés. Je vais présenter les premiers résultats que nous avons pu trouver dans cette partie ainsi que les analyses que nous aimerions faire dans le futur.

J'ai essayé d'analyser les résultats de la manière la plus rigoureuse possible (sélection des tests appropriés, vérification de la normalité des distributions lorsque nécessaire, etc.). Toutefois, ayant découvert récemment une très grande partie des notions liées à l'analyse expérimentale, il est possible que certains points importants m'aient échappés.

6.1. SBSOD scale

À partir des réponses au [SBSOD scale](#), il est possible de calculer un score de capacité spatiale pour chaque participant. Sur la Fig. 17, on peut observer la distribution de ces scores. Ce score peut prendre des valeurs entre -3 et 3, avec -3 correspondant à une faible compétence spatiale et 3 à une grande. Les participants étaient plutôt moyens de manière générale, même si certains ont eu un score très élevé et d'autres très faibles.

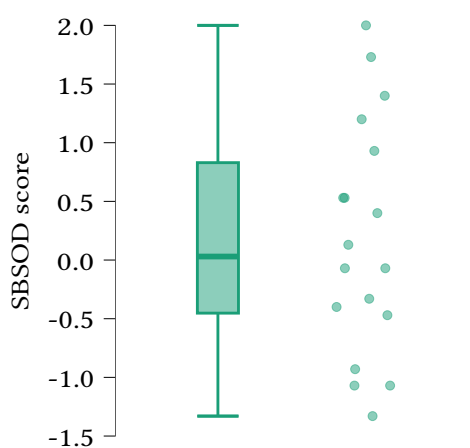


Fig. 17. – Distribution des scores SBSOD

En fonction de ce score, les comportements des participants peuvent varier, l'impact des quatre aides à la navigation peut être différent [58]. C'est une possibilité, il faut donc s'assurer que les groupes de participants ont des scores au [SBSOD scale](#) similaires. Des analyses ont permis de montrer que c'était bien le cas (Annexe H1).

6.2. Préférences utilisateurs

L'étude du ressenti des utilisateurs face aux différentes aides à la navigation est essentielle. En effet, l'amélioration de la mémorisation spatiale ne doit pas se faire au détriment des autres dimensions de l'expérience utilisateur. Dans ce but, nous allons analyser les résultats du questionnaire [UEQ-S](#) ainsi que les réponses au questionnaire comparatif entre la méthode avec instructions chantées et parlées (Annexe G5).

6.2.1. UEQ-S

Ce questionnaire permet de récupérer l'avis des utilisateurs sur huit points distincts. Nous avons demandé aux participants de le remplir après chaque route, soit une fois pour chaque aide à la navigation.

Les chercheurs ayant mis au point le questionnaire [UEQ-S](#) ont aussi mis à disposition deux fichiers *Excels* [59] permettant d'analyser les résultats ainsi qu'un document explicatif [60].

Dans le cadre du questionnaire *UEQ-S*, ils répartissent les huit propriétés évaluées par les utilisateurs en deux catégories : les qualités pragmatiques et les qualités hédoniques. Ainsi, les qualités pragmatiques incluent les propriétés suivantes :

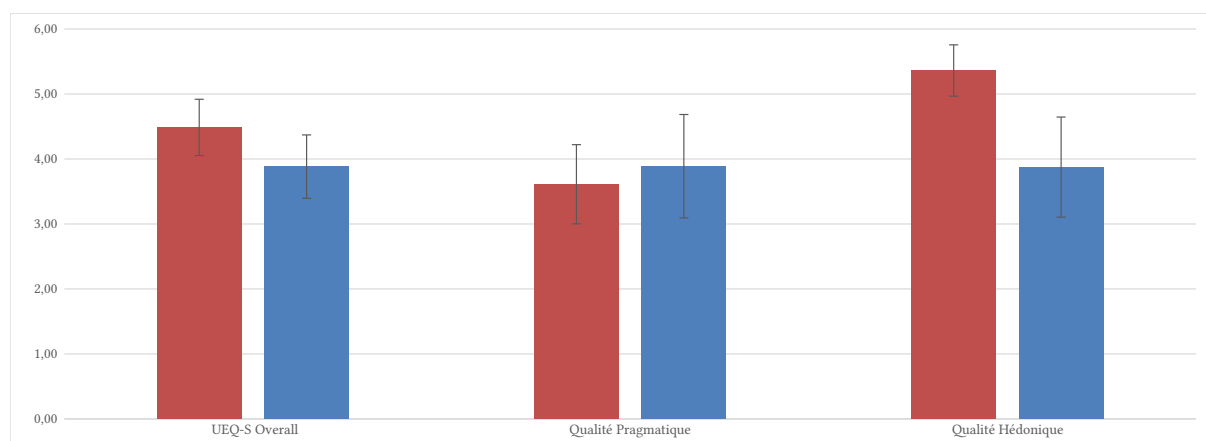
- Rigide/Facilitant
- Compliqué/Simple
- Inefficace/Efficace
- Déroutant/Clair

Les qualités hédoniques incluent les propriétés suivantes :

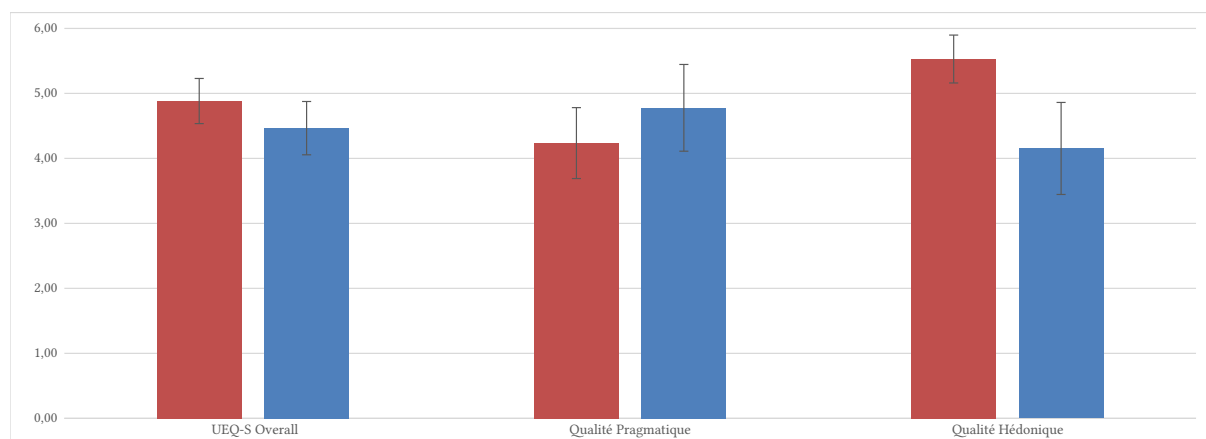
- Ennuyeux/Captivant
- Inintéressant/Intéressant
- Conventionnel/Original
- Habituel/Avant-gardiste

Les résultats détaillés pour chacune des huit propriétés sont disponibles à l'Annexe H2.

Lorsque l'on cherche à comparer les deux types d'instructions, la seule catégorie qui mène à des résultats significatifs est celle de la qualité hédonique, et ce quelque soit l'expérience, avec respectivement $p=0.0023$ et $p=0.0024$ (Fig. 18). Cela nous permet de conclure que les participants ont trouvé les instructions sous formes chantées plus stimulantes et innovantes.



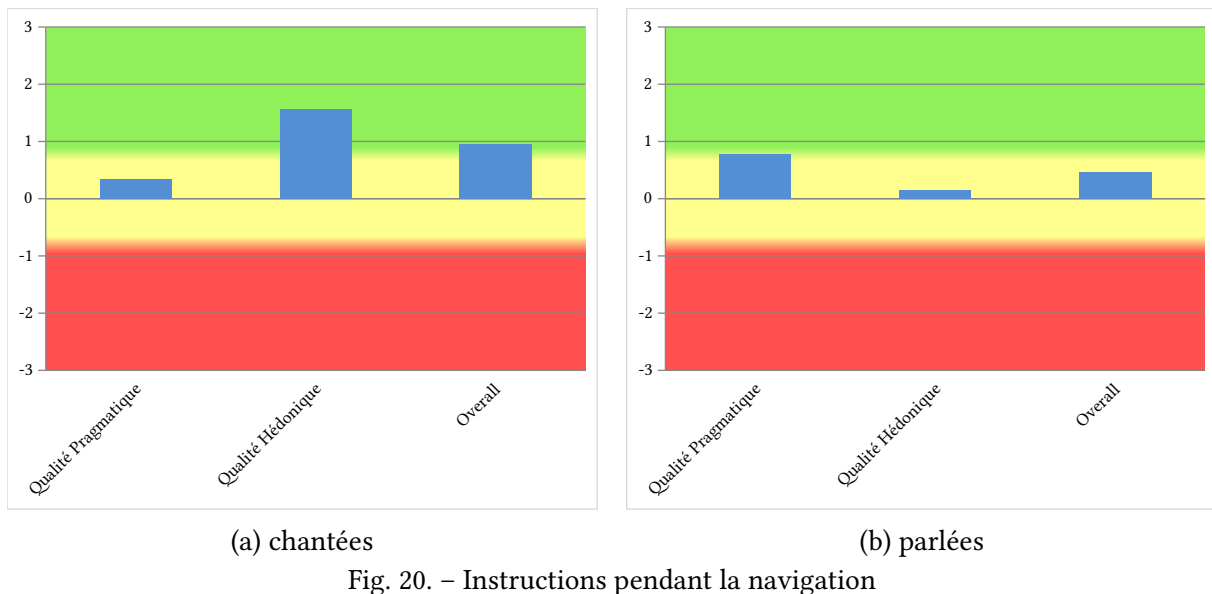
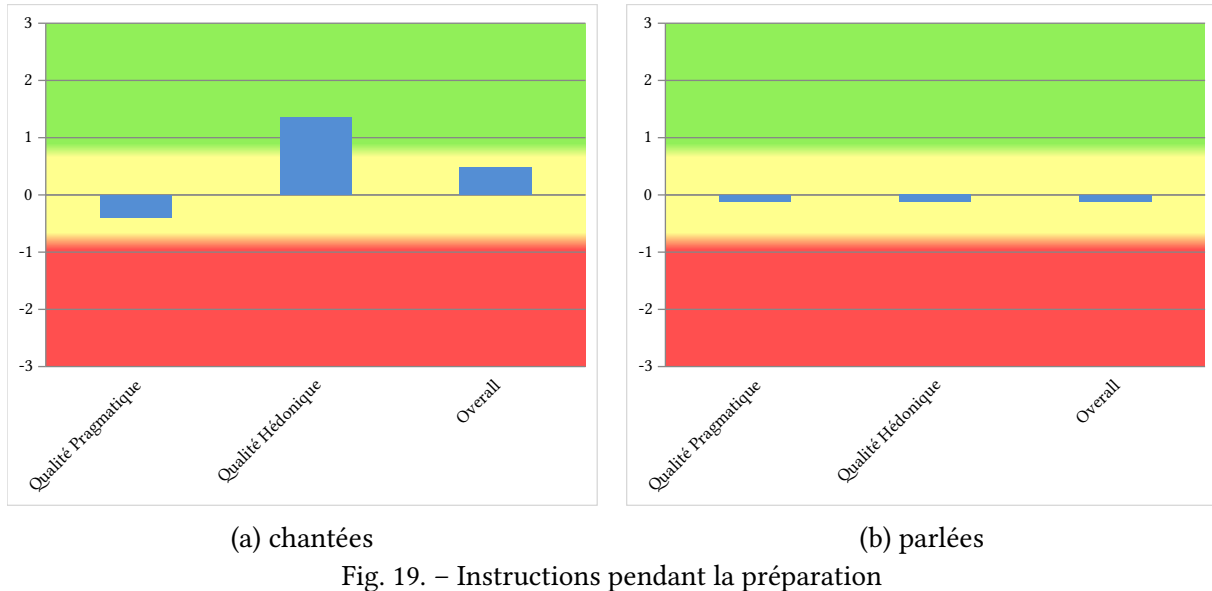
(a) Instructions pendant la préparation



(b) Instructions durant la navigation

Fig. 18. – Comparaison des valeurs moyennes des réponses utilisateurs pour les différentes catégories, **rouge** : chantées, **bleu** : parlées

Le fait que les valeurs des moyennes des qualités pragmatiques et hédoniques (Fig. 19, Fig. 20) soient toutes deux supérieures à -0.8 dans chacun des cas indique que les participants n'avaient pas une mauvaise opinion sur les différentes aides à la navigation testées. C'est une conclusion positive pour l'expérience : utiliser la musique n'aurait pas un impact négatif sur ce que pensent les participants de l'aide à la navigation. L'opinion est même plutôt positive en ce qui concerne les qualités hédoniques dans le cas où les instructions étaient chantées (valeurs supérieures à 0.8).



L'écart-type d'une moyenne permet de mesurer le niveau d'accord entre les participants concernant l'aspect mesuré. Plus celle-ci est grande, moins les participants étaient d'accord entre eux sur l'évaluation du produit. Dans [60], il est énoncé qu'un écart-type :

- inférieur à 0.83 correspond à un bon niveau d'accord,
- entre 0.83 et 1.01 correspond à un niveau d'accord moyen,
- supérieur à 1.01 correspond à un faible niveau d'accord.

Expérience	Méthode	Overall	Pragmatique	Hédonique
Préparation	Chantées	0,94	1,32	0,85
	Parlées	1,06	1,72	1,67
Navigation	Chantées	0.73	1,15	1,78
	Parlées	0.89	1,44	1,53

Tableau 1. – Écart-type des moyennes pour chaque catégorie du todo_ueq_short

Ainsi, à l'aide de la Tableau 1, on peut remarquer que les participants n'étaient pas toujours d'accord entre eux. Cela peut s'expliquer par le fait que la musique fait appel aux goûts personnels des participants. Les goûts varient d'une personne à l'autre, comme les réponses au questionnaire leur demandant leur avis (Annexe G5) ont pu le relever.

Il est conseillé dans [60], pour des valeurs du Cronbach-Alpha inférieures à 0.6, de considérer les résultats de ces qualités avec précaution. Cependant, cela ne concerne pas les expériences avec moins de 40 participants, car le nombre de participants est trop faible pour que le calcul soit fiable. Il est alors conseillé de regarder si les résultats nous semblent cohérents directement, ce qui semble être le cas ici. Si les résultats sont incohérents, les termes employés ont pu être mal compris par les participants. Dans notre cas, les valeurs d'alpha étaient toujours supérieures à 0.6 sauf pour hédonique dans le cas des instructions chantées pendant la préparation qui valait 0.59.

Utiliser le questionnaire complet, et non la version simplifiée *UEQ-S*, permet d'avoir une analyse plus poussée, répartie dans cinq catégories : Attractivité, Efficacité, Clarté, Fiabilité, Stimulation et Nouveauté. Cependant, elle comprend 26 questions au lieu des huit de la version courte, cela aurait allongé considérablement la durée de l'expérience.

Je ne suis pas sûre de la validité de ces résultats (en ce qui concerne la détermination de ce qui est significatif de ce qui ne l'est pas). En effet, la distribution des réponses au questionnaire *UEQ-S* n'est pas normale (*Shapiro-Wilk Test*), ce qui remet en question l'utilisation du t-test pour comparer les groupes.

Le *UEQ-S* semble donc montrer que les participants ont préféré les instructions chantées en ce qui concerne les propriétés hédoniques (captivant, intéressant, original et avant-gardiste). Pour les propriétés pragmatiques (facilitant, simple, efficace et clair), il n'y a pas de différence significative entre les deux méthodes, et ce pour les deux expériences.

6.2.2. Avis des participants

Le questionnaire Annexe G5 a permis de recueillir les avis des participants sur les différentes méthodes d'aide à la navigation testées. Voici un résumé des réponses obtenues.

Avis général

Les avis des participants sont retranscrits dans l'annexe Annexe H4. Nous allons présenter ci-dessous ce qui en ressort.

Avis Partie 1 : instructions chantées

Un participant n'a pas aimé que les instructions n'arrivent pas avec un espacement constant. D'autres participants ont trouvé que la musique pouvait déconcentrer, détourner l'attention des instructions. En effet, certains ont eu tendance à se focaliser sur le rythme et une personne a été un peu déstabilisée par les changements de tonalité. De plus, plusieurs participants ont trouvé que les paroles n'étaient pas toujours faciles à comprendre : pas assez claires, articulées. Un participant a aussi soulevé le fait que, parfois, il n'est pas appréciable d'avoir les instructions intégrées dans la musique : en cas de mauvaise humeur ou d'urgence.

D'un autre côté, certains participants ont trouvé les instructions chantées plus simples à mémoriser. Plusieurs participants ont apprécié la présence de rythme. Des participants ont évoqué le fait que la musique pouvait rester en tête et que les instructions sous forme chantées étaient amusantes, agréables, entraînantes et marquantes.

Avis Partie 1 : instructions parlées

Les remarques négatives sur les instructions parlées sont les suivantes : la voix et le rythme sont monotones, c'est ennuyeux et habituel, la voix est robotique, le débit trop rapide, l'intonation ne varie pas donc les instructions se confondent.

Les remarques positives sont : le débit assez lent, la simplicité, les instructions claires, directes et droit au but.

Certaines critiques, comme celle de la voix monotone, auraient pu être évitées. Nous avons fait au plus simple pour générer les instructions parlées, mais il aurait été possible de les générer avec une voix plus naturelle.

D'autres critiques sont inconciliables : certains participants ont trouvé le débit trop rapide, d'autres suffisamment lent alors que le débit était identique pour tout le monde.

Avis Partie 2 : instructions chantées

Lorsque les instructions étaient chantées pendant le parcours du chemin, les participants ont eu des commentaires plus négatifs que lorsque celles-ci étaient chantées avant le trajet. Certains participants ont trouvé la musique trop envahissante et distrayante. D'autres ont eu tendance à se concentrer plus sur le visuel pour compenser cela. De plus, une partie des participants a trouvé qu'identifier l'information dans la musique n'était pas facile et que les instructions étaient moins claires.

Les participants ont apprécié le fait que cela apporte un rythme, une ambiance, que la musique soit entraînante. Un participant a trouvé qu'il était plus facile de se concentrer sur l'audio ainsi. Un autre a évoqué que la musique restait dans la tête tout comme les paroles.

Avis Partie 2 : instructions parlées

Certains participants ont trouvé les instructions parlées ennuyeuses, difficiles à mémoriser, banales et monotones.

Les instructions parlées ont néanmoins été appréciées car elles étaient habituelles, claires, directes, concises et plus simples à retenir.

Ainsi, il y a des points positifs et négatifs quel que soit le cas : que les instructions soient chantées ou parlées.

Préférences entre les méthodes

Nous avons aussi posé aux participants la question suivante : *Avez-vous préféré les instructions chantées ou parlées ?*

À la fin de chaque partie, ils ont attribué une note sur une échelle entre -3 et 3 indiquant leur préférence entre les instructions parlées (-3) ou chantées (3).

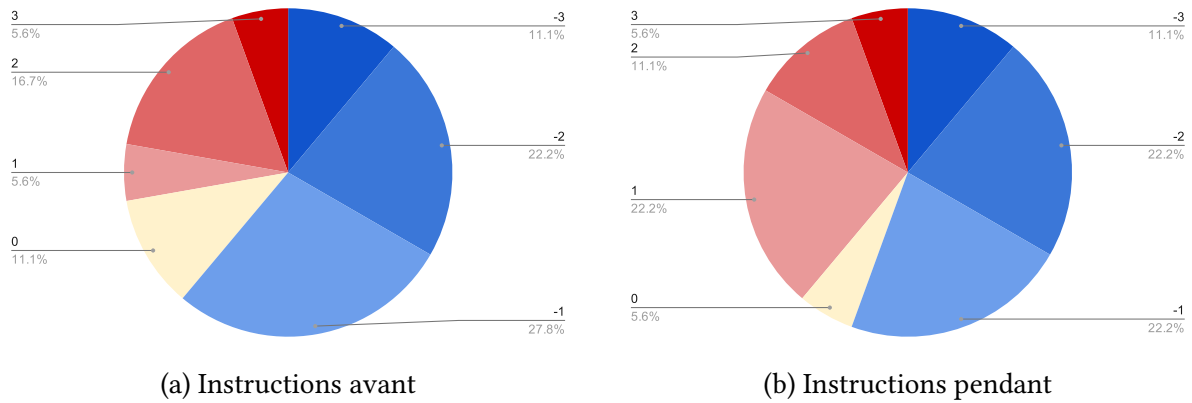


Fig. 21. – Réponse à la question : *Avez-vous préféré les instructions chantées ou parlées ?*
 bleu : parlées, rouge : chantées

Comme on peut le voir sur la Fig. 21, une majorité des participants ont préféré les instructions parlées, que ce soit lorsque les instructions étaient données avant de faire le chemin ou pendant (réponse inférieure à 0). Cette tendance est surtout prononcée lorsque les instructions sont données avant de faire le chemin, où un peu plus d'un quart des participants seulement ont préféré quand les instructions sont chantées.

6.2.3. Préférences pour la mémorisation

Le but de l'étude portait sur l'amélioration de la mémorisation spatiale. Nous avons donc demandé aux participants quelle méthode leur semblait une meilleure aide à la mémorisation.

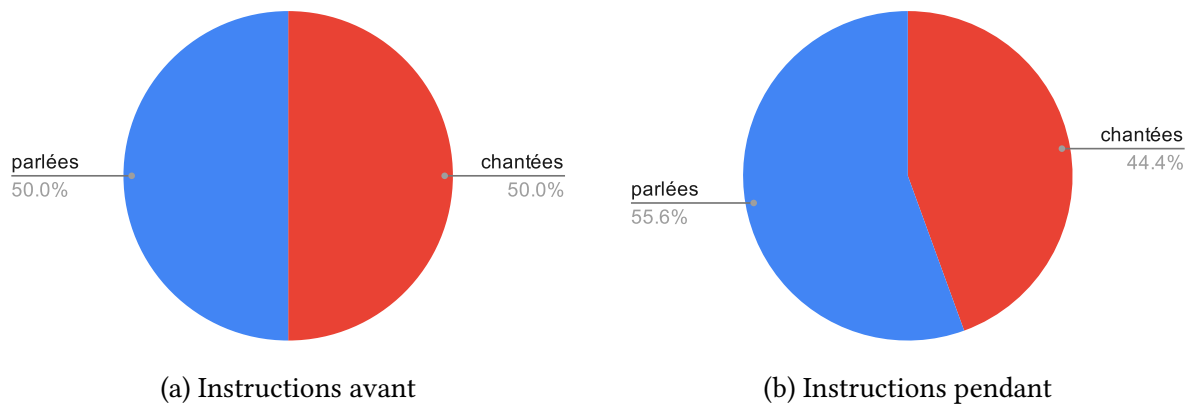


Fig. 22. – Réponse à la question : *Avec quelle méthode avez-vous eu l'impression de mieux mémoriser le chemin ?*
 bleu : parlées, rouge : chantées

Comme on peut le voir sur la Fig. 22, pour les deux parties de l'expérience, il y a environ autant de participants qui ont préféré les instructions parlées que chantées dans le cadre de la mémorisation. Cette question permet d'avoir le ressenti des participants, mais nous analyserons les erreurs faites par les participants dans la suite de ce rapport pour vérifier si ce ressenti est en accord avec la réalité.

6.3. Stratégies de mémorisation

La stratégie de mémorisation utilisée par les participants peut avoir un impact important sur leur capacité à se souvenir du chemin. Nous avons donc demandé aux participants s'ils avaient utilisé une stratégie particulière pour mémoriser le chemin.

Les réponses des participants à la question « Aviez-vous utilisé une stratégie particulière pour mémoriser ? » sont disponibles dans l'Annexe H4. Pour la première partie de l'expérience, lorsque les instructions étaient données avant de faire le chemin, les stratégies utilisées sont :

- se répéter plusieurs fois les instructions,
- convertir la suite d'instructions en séquence plus simple, « Prenez la première à droite puis la seconde à gauche » devient 1D2G par exemple,
- grouper les informations qui se répètent, mémoriser les répétitions (retenir lorsque plusieurs fois la même direction d'affilée ou alors une alternance gauche-droite),
- s'imaginer faire le trajet.

Ces méthodes ont été reprises pour la seconde partie de l'expérience. Le fait que, pour cette deuxième partie, les participants naviguaient sur le chemin pour l'apprendre a permis l'émergence d'une nouvelle stratégie : porter attention aux détails visuels et essayer de reconnaître des points de repère au moment de refaire le chemin. Certains participants ont aussi combiné plusieurs stratégies.

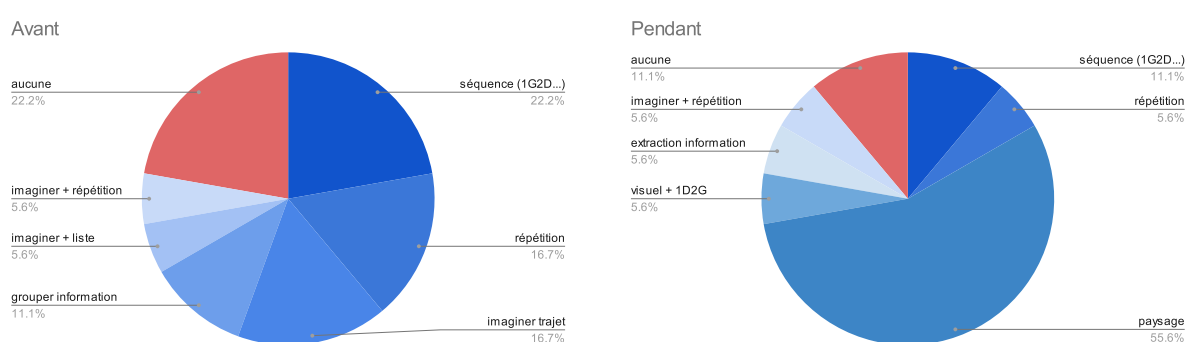


Fig. 23. – Stratégies utilisées par les participants pour mémoriser le trajet

Comme la Fig. 23 le montre, la plupart des participants ont utilisé une stratégie pour mémoriser le chemin. Lors de la première partie, quatre personnes n'ont pas utilisé du tout de stratégies. Pour la seconde partie, deux personnes n'ont pas utilisé de stratégies et la plupart se sont appuyés sur le visuel pour mémoriser le chemin.

Il pourrait être intéressant d'analyser le nombre d'erreurs en fonction de la stratégie utilisée pour voir à quel point les différentes stratégies ont eu un impact. Il pourrait aussi être intéressant de regarder le nombre d'erreurs des participants pour comparer dans le cas des instructions chantées et parlées en retirant les participants ayant utilisé une stratégie par exemple. En effet, si la stratégie est trop puissante, on pourrait ne pas voir de différence entre les deux cas car seule la stratégie utilisée aurait son importance.

6.4. Comment définir l'erreur ?

Comme nous l'avons énoncé dans la partie sur la sélection des routes : les routes sont composées d'un certain nombre d'intersections avec, pour chacune d'entre elles, un nombre de choix possibles. À une intersection avec trois choix possibles, le participant possède 33 % de chances de prendre le bon chemin, contre 50 % de chances à une intersection avec deux choix possibles. Ainsi, trouver le bon chemin parmi deux possibles est plus difficile que parmi trois. Il peut donc être une bonne idée de pondérer les erreurs commises par le nombre de choix possible à l'intersection en question.

De plus, l'erreur peut être définie de nombreuses façons différentes :

- en prenant les erreurs à chaque intersection :
 - en groupant les intersections par 2 ou 3 afin d'éviter de visualiser du bruit et lisser ainsi un peu les résultats,

- en comptant une erreur pour chaque mauvais chemin emprunté (possibilité d'avoir plusieurs erreurs par intersection),
- en comptant une erreur par intersection ratée (au plus une erreur par intersection),
- en prenant le numéro de la première intersection à laquelle le participant échoue (ou la deuxième/troisième),
- en comptant le chemin comme réussi si moins de x erreurs.

Il peut être nécessaire de normaliser les erreurs, par le nombre de choix possible à chaque intersection comme expliqué précédemment, mais aussi par le nombre d'intersections total du chemin. En effet, la route 3 possède 3 intersections de plus, cette normalisation est nécessaire si l'on souhaite comparer les chemins.

De plus, il est important de prendre en compte que certains participants n'ont pas souhaité finir le chemin car ils ne se souvenaient plus du tout des directions à prendre (deux participants répartis sur quatre chemins). Il faut donc décider comment prendre en compte leurs résultats : le plus intuitif serait de leur compter comme faux toutes les intersections ayant suivi leur abandon. On pourrait aussi prendre en compte la probabilité d'avoir pris le bon chemin à chaque intersection pour décider si elle est considérée comme ratée ou réussie. Il est également possible de décider de ne pas prendre en compte ces participants du tout dans l'analyse. Nous avons choisi de compter autant d'erreurs que de choix à chaque intersection non prise par le participant.

Ainsi, l'analyse des résultats pour déceler un impact (ou non) de la musique sur la mémorisation spatiale peut être menée avec différentes définitions de l'erreur.

6.5. Analyse de la mémorisation

Ce n'est pas moi qui ai réalisé l'analyse de cette partie, mais cela a mené à un résultat intéressant que je vais donc présenter. Un modèle linéaire à effet mixte a été utilisé. La variable indépendante correspond au fait que les instructions soient parlées ou chantées. La variable aléatoire correspond au numéro de la route parcourue. La variable dépendante étudiée est le nombre d'erreurs.

Nous avons divisé les chemins en trois parties : début, milieu et fin. Nous avons cherché à comparer le nombre moyen d'erreurs pour chaque portion de route. Dans le cas où les instructions sont données avant de faire le chemin, comme on peut le voir sur la Fig. 24, les participants font significativement plus d'erreurs lorsque les instructions sont parlées plutôt que chantées pour le début du chemin. Il n'y a cependant pas de différence significative quand les instructions sont données pendant le chemin.

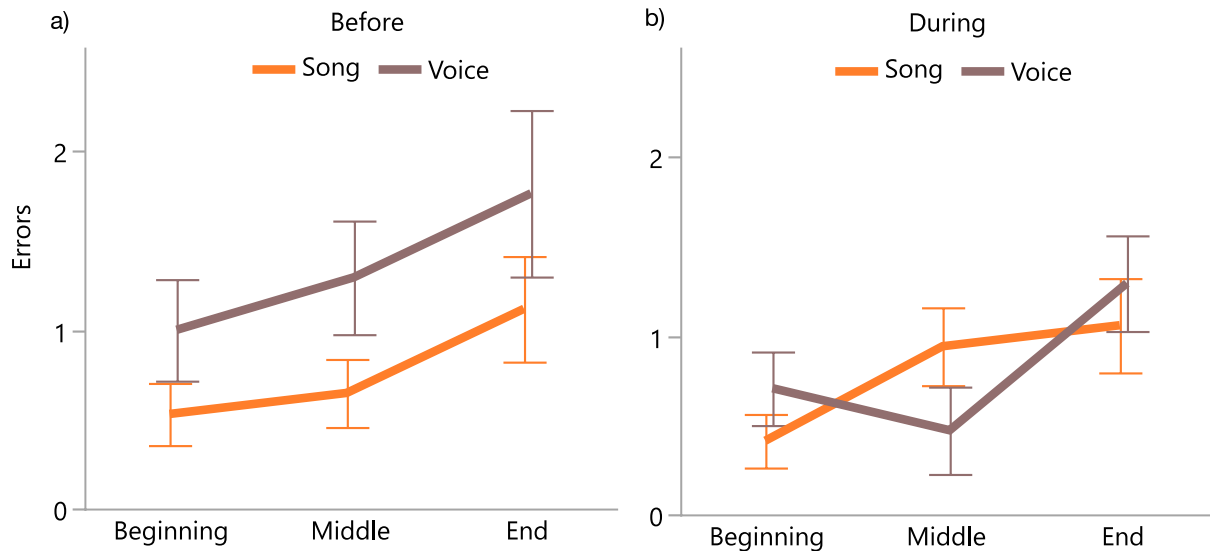


Fig. 24. – Nombre d’erreurs moyen aux intersections suivant qu’elles se situent au début, au milieu ou à la fin du chemin.

Nous n’avons pas réussi à trouver d’autres analyses menant à des différences significatives entre les différents groupes. On peut cependant retenir qu’il n’y a pas non plus de différence significative qui montrerait que la musique a un impact négatif sur la mémorisation des chemins.

6.6. NASA-TLX

Le *NASA-TLX scale* permet de mesurer l’exigence mentale, physique et temporelle ainsi que la performance, l’effort et la frustration ressentie par les participants lors de la réalisation d’une tâche. Nous avons demandé aux participants de remplir ce questionnaire après chaque route, soit une fois pour chaque aide à la navigation.

Les résultats sont représentés entre 0 et 100 sur la Fig. 25. 0 correspond à une exigence, un effort, une frustration très faible, 100 très forte. Pour la performance, l’échelle s’étend de parfait à échec.

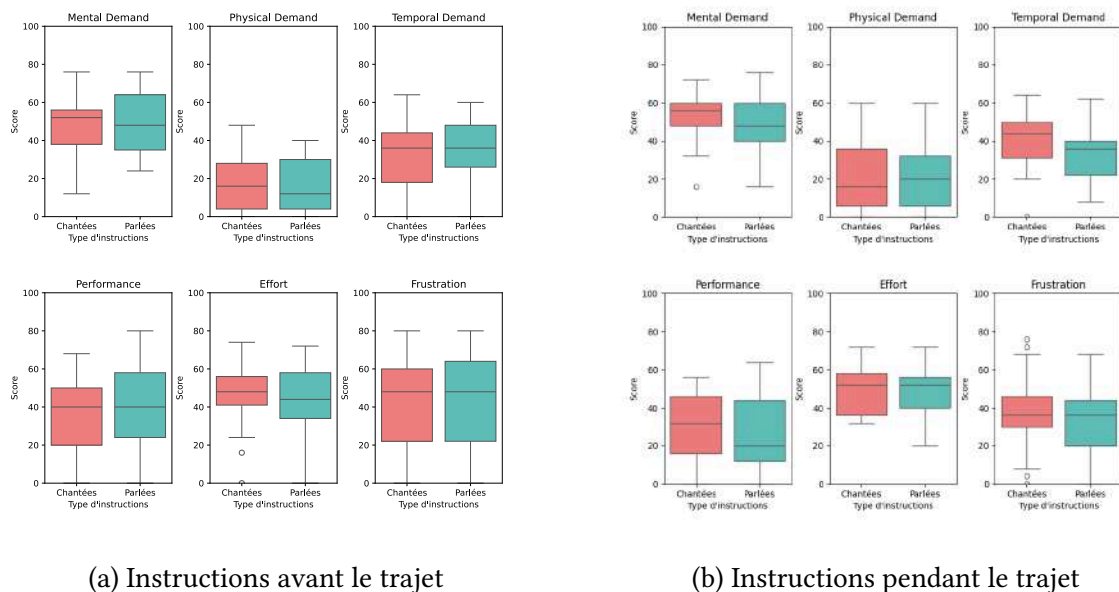


Fig. 25. – Résultats du NASA-TLX

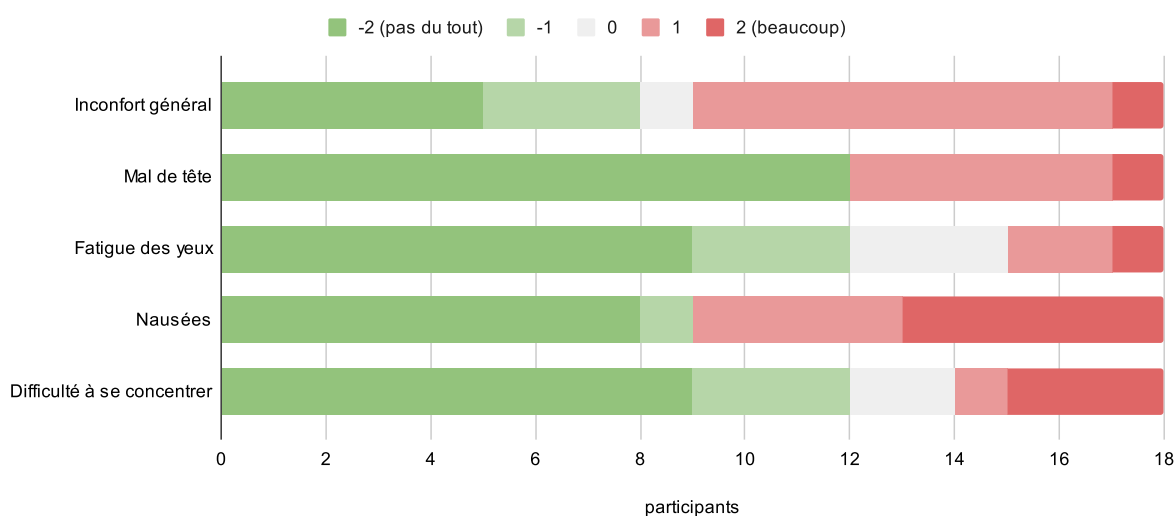
Nous n’avons pas trouvé de résultats significatifs par rapport aux réponses au *NASA-TLX scale* en fonction de la méthode d’aide à la navigation utilisée. Cependant, on peut observer que les participants

ont trouvé que la tâche n'était pas trop exigeante physiquement. De plus, dans le cas où les instructions sont données avant le parcours du chemin, le ressenti de frustration varie beaucoup d'une personne à l'autre (écart-type élevé).

6.7. Impact de la VR

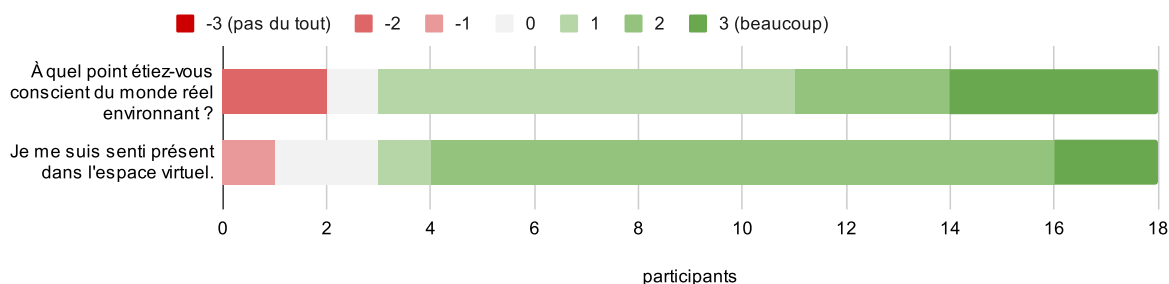
Motion sickness

Globalement, les participants ont été, en majorité, que faiblement affectés par la VR comme le montre la Fig. 26. À la fin de l'expérience, les participants devaient spécifier s'ils avaient subi une liste de symptômes ou non (inconfort, mal de tête, fatigue des yeux, nausées et difficulté à se concentrer). Pour cela, ils ont donné une note à chaque symptôme allant de -2 (symptôme pas du tout ressenti) à 2 (symptôme très fortement ressenti). Seules deux personnes ont demandé à faire une pause entre les deux routes de la deuxième partie de l'expérience. Les autres participants ont fait l'expérience complète sans pause. La nausée a été le symptôme le plus présent parmi les différents participants.



Sentiment de présence

La Fig. 27 permet de constater que la plupart des participants n'étaient pas trop conscients du monde réel lorsqu'ils étaient en VR et qu'ils se sentaient plutôt présents dans l'espace virtuel. Cela est plutôt positif : la qualité du monde virtuel était donc suffisante pour ne pas impacter le ressenti et l'immersion était bien présente. On peut ainsi espérer que les résultats obtenus dans cette expérience en VR soient transposables à la réalité.



6.8. Les analyses que nous aimerions faire

Nous avons commencé l'analyse des résultats que récemment, nous n'avons donc pas pu réaliser pour l'instant toutes les analyses que nous aimerions faire. Cette partie présente ces pistes d'analyse à réaliser.

Score au SBSOD scale Il peut être intéressant d'étudier si le niveau en capacité spatiale a un impact sur les performances de mémorisation pour l'une ou l'autre des méthodes. Cependant, le nombre de participants étant faible, il serait difficile d'avoir des résultats significatifs. Cela permettrait tout de même d'obtenir des résultats exploratoires.

Utilisation du GPS Lors du premier questionnaire que les participants ont rempli, ils ont donné leur fréquence d'utilisation du *GPS* : il pourrait être intéressant de regarder si cette variable a un impact différent en fonction des différentes méthodes d'aides à la navigation testées. Cependant, nous risquons de ne trouver aucun résultats significatifs car la majorité des participants ont répondu la même valeur : souvent.

Vitesse de déplacement Certains participants ont fait très peu d'erreurs, et parfois même aucune sur certains chemins. Compter le nombre d'erreurs à chaque intersection ne permet donc pas forcément de conclure. Cependant, il pourrait être intéressant d'analyser leur vitesse juste avant les intersections afin de voir s'ils ont eu des hésitations ou non.

Trajet Il pourrait être intéressant d'analyser les trajectoires des participants afin de voir si elles diffèrent d'une méthode à l'autre. Cependant, les trajectoires des participants ne reflètent pas toujours la trajectoire que les participants souhaitaient prendre, surtout pour les premiers trajets. En effet, certains participants ont eu quelques difficultés à prendre en main la voiture et à maîtriser tous leurs virages.

Complexité des routes Certains participants ont ressenti une différence de difficulté entre les différentes routes. Cette différence est bien réelle. Il peut être intéressant d'analyser si une route plus complexe donne les mêmes tendances qu'une route plus simple.

Effet de la fatigue L'expérience a duré entre 40 min et 1 heure. Ainsi, sur les derniers chemins à mémoriser, les participants ont pu ressentir de la fatigue : il serait intéressant de regarder si une tendance peut être observée en fonction de si la route a été parcourue en première ou en dernière.

Surprise lors du premier trajet De même, lors du parcours de la première route, plusieurs participants ont indiqué qu'ils ne s'étaient pas assez concentrés. De plus, la longueur des instructions à retenir a pu en surprendre plus d'un. Pour la suite, il savait à quoi s'attendre. Il aurait fallu donner le nombre d'instructions à retenir aux participants à l'avance. Un chemin exemple aurait pu être une bonne solution pour éviter cette surprise mais cela aurait rallongé la durée de l'expérience, ce qui n'était pas souhaitable.

Impact du GPS visuel La rotation du casque *VR* a été enregistrée, nous pourrions donc identifier les participants s'étant beaucoup appuyé sur le *GPS* visuel présent dans la voiture et comparer leurs résultats avec ceux qui y ont peu prêté attention.

Motion sickness Le fait de ressentir des nausées ou des maux de tête peut impacter les résultats. On pourrait comparer les résultats des participants les plus malades avec ceux le moins affectés par la *VR*. Cependant, ces effets secondaires peuvent avoir été provoqués par une mauvaise performance. En effet, lorsque le participant se trompait beaucoup, il passait plus de temps en *VR* que celui qui se trompait moins. Les participants ayant fait beaucoup d'erreurs ont donc été plus susceptibles d'obtenir les effets secondaires de la *VR*.

Langue maternelle Parmi les participants qui ont passé l'expérience, plusieurs ne possédaient pas le français comme langue maternelle, cela a pu réduire leur compréhension des instructions. Il pourrait donc être intéressant de comparer les résultats des participants avec pour langue maternelle le français ou non.

6.9. Limitations

La première limitation que l'on pourrait trouver à notre étude est que nous ne sommes pas sûrs d'avoir exploité les capacités de la musique qui la rendent mémorable : les instructions sont sous forme chantée, mais est-ce suffisant ? En effet, le côté mémorable des musiques peut provenir de la répétition des refrains, de la structure (pont, couplet, refrain, ...), de la mélodie ou encore des paroles qui ne sont pas de simples phrases classiques. Il faudrait donc identifier ce qui fait de la musique quelque chose de mémorable pour mettre l'accent dessus.

De plus, les participants ont des goûts musicaux différents : peut-être que certains ont aimé le style de musique et d'autres pas du tout. Cela pourrait avoir influencé leur ressenti, leur concentration et leur mémorisation.

Ainsi, une nouvelle expérience pourrait être faite pour comparer différentes formes et styles de musique afin d'identifier ce qui peut rendre la musique mémorable.

Une seconde limitation à notre étude est le fait que la mémorisation ait été testée après seulement 30 secondes de pause, mais il aurait fallu vérifier la mémorisation à plus long terme aussi (après une semaine, un mois, ...).

Une troisième limitation a pu être identifiée : l'étude a été faite avec majoritairement des participants âgés de 20 à 30 ans. Or, l'âge peut avoir un impact sur la mémorisation comme nous l'avons vu précédemment, il aurait donc pu être intéressant de faire l'étude avec différentes tranches d'âges.

Enfin, de manière générale, l'obtention de résultats significatifs et fiables aurait nécessité une amélioration de l'expérience. D'une part, un plus grand nombre de participants aurait permis une meilleure représentativité. D'autre part, une meilleure qualité expérimentale aurait conduit à des données plus robustes. Voici quelques pistes d'améliorations possibles :

- avoir des routes plus équivalentes entre elles.
- avoir des routes plus longues, plus complexes, certains participants ont fait des sans-fautes.
- améliorer la clarté des instructions, certains participants s'en sont plaints, surtout du côté de la musique.
- améliorer la qualité de la musique, certains participants ne l'ont pas trouvée suffisante, spécialement lorsque la musique était présente pendant le parcours du chemin, elle a pu être énervante.

7. Conclusion

En conclusion, ce stage a permis d'identifier un axe d'amélioration possible concernant la mémorisation des chemins parcourus à l'aide d'une aide à la navigation en modifiant celle-ci : en intégrant la musique aux instructions.

Afin de vérifier cette hypothèse, à savoir si l'intégration de musique aux instructions, a un impact positif sur la mémorisation des chemins, une expérience a été mise en place. Dix-huit participants ont été recrutés pour passer cette expérience.

Les premières analyses des résultats de l'expérience ont permis de constater que, pour les premières intersections, lorsque les instructions sont données avant de parcourir le chemin, les participants ont fait significativement plus d'erreurs avec les instructions sous formes parlées que chantées. La musique permettrait donc de mieux mémoriser le chemin à venir, en mettant particulièrement l'accent sur les premières intersections. Lors des instructions données pendant le parcours du chemin, aucun effet significatif n'a été trouvé sur la mémorisation.

Cette étude a permis d'établir des résultats préliminaires encourageants concernant l'impact de la musique sur la mémorisation des chemins parcourus. Néanmoins, il reste encore de nombreuses pistes à explorer pour vérifier l'hypothèse posée dans ce rapport.

Nous n'avons pas trouvé d'effet positif clair de la musique sur la mémorisation des chemins, mais nous avons au moins montré qu'elle ne l'altère pas, du moins dans le cadre de notre protocole expérimental.

Références

1. Équipe OPTIM - Optimisation | ENAC. <https://www.enac.fr/fr/equipe-optim-optimisation>
2. Abou El-Ela M (2018) The Absent Presence of the Spatial Cognition of Cities in Hybrid Space. International Journal of Scientific and Engineering Research
3. Burnett GE, Lee K (2005) The Effect of Vehicle Navigation Systems on the Formation of Cognitive Maps. In: Traffic and Transport Psychology. Elsevier, p 407-418
4. Ying Q, Dong W, Fabrikant SI (2024) How Do In-Car Navigation Aids Impair Expert Navigators' Spatial Learning Ability?. Annals of the American Association of Geographers 114:1483-1504. <https://doi.org/10.1080/24694452.2024.2356858>
5. Griesbauer E-M, Manley E, Wiener JM, Spiers HJ (2021) Learning 'The Knowledge' : How London Taxi Drivers Build Their Cognitive Map of London. <https://doi.org/10.1101/2021.06.04.447168>
6. Kim K, Bock O (2021) Acquisition of landmark, route, and survey knowledge in a wayfinding task: in stages or in parallel?. Psychological Research 85:2098-2106. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01384-3>
7. Kapaj A, Hilton C, Lanini-Maggi S, Fabrikant SI (2024) The influence of landmark visualization style on task performance, visual attention, and spatial learning in a real-world navigation task. Spatial Cognition & Computation 24:227-267. <https://doi.org/10.1080/13875868.2024.2328099>
8. Servais A (2023) Etude du détournement du regard comme marqueur oculaire de la bascule attentionnelle du monde extérieur vers le monde mental interne
9. Tanberg P, Yeung RC, Fernandes MA (2025) Evidence of temporal and emotional alignment between song cues and their evoked autobiographical memories. Memory & Cognition. <https://doi.org/10.3758/s13421-025-01717-w>
10. Hoque DE Memorization: A Proven Method of Learning
11. Appleyard D (1970) Styles and Methods of Structuring a City. Environment and Behavior 2:100-117. <https://doi.org/10.1177/001391657000200106>
12. Meade M, Meade J, Sauzeon H, Fernandes M (2019) Active Navigation in Virtual Environments Benefits Spatial Memory in Older Adults. Brain Sciences 9:47. <https://doi.org/10.3390/brainsci9030047>
13. Sivashankar Y, He P, Sauzéon H, Fernandes M (2024) Motoric engagement, but not decision-making, during encoding influences route memory. Spatial Cognition and Computation 24:. <https://doi.org/10.1080/13875868.2024.2359929>
14. Musliu A, Berisha B, Latifi D (2017) The Impact of Music in Memory. European Journal of Social Sciences Education and Research 10:222. <https://doi.org/10.26417/ejser.v10i2.p222-227>
15. Thaut MH, Peterson DA, McIntosh GC, Hoemberg V (2014) Music mnemonics aid Verbal Memory and Induce Learning – Related Brain Plasticity in Multiple Sclerosis. Frontiers in Human Neuroscience 8:. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00395>
16. Calvert SL, Tart M (1993) Song versus verbal forms for very-long-term, long-term, and short-term verbatim recall. Journal of Applied Developmental Psychology 14:245-260. [https://doi.org/10.1016/0193-3973\(93\)90035-T](https://doi.org/10.1016/0193-3973(93)90035-T)

17. Clemenson GD, Maselli A, Fiannaca AJ, et al (2021) Rethinking GPS navigation: creating cognitive maps through auditory clues. *Scientific Reports* 11:7764. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87148-4>
18. Albrecht R, Väänänen R, Lokki T (2016) Guided by music: pedestrian and cyclist navigation with route and beacon guidance. *Personal and Ubiquitous Computing* 20:121-145. <https://doi.org/10.1007/s00779-016-0906-z>
19. Stefanucci JK, Brickler D, Finney HC, et al (2022) Effects of simulated augmented reality cueing in a virtual navigation task. *Frontiers in Virtual Reality* 3:971310. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.971310>
20. Singh AK, Liu J, Tirado Cortes CA, Lin C-T (2021) Virtual Global Landmark: An Augmented Reality Technique to Improve Spatial Navigation Learning. In: *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, Yokohama Japan, p 1-6
21. Huang H, Schmidt M, Gartner G (2013) Spatial Knowledge Acquisition with Mobile Maps, Augmented Reality and Voice in the Context of GPS-based Pedestrian Navigation: Results from a Field Test. *Cartography and Geographic Information Science* 39:107-116. <https://doi.org/10.1559/15230406392107>
22. Mazurkiewicz B, Galvão MDL, Giannopoulos I (2023) BeeAR: Augmented Reality Beeline Navigation for Spatial Knowledge Acquisition. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction* 7:1-17. <https://doi.org/10.1145/3604246>
23. Jones M, Jones S, Bradley G, et al (2008) ONTRACK: Dynamically adapting music playback to support navigation. *Personal and Ubiquitous Computing* 12:513-525. <https://doi.org/10.1007/s00779-007-0155-2>
24. Heller F, Schöning J (2018) NavigaTone: Seamlessly Embedding Navigation Cues in Mobile Music Listening. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, Montreal QC Canada, p 1-7
25. Ünal AB, Platteel S, Steg L, Epstude K (2013) Blocking-out auditory distracters while driving: A cognitive strategy to reduce task-demands on the road. *Accident Analysis & Prevention* 50:934-942. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.07.020>
26. Dobbelsstein D, Henzler P, Rukzio E (2016) Unconstrained Pedestrian Navigation based on Vibrotactile Feedback around the Wristband of a Smartwatch. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, San Jose California USA, p 2439-2445
27. Bengler K, Haller R, Zimmer A (1994) Experimental optimization of route guidance information using context information
28. Burnett G (2000) 'Turn right at the Traffic Lights': The Requirement for Landmarks in Vehicle Navigation Systems. *Journal of Navigation* 53:499-510. <https://doi.org/10.1017/S0373463300001028>
29. Burns P (1997) Navigation and the older driver. Unpublished PhD dissertation, Loughborough University, UK
30. Karkasina D, Kokla M, Tomai E (2021) Investigating drivers' geospatial abilities in unfamiliar environments. *AGILE: GIScience Series* 2:1-10. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-2-3-2021>
31. Wunderlich A, Grieger S, Gramann K (2023) Landmark information included in turn-by-turn instructions induce incidental acquisition of lasting route knowledge. *Spatial Cognition & Computation* 23:31-56. <https://doi.org/10.1080/13875868.2021.2022681>

32. Rousell A, Zipf A (2017) Towards a Landmark-Based Pedestrian Navigation Service Using OSM Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6:64. <https://doi.org/10.3390/ijgi6030064>
33. Mazurkiewicz B, Kattenbeck M, Giannopoulos I (2023) Free Choice Navigation in the Real World: Giving Back Freedom to Wayfinders. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12:27. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020027>
34. Topete A, He C, Protzko J, et al (2024) How is GPS used? Understanding navigation system use and its relation to spatial ability. *Cognitive Research: Principles and Implications* 9:16. <https://doi.org/10.1186/s41235-024-00545-x>
35. Hegarty M, Richardson AE, Montello DR, et al (2002) Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence* 30:425-447. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(02)00116-2)
36. Liu J, Singh AK, Wunderlich A, et al (2022) Redesigning navigational aids using virtual global landmarks to improve spatial knowledge retrieval. *npj Science of Learning* 7:17. <https://doi.org/10.1038/s41539-022-00132-z>
37. Gardony AL, Brunyé TT, Taylor HA, Taylor A (2013) How Navigational Aids Impair Spatial Memory: Evidence for Divided Attention
38. Hegarty M, Waller D (2004) A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence* 32:175-191. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2003.12.001>
39. Friedman A, Kohler B, Gunalp P, et al (2020) A computerized spatial orientation test. *Behavior Research Methods* 52:799-812. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01277-3>
40. Wunderlich A, Gramann K (2021) Landmark-based navigation instructions improve incidental spatial knowledge acquisition in real-world environments. *Journal of Environmental Psychology* 77:101677. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101677>
41. Mazurkiewicz B, Kattenbeck M, Kiefer P, Giannopoulos I (2020) Not Arbitrary, Systematic! Average-Based Route Selection for Navigation Experiments. *LIPICs, Volume 177, GIScience 2021* 177:1-16. <https://doi.org/10.4230/LIPICS.GISCIENCE.2021.I.8>
42. Mazurkiewicz B, Giannopoulos I (2021) Route Selection-From Replication to Recreation. *Cycling@ CHI: Towards a Research Agenda for HCI in the Bike Lane at CHI'21, May 8–13, 2021, Yokohama, Japan* ACM, New York, NY, USA, 5 pages
43. Glazier A, Ashkenazi N, Karlsson P (2017) UX in Google Earth VR. <https://www.youtube.com/watch?v=ZDZQWOjbdzc>
44. Käser DP, Parker E, Glazier A, et al (2017) The making of Google earth VR. In: *ACM SIGGRAPH 2017 Talks*. ACM, Los Angeles California, p 1-2
45. Di Luca M, Seifi H, Egan S, Gonzalez-Franco M (2021) Locomotion Vault: the Extra Mile in Analyzing VR Locomotion Techniques. In: *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, Yokohama Japan, p 1-10
46. Atkinson RC, Shiffrin RM (1968) Human Memory: A Proposed System and its Control Processes1. In: Spence KW, Spence JT (éd) *Psychology of Learning and Motivation*. Academic Press, p 89-195
47. Ferreri L, Bigand E, Bard P, Bugaiska A (2015) The Influence of Music on Prefrontal Cortex during Episodic Encoding and Retrieval of Verbal Information: A Multichannel fNIRS Study. *Behavioural Neurology* 2015:1-11. <https://doi.org/10.1155/2015/707625>

48. Hurter C, Rogowitz B, Truong G, et al (2024) Memory Recall for Data Visualizations in Mixed Reality, Virtual Reality, 3D and 2D. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 30:6691-6706. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3336588>
49. Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, Lilienthal MG (1993) Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology* 3:203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
50. Laugwitz B, Held T, Schrepp M (2008) Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire. In: Holzinger A (éd) *HCI and Usability for Education and Work*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p 63-76
51. Schrepp M, Hinderks A, Thomaschewski J (2017) Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 4:103. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.09.001>
52. Schubert T, Friedmann F, Regenbrecht H (2001) The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 10:266-281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
53. Mazurkiewicz B, Kattenbeck M, Giannopoulos I (2021) Navigating Your Way! Increasing the Freedom of Choice During Wayfinding. *LIPICs, Volume 208, GIScience 2021* 208:1-16. <https://doi.org/10.4230/LIPICS.GISCIENCE.2021.II.9>
54. Mapbox. <https://www.mapbox.com/>
55. gTTS: Google Text-to-Speech. <https://pypi.org/project/gTTS/>
56. Richard G, Pietrzak T, Argelaguet F, et al (2022) Within or Between? Comparing Experimental Designs for Virtual Embodiment Studies. In: *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, p 186-195
57. Burns PC (1999) Navigation and the Mobility of Older Drivers. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences* S49-S55. <https://doi.org/10.1093/geronb/54B.1.S49>
58. Brunyé TT, Gardony AL, Holmes A, Taylor HA (2018) Spatial decision dynamics during wayfinding: intersections prompt the decision-making process. *Cognitive Research: Principles and Implications* 3:13. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0098-3>
59. UEQ-Team (2025) Two Excel-Sheets that make the analysis of your results easy. https://www.ueq-online.org/Material/Data_Analysis_Tools.zip
60. Schrepp M (2015) *User Experience Questionnaire Handbook*
61. Project OSRM. <https://project-osrm.org/>
62. Suno (2023) AI Music. <https://suno.com/>
63. Udio AI Music Generator. <https://www.udio.com/>
64. MakeSong. <https://www.makesong.com/fr/ai-music-generator>
65. Junmin Gong SWSXJG Wenxiao Zhao (2025) ACE-Step: A Step Towards Music Generation Foundation Model
66. dreamtonics (2020) Synthesizer V Pro. <https://dreamtonics.com/synthesizerv/>
67. StAkira (2025) stakira/OpenUtau. <https://github.com/stakira/OpenUtau>

Annexes

A Choix de la ville 3D

Plus le monde 3D est réaliste, plus les réactions des participants sont proches de leurs comportements en environnement réel. Cependant, il faut aussi pouvoir contrôler de nombreux éléments afin de ne pas avoir des paramètres en plus qui influencent les résultats.

Dans la recherche d'une ville 3D, nous avons dû nous contenter des approches gratuites.

Pour obtenir cette modélisation 3D, une première solution est de la construire à partir d'assets. La ville doit être suffisamment grande pour contenir plusieurs routes assez longues à parcourir. Pour concevoir une ville assez grande, cette approche aurait été trop longue à réaliser.

Nous avons donc cherché à trouver une ville déjà modélisée en 3D. Des quartiers japonais ont été modélisés dans des assets créés par *ZENRIN CO.* et sont disponibles sur l'Asset Store d'Unity ([Matsuri City FUKUOKA par ZENRIN CO., LTD.](#)). Le rendu était visuellement satisfaisant, la ville était agréable à naviguer, il n'y avait aucun artefact visuel dérangeant. Cependant, la partie modélisée était trop petite et insuffisante pour obtenir suffisamment de routes différentes pour l'expérience.

Nous avons ensuite exploré des approches se basant sur le monde réel. Des modèles 3D de villes ont été créés à partir de données réelles:

- par photogrammétrie : trop d'artefacts visuels, qualité des photos et des textures souvent trop mauvaise, présence de voitures, de personnes, etc. .
- par Lidar : pas de textures, pas mal d'artefacts.
- à partir des blueprints, en fixant une hauteur pour chaque bâtiment : approximatif, peu de détails, pas de textures.

Le Tableau 2 récapitule les différentes approches envisagées et Fig. 28 montre quelques exemples visuels.

Après quelques recherches, utiliser MapBox pour créer la ville 3D s'est révélé le plus prometteur : il se base sur les blueprints des bâtiments, leur donne une hauteur et son intégration dans Unity permet aussi d'appliquer des textures, bien que celles-ci soient répétitives et fictives.

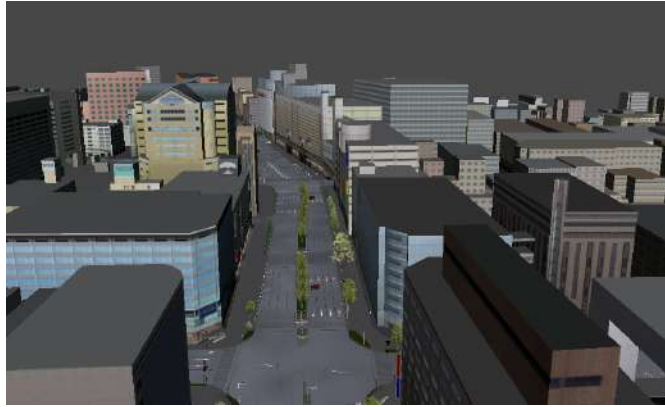
MapBox permet aussi de récupérer les routes. Un filtre a été créé et appliqué pour ne conserver que les routes automobiles (et supprimer les routes correspondant en réalité à des rails de train ou des routes piétonnes). Conserver toutes les routes aurait été moins esthétique et aurait surchargé le modèle 3D de la ville. Un environnement surchargé aurait pu nuire à l'expérience utilisateur et briser l'immersion.

Ce choix a également permis de choisir de ne pas mettre de relief au sol : il n'y a pas de dénivelé, ce qui simplifie la navigation dans la ville.

Finalement, j'ai donc récupéré les données géographiques d'une partie de Paris assez dense en bâtiments, en faisant attention à ce que l'on puisse choisir des chemins sans que les routes soient trop distinctives. J'ai donc extrait une zone de rayon 2.5 km autour des coordonnées (48.842, 2.2965) en (Latitude, Longitude) à l'aide de MapBox (Fig. 2).

Méthode	Esthé- tisme	Réalisme	Rapidité de mise en place	Absence d'artefacts	Textures	Superficie
Construire une ville à partir de modèle 3D	+++	+ ou - (suivant les assets)	-	+	++	adaptable
Ville 3D modéli- sée : Matsuri City FUKUOKA	++	+	+	+	++	petite
Photogrammétrie	-	+	+	- (voitures, per- sonnes, etc.)	-	adaptable
Lidar	-	+	+	-	- (inexistantes)	adaptable
MapBox : surface 2D réelle des bâ- timents et extru- sions	+	- (uniquement bâtiments et routes)	+	+	+	adaptable

Tableau 2. – Choix possibles pour la ville 3D



(a) Ville 3D modélisée : Matsuri City FUKUOKA



(b) Photogrammétrie



(e) MapBox

Fig. 28. – Choix possible pour la ville 3D

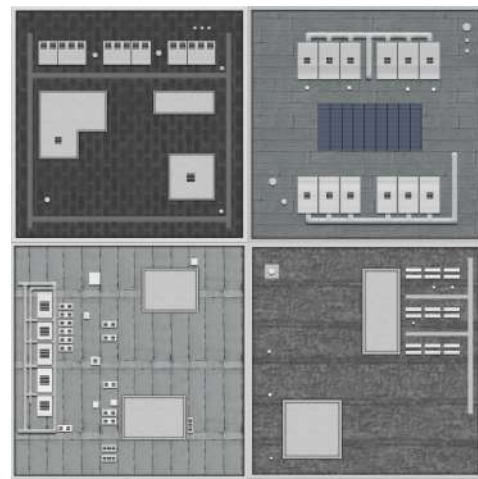
B Amélioration de la ville 3D

B1 Les bâtiments

En ce qui concerne les textures des bâtiments, la texture proposée par défaut par Unity lors de l'import de données MapBox a été utilisée (Fig. 27). Cette texture est assez répétitive et permet donc de limiter les repères visuels présents dans l'environnement. Des exemples de bâtiments peuvent être observés Fig. 28.



(a) Vue de côté



(b) Vue de dessus

Fig. 27. – Texture des bâtiments



Fig. 28. – Exemple de bâtiments dans la ville 3D

B2 Éléments décoratifs

Des éléments décoratifs ont été ajoutés dans la ville 3D. Une attention a été portée pour éviter que les éléments décoratifs altèrent le comportement de l'utilisateur. Par exemple, des feux rouges ou des panneaux stop auraient pu modifier la conduite de certains participants.

Les éléments ajoutés comprennent (Fig. 29) :

- des barrières, un arrêt de bus, issus de l'asset [CITY package](#) de 255 pixel studios, disponible sur l'[Unity Asset Store](#).
- un banc, une poubelle, un arbre, un lampadaire, issus de l'asset [Modular Lowpoly Streets \(Free\)](#) de [EVPO Games](#), disponible lui aussi sur l'[Unity Asset Store](#).

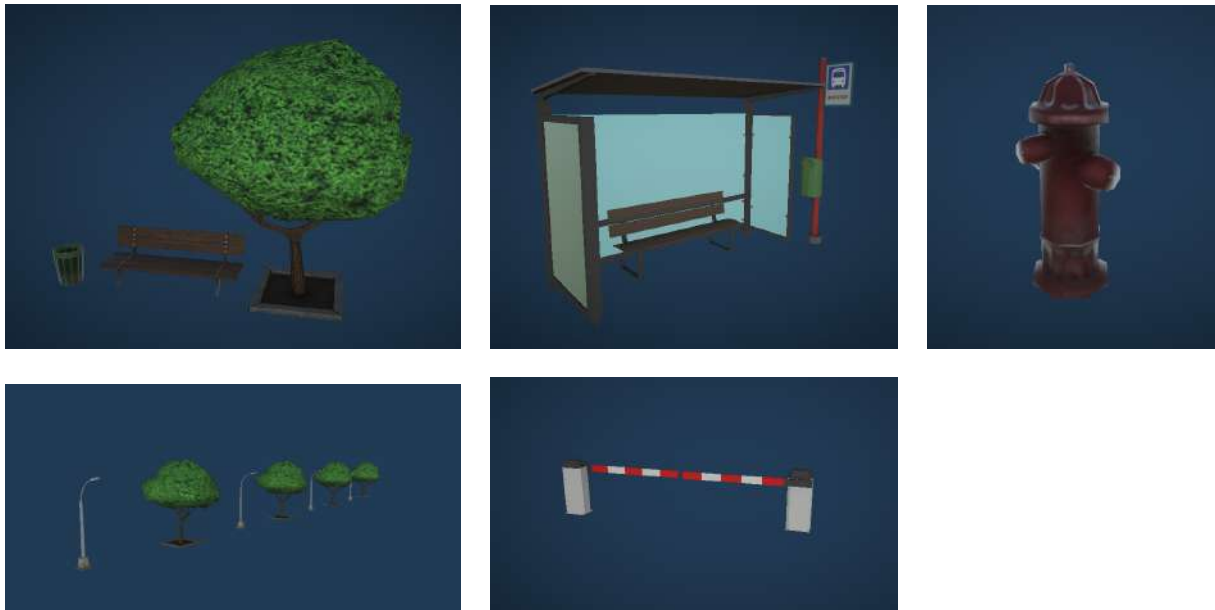
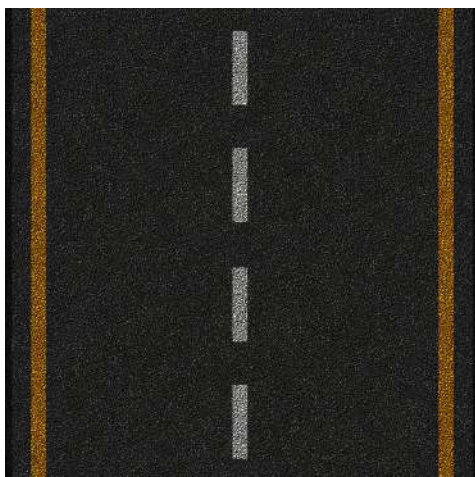


Fig. 29. – Éléments décoratifs sélectionnés.

B3 Routes

Afin que les participants aient un retour lorsqu'ils conduisent et passent du trottoir à la route et inversement, les routes ont été légèrement surélevées par rapport aux trottoirs (Fig. 31). Surélever les trottoirs aurait été plus réaliste mais compte tenu des contraintes temporelles et des données possédées, la méthode choisie était beaucoup plus simple et rapide à mettre en place.

Une texture différente a été appliquée aux routes et aux trottoirs. Les textures des routes et des trottoirs proviennent de [Modular Lowpoly Streets \(Free\)](#) de *EVPO Games*.



(a) Texture des routes



(b) Texture des trottoirs

Fig. 30. – Textures des routes et des trottoirs

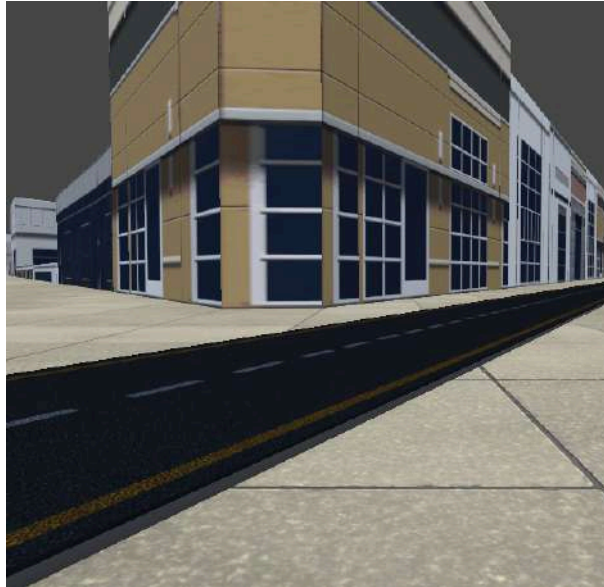


Fig. 31. – Route épaissie pour donner du relief

B4 Ciel

Un ciel réaliste est aussi clé dans l’immersion. Le fond par défaut de Unity a donc été remplacé par un ciel de *ZENRIN CO., LTD.* issu de l’asset *Japanese Otaku City* (Fig. 32).



Fig. 32. – À gauche : ciel par défaut de Unity. À droite : ciel de *ZENRIN CO., LTD.*

C Implémentation du GPS

En ce qui concerne l’implémentation du GPS, plusieurs approches ont été envisagées et testées :

- Méthode 1 : récupérer le trajet GPS réel (et en temps réel au fur et à mesure que le participant avance).
- Méthode 2 : utiliser les *NavMeshs* d’Unity pour trouver le chemin permettant d’atteindre la destination depuis la position de la voiture en tout temps : les *NavMeshs* permettent de définir des zones navigables dans l’environnement 3D, dans notre cas les routes, et de calculer un chemin entre deux points navigables (la position actuelle et la destination).

- Méthode 3 : définir un chemin à l'avance passant par un ensemble de points et interdire toute sortie, par exemple en ajoutant des obstacles invisibles pour empêcher la voiture de quitter le bon chemin.

Le fait d'avoir utilisé des données géographiques réelles pour obtenir les bâtiments et les routes en 3D nous a permis d'aborder plusieurs méthodes très différentes pour implémenter le *GPS*, notamment celle consistant à récupérer le trajet *GPS* réel, grâce à l'API open source *Open Source Routing Machine (OSRM)* [61]. Le passage des données réelles au monde virtuel 3D ne nécessitait qu'un changement d'échelle, fonction proposée dans l'implémentation Unity de MapBox.

La méthode 3 a été retenue car nous voulions que tous les participants passent par le même chemin, pas seulement qu'ils arrivent à destination. On accorde ainsi plus d'importance à la mémorisation du chemin que de l'environnement spatial. Il aurait été plus difficile d'évaluer la mémorisation et de la comparer entre les différentes méthodes si les participants avaient pu choisir leur propre chemin. De plus, cela aurait engendré une complexité supplémentaire pour la création des musiques pour guider sur le chemin, ce qui n'était pas souhaitable dans le temps imparti.

L'utilisation des NavMesh d'Unity pour dessiner le chemin à suivre permet de s'assurer que le chemin suit la courbure des routes. Pour cela, le chemin est généré entre chaque point du chemin par Unity afin qu'il passe par le plus court chemin navigable. Pour le choix des points définissant le chemin, les noeuds (soit les intersections de route) du graphe *OSMnx (OSMnx)* définissant la ville importée sont utilisés.

Pour réaliser le visuel du GPS, nous avons tout simplement utilisé une caméra vue de dessus de la ville, placée quelques mètres au-dessus de la voiture et se déplaçant et tournant en même temps que celle-ci pour que la direction tout droit soit toujours orientée vers le haut. Celle-ci n'est pas à très haute altitude afin de ne pas divulguer trop d'informations sur l'environnement Fig. 4.

Sur cette carte, la position en temps réel de la voiture a été ajoutée. L'icône de voiture provient de l'asset *Board Game Pack de Kenney*. À la droite de la carte, toujours sur le tableau de bord, une flèche indiquant la direction à prendre est affichée. Elle provient elle aussi d'un asset de *Kenney*.

D Exemple d'instructions

D1 Instructions précédant le parcours du chemin

Route 1

Avancez tout droit.
Prenez la première à gauche.
Continuez jusqu'au bout de la route puis tournez à droite.
Ensuite, prenez la troisième à gauche.
A la prochaine intersection tournez à droite.
Puis encore à droite.
Tournez à gauche.
Continuez tout droit et vous arriverez à destination.

Route 3

Avancez tout droit.
Prenez la première à gauche.
Puis, prenez la seconde à gauche.
Continuez tout droit et prenez la seconde à droite.
Ensuite, prenez la seconde à droite.
Tournez à gauche.
A la prochaine intersection, tournez à droite.
Continuez tout droit et vous arriverez à destination.

Route 2

Avancez tout droit.
Prenez la première à gauche.
A la prochaine intersection, tournez à gauche.
Ensuite, prenez la seconde à droite.
Prenez la seconde à droite.
Puis, tournez à gauche.
Continuez jusqu'au bout de la route puis tournez à gauche.
A la prochaine intersection, tournez à droite.
Prenez la seconde à droite.
Continuez tout droit et vous arriverez à destination.

Route 4

Avancez tout droit.
Prenez la première à droite puis tournez à gauche.
Ensuite, prenez la deuxième à gauche.
Puis, prenez la première à droite.
Tournez à gauche puis à droite.
Continuez tout droit et vous arriverez à destination.

D2 Instructions pendant le parcours du chemin

Route d'entraînement

Tournez à gauche.
Tournez à droite.
Vous êtes arrivé(e)s à destination.

Route 1

Tournez à gauche.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à gauche.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Tournez à gauche.
Vous êtes arrivé(e)s à destination.

Route 2

Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à gauche.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Tournez à gauche.
Vous êtes arrivé(e)s à destination.

Route 3

Avancez tout droit.
Tournez à gauche.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à gauche.
Tournez à gauche.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Vous êtes arrivé(e)s à destination.

Route 4

Avancez tout droit.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à gauche.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Tournez à gauche.
Dans cent mètres, tournez à droite.
Tournez à droite.
Vous êtes arrivé(e)s à destination.

E Création des musiques

En ce qui concerne la création des musiques, je n'ai fait que faire les premières recherches afin de décider si nous pouvions nous orienter dans cette direction ou non. Après quelques premiers résultats satisfaisants, Mario, un doctorant de mon encadrant a continué de son côté pour que je puisse continuer d'avancer sur le reste du projet.

E1 Musique à écouter avant le trajet

Au premier abord, en ce qui concerne la création des paroles, nous avons pensé à donner une liste d'instructions GPS à un *Large Language Model (LLM)* afin qu'il génère des paroles de chanson, avec un refrain et des couplets. Cela donnait des résultats convaincants, surtout quand les points de départ et d'arrivée étaient des points notables (comme des monuments historiques).

Cependant, nous avons finalement décidé de ne pas utiliser cette approche et d'écrire nous-même la liste d'instructions chantées. Cela permet notamment de mieux contrôler l'équité entre les différentes routes.

Dans ce cas, les instructions sont écoutées avant le trajet, il est donc important qu'elles puissent être comprises par les participants et bien interprétées pour faire le bon chemin. Les paroles disaient donc précisément la direction à prendre, sans utiliser de distance, mais plutôt en s'appuyant sur le numéro de l'intersection (« Prenez la deuxième à droite. », « Au bout de la route, tournez à gauche. », ...).

En ce qui concerne la création de la musique, de nombreuses *Intelligence Artificielles (IAs)* musicales proposent de générer entièrement des musiques à partir des paroles. Plusieurs ont été testées, notamment [SUNO](#) [62], [UDIO](#) [63] et [makesong](#) [64]. [SUNO](#) donnait les résultats avec l'audio qui semblait le plus naturel.

Finalement, nous n'avons pas généré les paroles à l'aide d'un *LLM*, nous avons simplement écrit la liste des instructions. De plus, nous n'avons utilisé aucune des *IA* musicales citées précédemment, Mario a généré les musiques différemment. Il s'est appuyé sur un modèle open-source pour la génération musicale à partir de texte : ACE-STEP [65]. Plusieurs styles de musique ont été testés, les plus convaincants ont été conservés : funk et latin.

En ce qui concerne les instructions parlées données avant le trajet, elles ont été générées avec *gTTS*. Ce sont exactement les mêmes instructions que celles chantées (Annexe D1) pour éviter tout biais.

E2 Musique à écouter pendant le trajet

Générer cet audio est beaucoup plus challengeant car l'on ne sait pas à l'avance quand devront être prononcées les instructions, pour que cela corresponde à la position actuelle du participant sur le chemin. Les instructions GPS doivent arriver pas à pas, ce qui rajoute des contraintes sur la musique.

Plusieurs approches ont été envisagées (Fig. 35) :

- méthode 1 : générer entièrement la musique, puis utiliser du *time stretching* pour que les instructions arrivent au bon moment. Cependant, cette approche soulève quelques problèmes. Il est difficile de prédire quand le conducteur arrivera à une intersection, et donc de prédire quand il faudra lui donner l'instruction (notamment s'il ralentit ou s'arrête soudainement). Fig. 35a
- méthode 2 : générer une partie simplement instrumentale et une partie avec la voix et l'instrumentale, faire des transitions entre les deux lorsque nécessaire. Fig. 35b
- méthode 3 : avoir une musique de fond et des instructions chantées qui sont adaptées et peuvent être superposées à de nombreux moments dans la musique, par exemple avec une musique de fond qui est une suite d'accords, définie et répétée. En générant les instructions chantées pour qu'elles puissent être superposées sur chacun de ces accords, elles peuvent donc être placées au bon moment.

On peut aussi imaginer utiliser le *time stretching* avec les autres méthodes pour plus de précision dans la synchronisation temporelle entre la musique et le moment où les instructions doivent être annoncées au conducteur. Fig. 35c

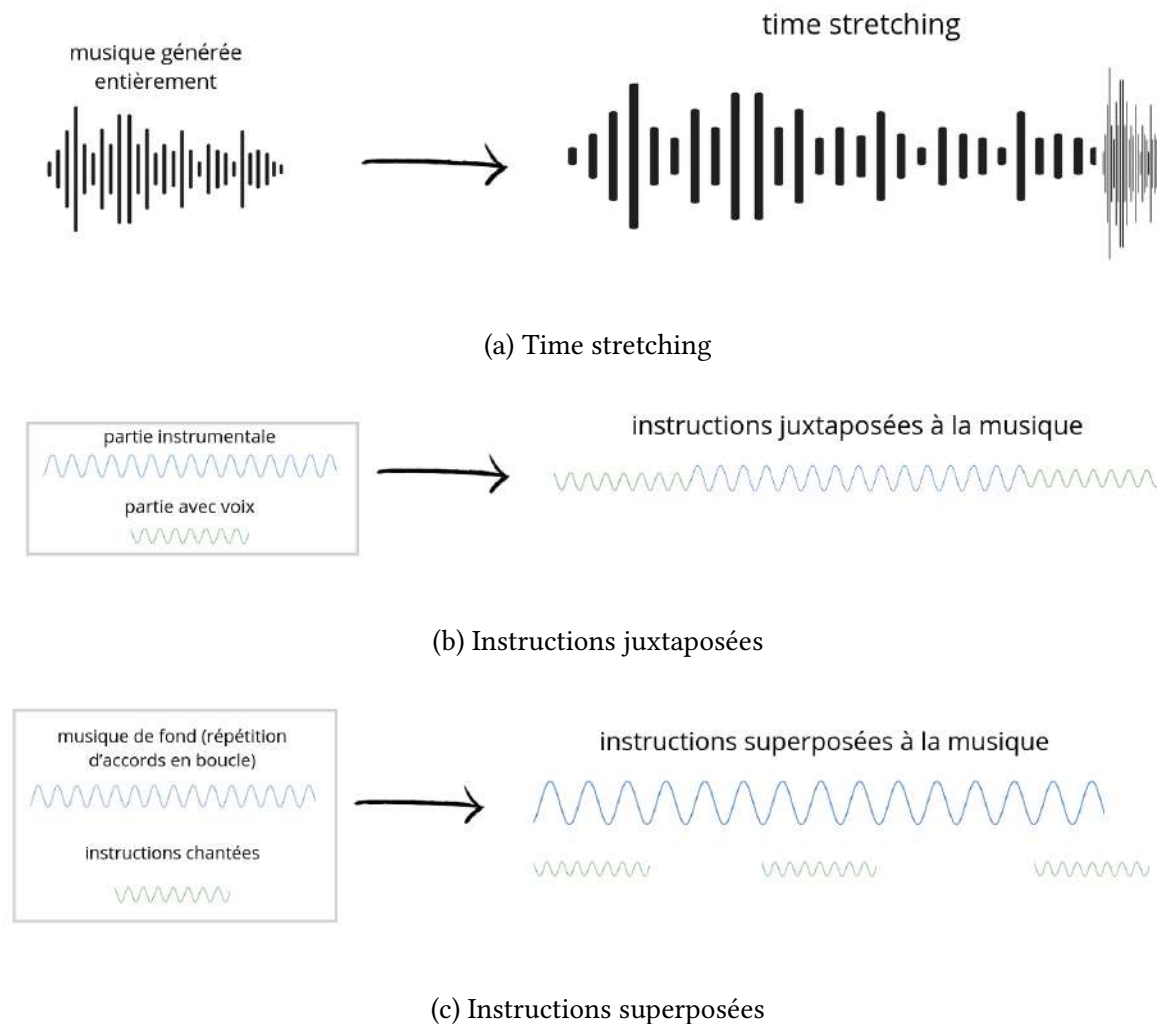


Fig. 35. – Différentes approches pour synchroniser les instructions audio

La méthode 1 a été testée en générant des musiques avec pour paroles les instructions, cependant nous n'avons pas réussi à trouver une manière de bien estimer le *time stretching* à réaliser en temps réel en fonction de l'avancement du participant le long du chemin.

Pour la méthode 3, nous avons créé une courte musique avec un accompagnement et des percussions sur plusieurs mesures. Nous avons défini également une mélodie simple pour laquelle une mesure équivalait à une phrase. Ainsi, sur chaque phrase de la mélodie, à l'aide d'un synthétiseur vocal (comme Synthesizer V [66] ou OpenUtau [67]), nous avons pu générer l'instruction chantée. À l'issue de ça, nous avons donc un set d'instructions défini à l'avance (« Tournez à gauche », « Tournez à droite », ...) chantées de plusieurs manières différentes : une pour chaque mesure. Ainsi, pour guider les participants, il faut jouer l'accompagnement et les percussions en boucle et envoyer l'instruction voulue au moment voulu avec la bonne mélodie (en fonction de à quelle mesure on se situe dans la boucle). Cette méthode permet donc de contrôler l'envoi de l'instruction à environ deux secondes près (le temps d'une mesure à quatre temps pour une musique à 120 *Battement Par Minute (BPM)*). Cette méthode nécessite la composition d'une musique manuellement, ce qui est faisable sur quelques mesures pour tester le principe mais devient trop compliqué si l'on cherche à faire des vrais morceaux assez longs. Il est possible aussi de prendre une musique existante et de changer les paroles, mais après un premier essai cette idée a été abandonnée car une des personnes ayant écouté ces musiques se focalisait surtout sur le fait d'essayer de retrouver les paroles d'origine de la musique. Il était donc mieux de créer les musiques de toute pièce pour éviter ce risque.

L'approche finalement choisie se rapproche de la méthode 2 et a été réalisée par le doctorant. Il a généré des musiques à partir de paroles, à l'aide de ACE-STEP [65]. Les styles de musiques utilisées cette fois ci sont différents pour chaque route : pop, latin, funk et rnb. Les paroles correspondaient aux instructions à prendre pour chaque chemin (Annexe D2). Cependant, entre chaque instruction, il a ajouté des « lalala » afin que les instructions ne s'enchaînent pas les unes à la suite des autres, mais qu'elles soient espacées de quelques secondes. Ces secondes sans instructions permettent aux participants de se rendre d'une intersection à la suivante sans avoir d'instruction avant d'arriver à l'intersection. Dans le cas des instructions parlées, ces moments seraient juste vides mais on ne peut pas les laisser vides dans la condition avec les instructions chantées car l'on s'éloignerait du fait d'avoir des instructions qui forment une musique. Cependant, entendre des « lalala » en boucle n'est pas agréable. Le doctorant a donc séparé la partie instrumentale de la partie lyrics, puis déterminé à quel moment les instructions apparaissent. Pendant les « lalala », seule la partie musicale est conservée. Cela permet ainsi d'obtenir une musique avec chaque instruction chantée séparée par un interlude instrumental.

À l'aide des temps auxquels les instructions se situent dans la musique, on peut ainsi intégrer la musique dans Unity : comme dans le cas des instructions parlées, on envoie les instructions juste avant l'intersection. Pour passer de la partie instrumentale à l'instruction, pour que celle-ci arrive au bon moment, un fade-in/fade-out est appliqué entre les deux parties. Pour faire ce passage d'un bout à l'autre de la musique sans que la transition soit trop remarquable, la transition commençait sur un temps. Les moments où tombaient les temps ont été déduits du *BPM*, soit de la vitesse de la musique. Toutes les musiques générées ont un *BPM* de 120, soit un temps toutes les 0.5 secondes. Si la partie musicale entre deux instructions n'était pas assez longue, elle était bouclée.

F Choix des routes

Dans un premier temps, un algorithme a été écrit et implémenté en Python afin de générer les routes. Son fonctionnement est très simple : il itère sur un ensemble de routes jusqu'à en trouver une qui respecte tous les critères voulus. Au premier abord, cela était suffisant. Cependant, les routes passaient souvent par des endroits qui visuellement étaient trop reconnaissables : rond-point, plusieurs routes parallèles, zones sans bâtiments, etc. . Éviter ces obstacles algorithmiquement aurait demandé un temps non négligeable de réflexion, il a donc été décidé de finalement les choisir manuellement, tout en veillant à respecter les mêmes critères.

Lorsque nous souhaitions utiliser un algorithme pour générer les routes, la librairie Python *OSMnx* a été utilisée. Elle permet de récupérer l'ensemble des routes d'une zone géographique donnée, de les naviguer et de les afficher simplement. Elle a finalement été utilisée pour récupérer les noeuds des intersections de route pour les importer dans Unity et réaliser les figures avec les chemins.

G Questionnaires

G1 Questionnaire 1

Avez-vous le permis de conduire ? ☐ oui ☐ non

Avez-vous déjà utilisé un casque VR ? ☐ oui ☐ non

À quel fréquence utilisez-vous le GPS ?

jamais
☐

rarement
☐

occasionnellement
☐

souvent
☐

systématiquement
☐

G2 Questionnaire 2 : SBSOD

SANTA BARBARA SENSE-OF-DIRECTION SCALE

Participant: _____

The following statements ask you about your spatial and navigational abilities, preferences, and experiences. After each statement, you should circle a number to indicate your level of agreement with the statement. Circle “1” if you strongly agree that the statement applies to you, “7” if you strongly disagree, or some number in between if your agreement is intermediate. Circle “4” if you neither agree nor disagree.

1. I am very good at giving directions.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

2. I have a poor memory for where I left things.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

3. I am very good at judging distances.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

4. My “sense of direction” is very good.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

5. I tend to think of my environment in terms of cardinal directions (N, S, E, W).

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

6. I very easily get lost in a new city.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

7. I enjoy reading maps.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

8. I have trouble understanding directions.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

9. I am very good at reading maps.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

10. I don’t remember routes very well while riding as a passenger in a car.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

11. I don’t enjoy giving directions.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

12. It’s not important to me to know where I am.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

13. I usually let someone else do the navigational planning for long trips.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

14. I can usually remember a new route after I have traveled it only once.

strongly agree 1 2 3 4 5 6 7 strongly disagree

G3 Questionnaire 3 : NASA-TLX scale

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
------	------	------

Mental Demand

How mentally demanding was the task?

A horizontal scale from 0 to 100 with 'Very Low' at 0 and 'Very High' at 100. A vertical line is drawn at 50.

Physical Demand

How physically demanding was the task?

Temporal Demand

How hurried or rushed was the pace of the task?

Performance

How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

Perfect Failure

Effort

How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

Frustration

How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

G4 Questionnaire 4 : UEQ_S

Questionnaire d'Expérience Utilisateur (UEQ-S)

S'il vous plaît donnez-nous votre avis sur la méthode de guidage que vous venez d'utiliser.

Afin d'évaluer le produit, veuillez remplir le questionnaire ci-dessous. Il se compose de paires opposées de propriétés que peuvent avoir la méthode de guidage. La gradation entre les contraires est représentée par des cercles. En cochant l'un de ces cercles, vous pouvez exprimer votre approbation d'un concept.

Exemple :

Attractif ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Rébarbatif

Cette réponse indique que vous jugez le site plus attractif que rébarbatif.

Répondez le plus spontanément possible.

Veuillez répondre à toutes les questions, même si vous n'êtes pas sûr de l'évaluation.

Il n'y a pas de «bonne» ou de «mauvaise» réponse, seul votre avis compte !

Dites-nous maintenant ce que vous pensez de la méthode de guidage (une seule réponse possible par qualité/défaut).

	-3	-2	-1	0	1	2	3	
Rigide	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Facilitant
Compliqué	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Simple
Inefficace	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Efficace
Déroutant	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Clair
Ennuyeux	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Captivant
Inintéressant	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Intéressant
Conventionnel	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Original
Habituel	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Avant-gardiste

G5 Questionnaire 5 : Parlées VS Chantées

Avez-vous préféré les instructions chantées ou parlées ?

forte préférence
pour les
instructions
parlées

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

forte préférence
pour les
instructions
chantées

Avec quelle méthode avez vous eu l'impression de mieux mémoriser le chemin ?

☐ parlées ☐ chantées

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions chantées ?

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions chantées ?

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions parlées ?

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions parlées ?

Aviez-vous utilisé une stratégie particulière pour mémoriser ?

G6 Questionnaire 6 : Subset de I-Group presence questionnaire et SSQ questionnaire

Nous allons vous poser quelques questions pour avoir votre ressenti sur la VR, veuillez cocher la case qui vous correspond pour chaque symptôme.

	pas du tout	-2	-1	0	1	2	beaucoup
Inconfort général	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Mal de tête	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Fatigue des yeux	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Nausées	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Difficulté à se concentrer	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

À quel point étiez-vous conscient du monde réel environnant alors que vous étiez en train de naviguer dans le monde virtuel ? (par exemple : sons, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.) ?

	-3	-2	-1	0	1	2	3	
Extrêmement conscient	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Pas conscient du tout

Je me suis senti présent dans l'espace virtuel.

	-3	-2	-1	0	1	2	3	
Pas du tout d'accord	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Tout à fait d'accord

H Résultats

H1 Scores au *SBSOD scale*

Il est important de s'assurer que la répartition des participants dans les groupes forme bien des groupes équivalents. Cependant, la distribution des scores au *SBSOD scale* ne suit pas une distribution normale comme nous l'avons identifié avec le *Shapiro-Wilk Test* ($p > 0.05$, Tableau 3). De plus, notre échantillon est trop petit pour qu'on puisse considérer le théorème de la limite centrale, qui permettrait d'appliquer le t-test même si la distribution n'a a priori pas une distribution normale. Nous ne pouvons donc pas appliquer un t-test pour vérifier l'équivalence des groupes. Nous devons donc appliquer plutôt

le *Wilcoxon Rank Sum Test*, qui est une alternative au t-test lorsque les données ne suivent pas une distribution normale. Les données doivent tout de même être indépendantes, ce qui est le cas car les participants ont été répartis aléatoirement dans les différents groupes. Le *Wilcoxon Rank Sum Test* ne montre pas de différence significative entre les groupes (que ce soit pour la première partie de l'expérience ou la seconde). Cela est une bonne chose, on peut donc conclure que les scores au *SBSOD scale* sont similaires dans les différents groupes.

	Avant		Pendant	
	Chantées	Parlées	Chantées	Parlées
Taille échantillon	9	9	9	9
Shapiro-Wilk	0,937	0,971	0,982	0,877
Valeur p de Shapiro-Wilk	.550	.900	.975	.146

Tableau 3. – Shapiro-Wilk Test sur le score au *SBSOD scale* questionnaire

H2 Réponses au *UEQ-S*

Les Fig. 36 et Fig. 37 présentent les réponses à *UEQ-S* (Annexe G4) pour chaque méthode.

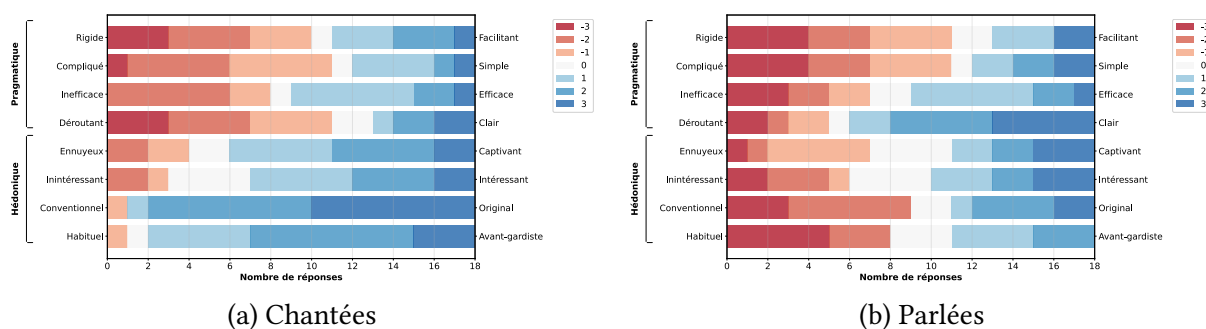


Fig. 36. – Distribution des réponses au *UEQ-S*, instructions avant le chemin

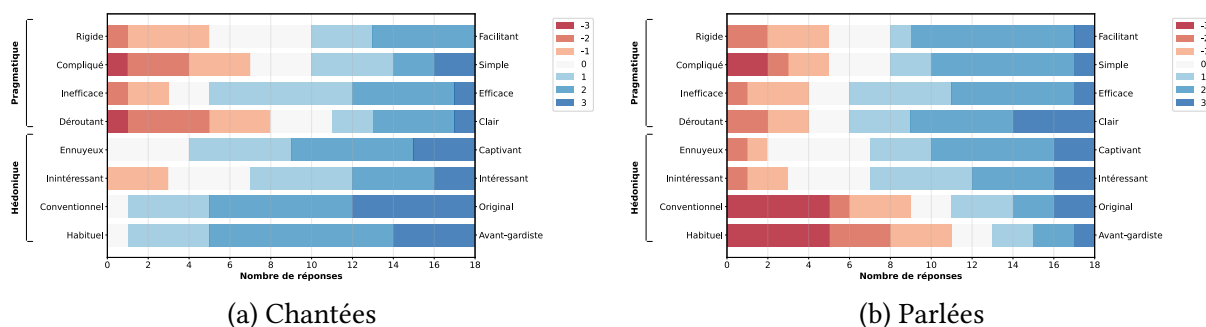


Fig. 37. – Distribution des réponses au *UEQ-S*, instructions durant le chemin

La Fig. 38 présente les réponses au *UEQ-S* en fonction de la méthode utilisée. Les réponses des participants sont affichées en nuages de points. À côté de celui-ci, la boîte à moustache permet de visualiser la médiane et l'écart-type du groupe.

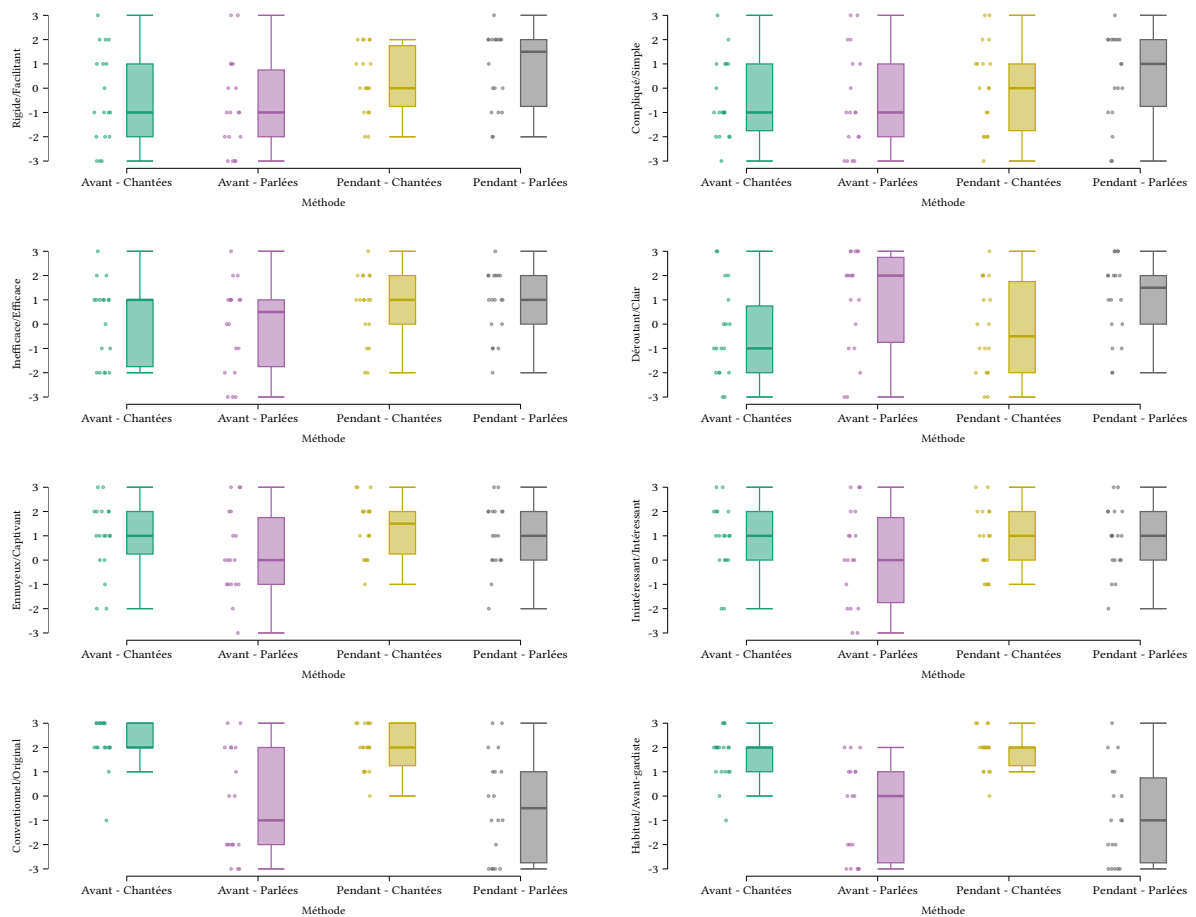


Fig. 38. – Réponses au *UEQ-S* en fonction de la méthode

H3 Erreurs des participants

Les figures Fig. 39, Fig. 40, Fig. 41 et Fig. 42 montrent les trajets réalisés par les participants pour chaque route. Le nombre de participants s'étant trompés à chaque intersection, pour une direction donnée, est également affiché.

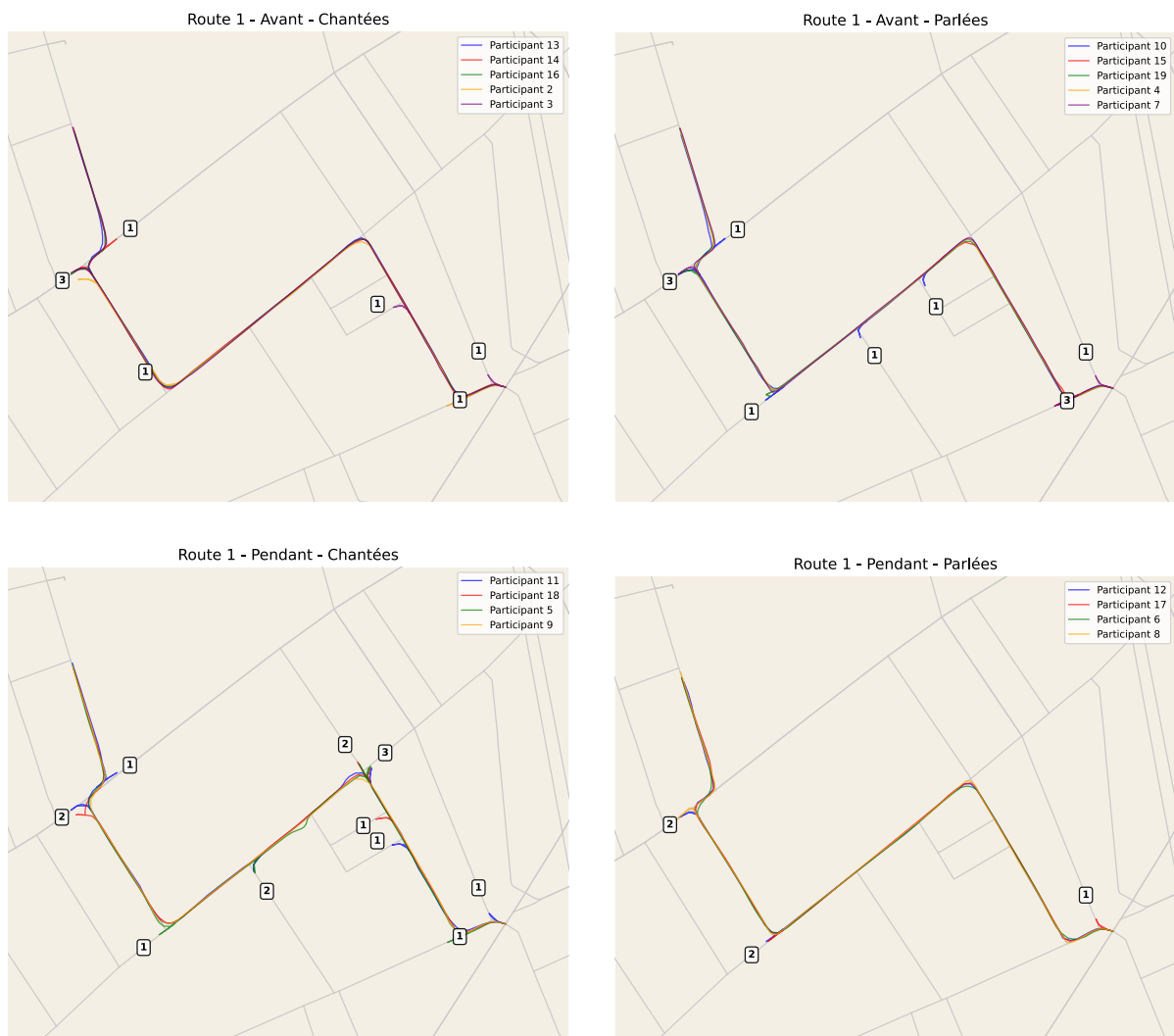


Fig. 39. – Route 1

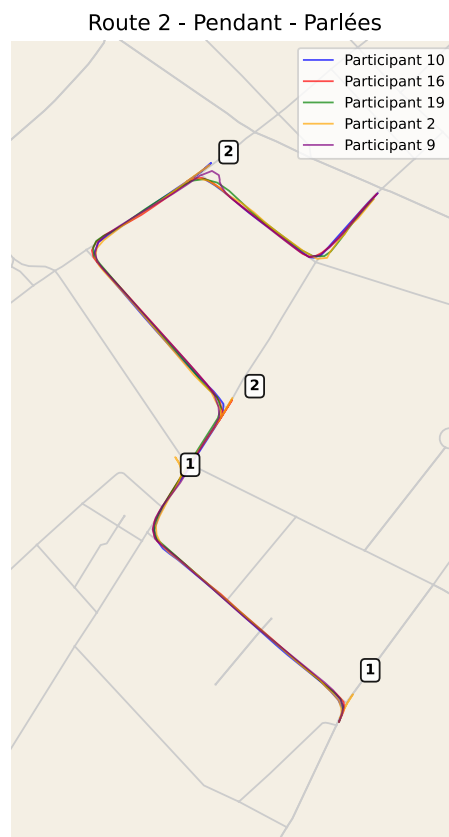
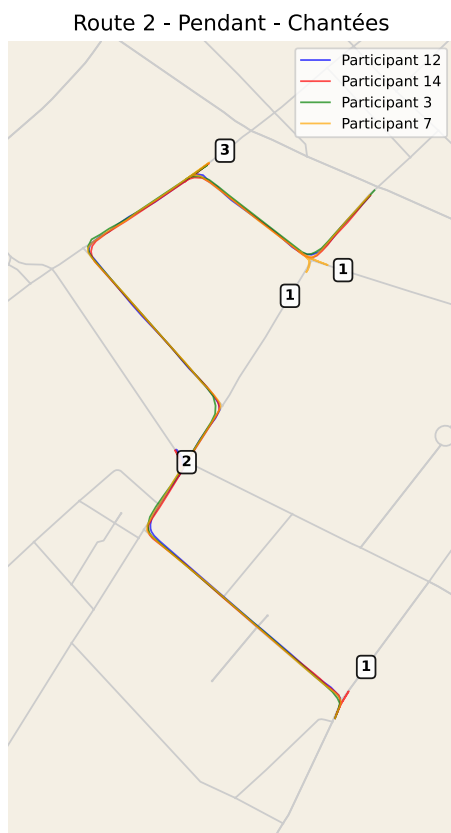
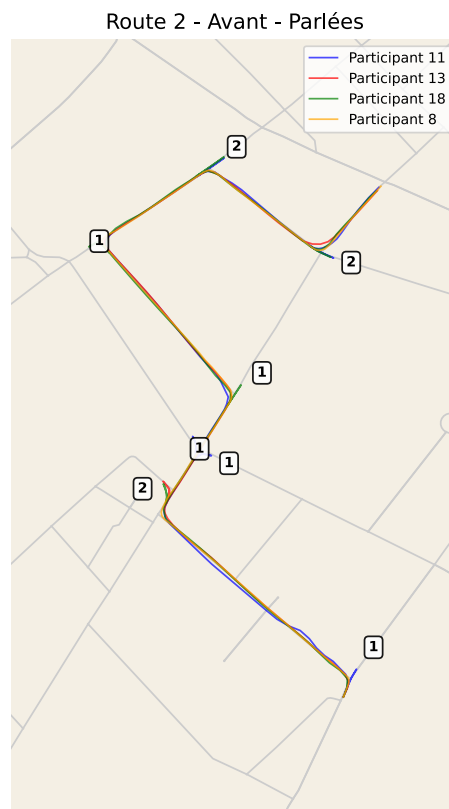
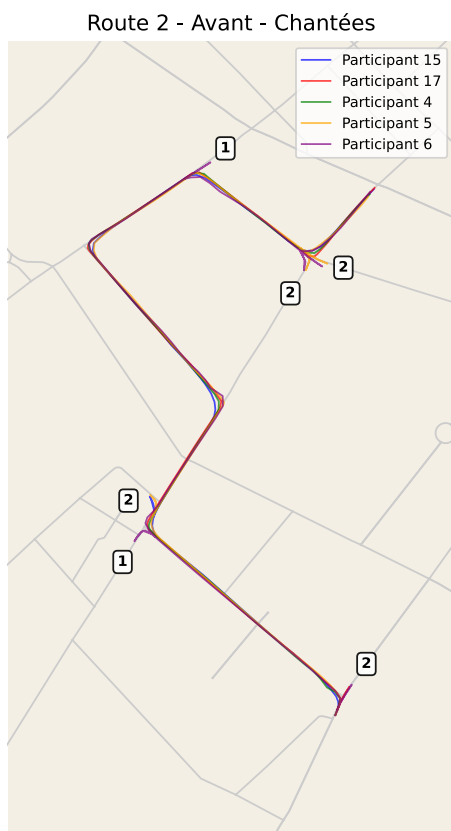


Fig. 40. – Route 2

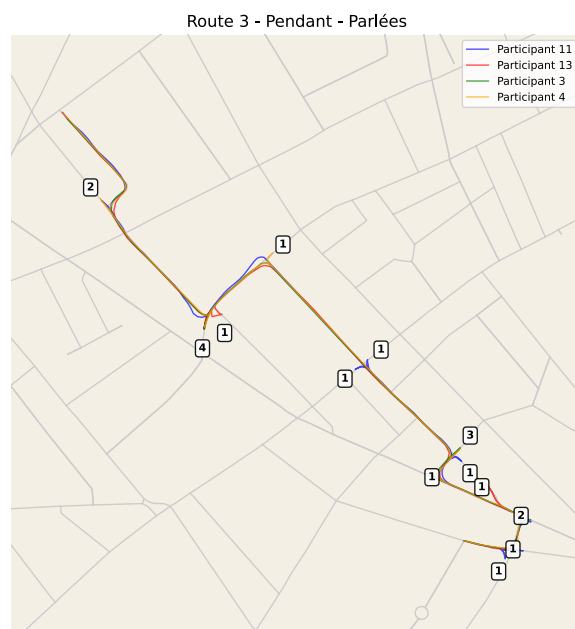
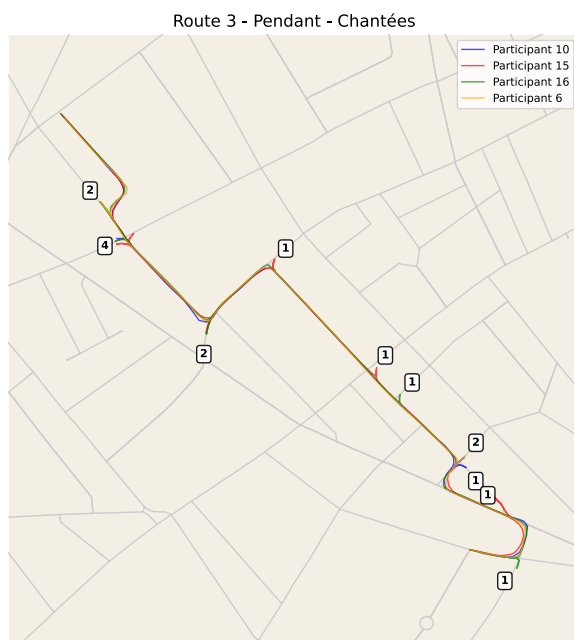
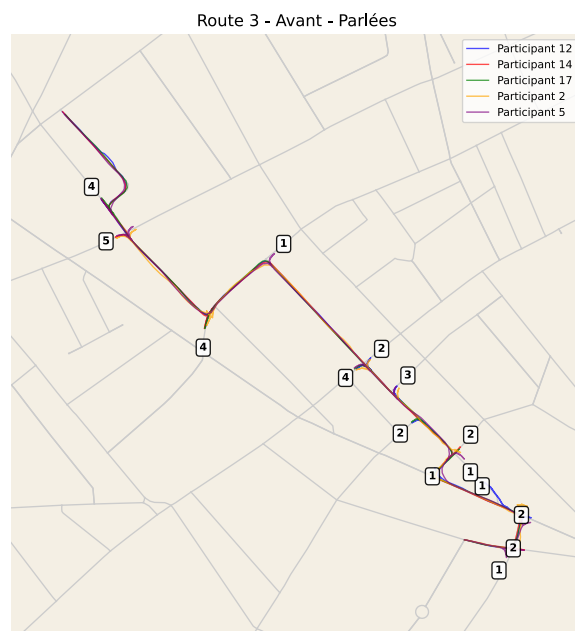
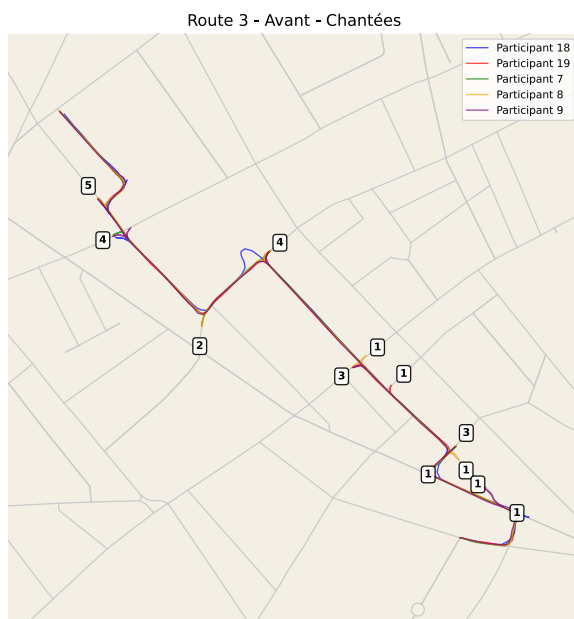


Fig. 41. – Route 3

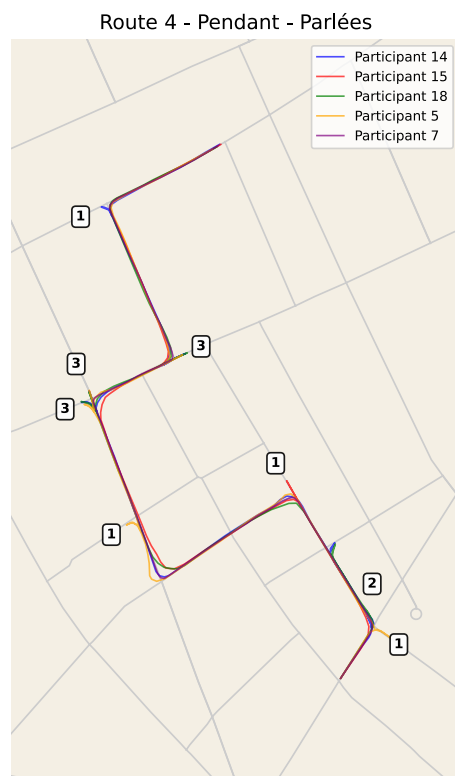
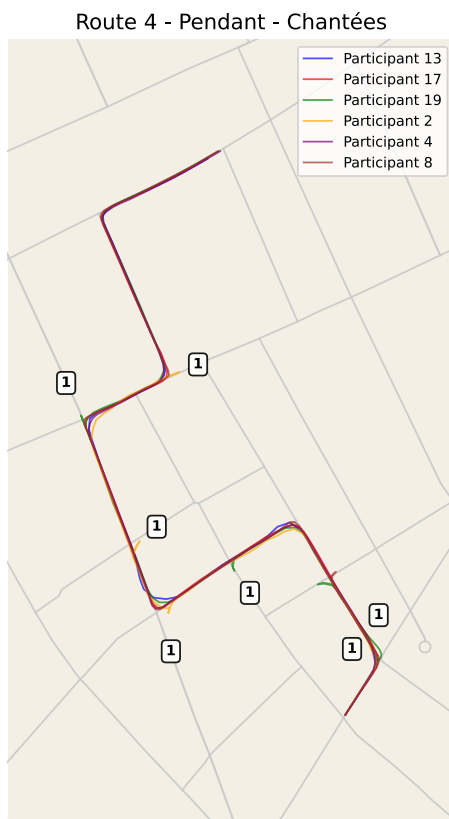
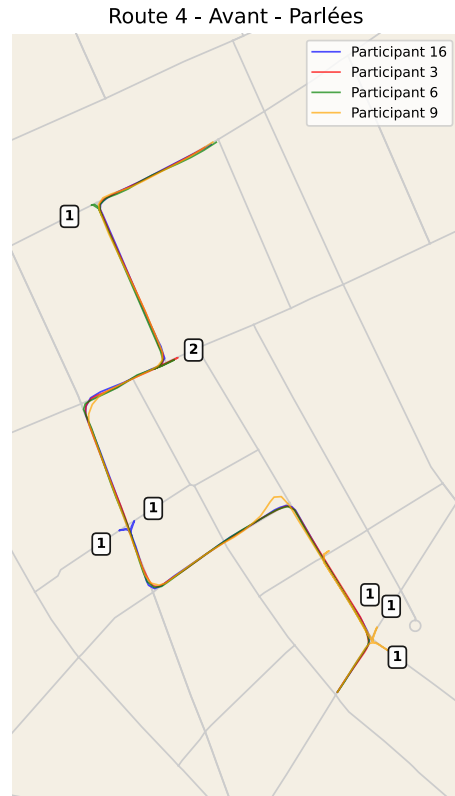
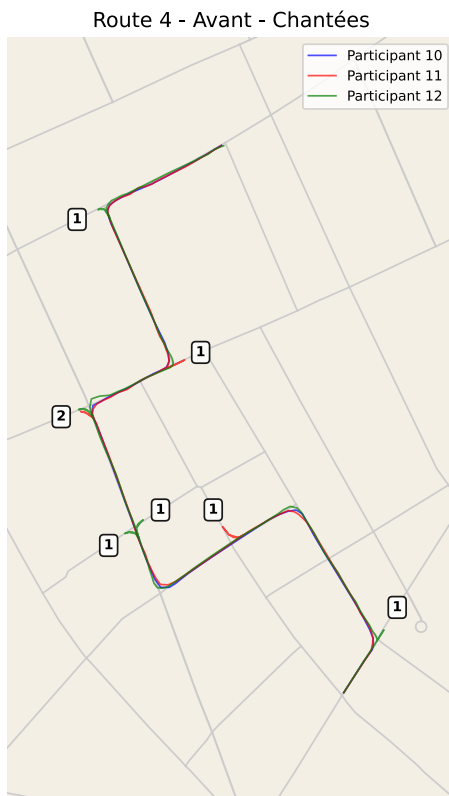


Fig. 42. – Route 4

H4 Réponses au questionnaire Parlées VS Chantées

H41 Partie 1 : Instructions avant de faire le chemin

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions chantées ?

- La vitesse d'exécution des paroles, aussi j'ai eu un problème pour comprendre certaines instructions ce qui m'a ralenti encore plus niveau mémorisation
- On se concentre sur la musique
- Parfois j'avais du mal à comprendre les mots
- J'ai moins bien retenu parce que c'était tout nouveau
- Maybe I will lose some information because the rythm is good
- Plus compliqué de convertir les instructions chantées en string simple d'instructions à suivre
- I won't accept it in emergency situation or in bad mood
- J'avais du mal à me répéter le chemin pour le mémoriser. Difficile de retenir le chemin puis de s'y retrouver ensuite avec uniquement des directions.
- Un rythme de paroles forcé pour correspondre à la musique
- Le rythme non constant du début d'instruction
- Peut être fatigant à la longue
- Les changements de tonalité
- J'ai mal compris l'instruction "3e sortie à gauche", car en chantées elle était pas clairement compréhensible
- Le fait que ce soit chanté et la musique détourne l'attention des paroles/instructions
- L'articulation
- Tendance à écouter le rythme de la musique plutôt que les paroles

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions chantées ?

- C'est amusant et plus marquant
- C'est rythmique
- Marrant
- La musique reste dans la tête et aide à retenir
- More interesting, I will not fall asleep especially during long distance road
- C'est peut être plus facile lorsque la langue maternelle est le français (?)
- Break driving routine and make it more fun
- C'est plus agréable et peut être plus facile à retenir avec plusieurs écoutes
- Meilleure mémorisation
- Le refrain
- J'ai eu aucune erreur en chantées par rapport au parlées, j'ai donc du mieux mémoriser en chantées
- J'ai l'impression de les avoir mieux mémorisées
- Plus facile à retenir
- Le rythme
- Meilleure mémorisation grâce au rythme de la chanson
- Plus agréable et entraînant
- Manière originale de délivrer les instructions

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions parlées ?

- Monotone
- Robotique
- More boring
- Pas sur Spotify. :(
- Emotionless so it feels seamless
- Difficile de retenir le chemin puis de s'y retrouver ensuite avec uniquement des directions.
- Voix monotone, peu de liaisons entre les instructions (mots comme "encore à gauche" par exemple)
- Rien, car nous avons plus l'habitude
- Droit au but, beaucoup d'information d'un coup
- J'ai eu une erreur, possible que c'était tellement monotone que j'ai eu du mal à retenir
- Trop d'instructions en une seule fois
- Trop rapide
- Monotone
- Compliqué à mémoriser, à cause de l'intonation la même, on confond les instructions
- Rythme monotone
- Moins "vivant" par rapport aux instructions chantées

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions parlées ?

- Assez lent pour suivre
- Plus clair
- Très clairs, très directes, c'est comme une liste de choses à faire
- Very clear and I know each word from the audio is needed to be take care
- Plus facile à mémoriser pour moi
- Clear but singing directions could be too.
- Si on arrive à retenir le chemin, ça permet de ne pas trop y penser pendant la conduite
- Simple et clair
- Clarté
- Même réponse
- C'était clairement énoncé donc toutes les instructions étaient clairement compréhensible sans ambiguïté
- Clarté
- Plus simple à mémoriser
- Plus difficile à retenir
- Plus simple, va droit au but

Aviez-vous utilisé une stratégie particulière pour mémoriser ?

- Mémoriser par répétition des mots clés (gauche, droite, droite, gauche, ...)
- Oui et Non : grouper les informations

- Imaginer le trajet dans ma tête et le regarder de haut
- I drew map with my finger on the desk, tried to imagine a real road with crossroad.
- Conversion du texte naturel en string d'instructions : première à droite, deuxième à gauche -> 1D2G
- 1D3G1G1G2D...
- Essayer de me répéter le chemin comme une liste à chaque fois qu'on ajoute une instruction - Essayer de le visualiser
- Mémoriser des répétitions (plusieurs fois à gauche de suite, une alternance gauche-droite-gauche...)
- Répéter dans ma tête les instructions avec ma "propre voix"
- Faire une séquence
- Je m'imaginer le trajet dans ma tête plusieurs fois et je me vois par avance dans ma tête faire le chemin. Après j'ai plus qu'à me revoir ce que je me suis imaginé pendant que je roule. + Je me le répète oralement dans la tête surtout.
- J'ai essayé de me les répéter en boucle
- Mémoriser une suite de nombre et lettre : 1D 2D 1G ...
- Se faire le chemin dans sa tête, mais stratégie compliqué pour mémoriser les numéros de voies pour tourner. (en plus avec la route qui tourne)
- Essayé de répéter mentalement les instructions

H42 Partie 2 : Instructions pendant le chemin

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions chantées ?

- Envahissement sensoriel
- Rien, mis à part que c'est déconcertant
- Easily forget... pay more attention to GPS
- Plus facile de se distraire
- While driving can't accept directions as a song. Can't detect easily the info in the song
- Le reste de la musique m'occupe l'esprit et me gêne un peu pour faire le reste. D'autant qu'on ne peut pas l'ignorer puisque on attend les instructions
- L'aspect chanté peut lui faire prendre du retard
- C'est plutôt la musique et les instruments qui ont rendu certaines instructions moins claires
- Trop de musique
- Un peu ambiguë de comprendre quelqu'un qui chante
- La musique et le fait que les paroles soient chantées déconcentre. J'ai la musique coincée en tête. J'ai hésité à couper le volume et regarder uniquement les instructions visuelles
- Trop distrayant, je n'ai pas réussi à mémoriser
- Le rythme peut distraire à force
- Tendance à écouter la musique plutôt que les paroles

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions chantées ?

- S'intègre plus fluidement dans l'expérience de conduite
- Le rythme

- Rythmé donc plus facile à retenir
- La musique reste dans la tête, et les paroles avec
- Fun
- Ça met de l'ambiance
- No positif points compared to spoken dir
- Je reste plus facilement concentré sur l'audio pour attendre les instructions
- J'ai mieux mémorisé les instructions
- Les instructions visuelles
- Musique entraînante
- Original, apporte du rythme

Qu'avez-vous trouvé de négatif avec les instructions parlées ?

- On retient rien, parce que c'est dit juste au moment de l'action
- Beaucoup à retenir sans grande aide
- Boring
- Difficult to memorize
- Je peux être un peu surpris par l'instruction ce qui fait perdre du temps
- La description des 100m n'aide pas
- Je me suis perdue dans les différentes instructions
- J'ai eu du mal à mémoriser, plus de mal que la version chantée
- Plus monotone
- Ton monotone
- Banal

Qu'avez-vous trouvé de positif avec les instructions parlées ?

- Habituel
- Plus facile à retenir
- Clair
- Très direct
- Clair
- Plus facile à retenir
- Clear, to the point especially while driving
- J'ai trouvé ça plus concis ce qui m'a aidé à retenir le chemin
- Simple
- Clair pas de bruit parasite
- Classique, on entend bien
- Clairement compréhensible, pas d'ambiguïté
- Le fait d'avoir les instructions parlées et visuelles marche bien, même si c'est classique
- Plus facile à retenir
- Simple, prononciation plus claire

Aviez-vous utilisé une stratégie particulière pour mémoriser ?

- J'ai essayé d'utiliser les bâtiments pour avoir un encrage visuel
- Retenir le paysage
- Y : utiliser des points de repère sur la route.
- J'ai utilisé des repères visuelles et je me suis fait une liste de lettres dans ma tête (G-G-D-D etc.)
- Remember some special view where I should change direction
- Créer un string, comme décrit avant, mais maintenant j'avais le temps pour le faire
- Building
- Je cherchais des points de repère, dans pour autant essayer de les retenir dans le détail. Pour refaire le chemin, j'allais vers les endroits connues.
- Retenir les instructions sous la forme "au bout de la rue" ou "3e à droite" + reconnaissance visuelle
- Carte mentale du trajet effectué et certaines série d'instructions répétées dans ma tête
- séquence
- Mémoriser des caractéristiques visuelles comme un arbre ou un bout de route qui dépasse, ou un panneau publicitaire vert. Mais ça m'a pas beaucoup aidé, je remarque qu'en fait je mémorise plus oralement dans ma tête les instructions et cette technique de mémorisation visuelle fonctionnerait pour moi mais au bout du second ou troisième passage sur le même circuit.
- J'ai essayé de mémoriser les bâtiments mais j'ai pas vraiment réussi.
- J'ai essayé de répéter plusieurs fois les instructions - pas possible avec la version chantée
- Regarder l'environnement et prendre des points de repère.
- Je pensais mémoriser la route visuellement mais étonnamment pour moi, la restitution a été beaucoup plus facile sur les instructions chantées.
- Regarder la route, indices visuels + instructions