

ENS Louis Lumière
Mémoire de fin d'études
Section Son – Promotion 2014

L'INSCRIPTION DU VEHICULE ELECTRIQUE DANS UN
PAYSAGE SONORE URBAIN.

Julien Gerber

Directeur interne :	Jean-Pierre Halbwachs
Directeur externe :	Nicolas Misdariis
Rapporteur :	Claude Gazeau

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de mémoire. Jean-Pierre Halbwachs pour ses nombreux conseils et sa disponibilité lorsque j'en ai eu besoin, ainsi que Nicolas Misdariis que j'ai eu la chance de côtoyer quotidiennement durant trois mois, et qui, grâce à son suivi rigoureux m'a été d'une aide précieuse quant à la construction de ce travail.

Egalement un grand merci à Julien Aléonard, qui a pris sur son temps malgré un emploi du temps très chargé, pour travailler sur ce projet de simulation. Nous avons finalement eu raison des nombreux bugs...

Merci à Claude Gazeau, mon rapporteur, pour la lecture de mon travail avec assiduité.

Enfin, merci à l'équipe du film « *l'Ivresse de la Vitesse* » pour ces bons moments passés aussi bien en tournage qu'en post-production (après des courtes nuits).

Un grand merci à mes parents et ma famille pour leurs conseils avisés et leurs relectures, malgré un sujet qui ne leur était pas familier.

Sans oublier Morgane Annic, Johan Raghbate et Paul Sabin, sans qui je n'aurais pas passé ces années d'études de la même manière.

Résumé

L'absence de son engendrée par les véhicules électriques représente à l'heure actuelle un enjeu principal en terme de sécurité, d'ergonomie ou encore d'écologie, et ces questions deviennent de plus en plus présentes en terme de recherche et de développement industriel.

Pour répondre à ces questions il est nécessaire de se pencher dans un premier temps sur les différentes manières de sonifier un véhicule électrique. De même, l'étude de la sonification de ce dernier n'aurait pas de légitimité si nous faisons abstraction de l'étude du paysage sonore dans lequel il évolue.

Ainsi, une fois ces recherches effectuées, ce travail aboutira sur la mise au point d'un outil de simulation de déplacement de véhicule électrique dans un paysage sonore urbain. Il se basera sur des enregistrements Ambisonics et sur la création de scénarii mettant en scène des véhicules électriques dans un panel d'ambiances données. Ceci dans le but d'apporter des résultats quant à la sonification du véhicule électrique.

Mots-clés : Véhicule électrique, Paysage sonore, Simulation, Déplacement, Véhicule silencieux, Enjeux écologiques.

Abstract

The lack of sound of Quiet Vehicles – especially, Hybrid or Electric Vehicles – is a crucial issue in terms of safety, ergonomics or even ecology which becomes to be largely studied either in a research or development point of view.

To answer these questions, it is necessary, on the one hand, to focus on the different ways to sonify an electric vehicle. On the other hand, this study wouldn't have any legitimacy without leaning over the question of the urban soundscape in which the vehicle glides into.

Thus, this researches done, this work will lead to to the first step of the development of an audio simulation of shifting of electric vehicles in a urban soundscape. It will be based on Ambisonics field recordings in various urban locations and on the design of

different audio scenario for insertion of one or multiple quiet vehicles in a given sound scene.

This work in order to bring findings concerning the sonification of electric vehicles.

Key Words : Electric Vehicles, Urban soundscape, Simulation, Virtual Reality, Quiet Vehicle, Ecological issues.

Table des matières

Introduction	7
1. Travail d'exploration – le paysage sonore & le véhicule électrique	9
1.1 L'aire urbaine.	9
1.1.1 Les éléments constitutifs	9
1.1.2 L'aspect fréquentiel des sources sonores	11
1.1.3 La variabilité de la scène sonore en fonction de la météorologie	13
1.2 Véhicules électriques = véhicule « silencieux » ?.....	16
1.2.1 Le véhicule électrique d'un point de vue extérieur.	17
1.2.1.1 Menzel & al. – le niveau sonore des stimuli.	17
1.2.1.2 Wogalter & al. – la nature des stimuli.....	18
1.2.1.3 Sandberg & al. – Sonifier un véhicule électrique; est-ce vraiment nécessaire ?	19
1.2.2 Le véhicule électrique d'un point de vue intérieur.....	21
1.2.2.1 Un peu d'acoustique.....	22
1.2.2.2 La méthode VINS.....	23
1.2.2.3 Le cas du véhicule hybride (HEV).....	25
1.2.2.4 Le cas de la Fiat FEV Liion Drive	26
1.2.2.4.1 Du point de vue fréquentiel.....	26
1.2.2.4.2 La dynamique perçue.	29
1.2.2.4.3 L'acoustique perçue:uniquement une question de motorisation ?30	
2. L'environnement dans lequel évolue le véhicule électrique – Classification des paysages sonores.	34
2.1 Définition des différentes typologies sonores.	34
2.1.1 Une classification pragmatique et objective.....	35
2.1.2 Une classification subjective - la perception du paysage sonore.	37
2.1.3 Une méthode particulière pour définir la typologie du lieu	38
2.1.3.1 Les facteurs perceptifs de J. Kang & al.....	38
2.1.3.2 Les critères définissant un environnement urbain.....	40
2.2 Une cartographie sonore de la ville de Paris.	43
2.2.1 Les critères objectifs.....	44
2.2.1.1 La vitesse des véhicules.	44
2.2.1.2 Le trafic routier.....	44
2.2.1.3 Le type de revêtement au sol.....	45
2.2.1.4 Le type de rue.....	46
2.2.1.5 Les autres sources présentes.....	46
2.2.1.6 La proximité avec le boulevard périphérique.....	47
2.2.2 ... Qui permettent un classement subjectif.....	48
2.2.2.1 Un environnement calme.	49
2.2.2.2 Un environnement bruyant mais supportable.....	50
2.2.2.3 Un environnement insupportable.	51
2.3 Les prérequis nécessaires aux enregistrements des paysages sonores urbains... 53	
2.3.1 Un environnement calme à Paris.....	53
2.3.2 Définition de l'environnement bruyant mais supportable.....	55
2.3.3 Définition de l'environnement insupportable.....	58
2.3.4 La chaîne d'enregistrement – le matériel nécessaire.....	62
3. Un outil de simulation de déplacement – une approche nouvelle dans le sound design de véhicule électrique.	64
3.1 Les scénarii issus de la campagne d'enregistrements	64
3.1.1 La rue Norvins.....	64
3.1.2 La rue Maspéro.....	65

3.1.3	La rue Cler.....	66
3.1.4	La rue Beaubourg.....	66
3.1.5	Saint-Paul.....	67
3.1.6	La rue Caulaincourt.....	68
3.1.7	Barbès-Rochechouart.....	69
3.1.8	Boulevard Ney – Porte de la Chapelle.....	70
3.1.9	La place de l’Etoile.....	70
3.1.10	Les Maréchaux.....	71
3.2	L’enregistrement Ambisonics.....	72
3.2.1	Les principes.....	72
3.2.2	Les problèmes rencontrés – l’écoute de l’Ambisonics.....	74
3.3	La question de la restitution.....	74
3.3.1	W.J. Davies : in situ vs laboratoire.....	74
3.3.2	Evaluation perceptive d’une restitution multidimensionnelle – le protocole à adopter.....	76
3.4	Le patch Max/MSP.....	78
3.4.1	But du patch.....	78
3.4.2	Les outils utilisés.....	78
3.4.3	Le patch de décodage Ambisonics.....	79
3.4.4	Le patch de définition des trajectoires.....	81
3.5	Les conclusions de cet outil de simulation.....	85
4.	Le véhicule électrique au cinéma : qu’en est-il de l’aspect spectaculaire ?.....	87
4.1	Sur le tournage.....	87
4.1.1	Le son synchrone.....	87
4.1.2	Les sons seuls.....	88
4.2	Au montage son.....	88
4.3	Intégration du véhicule dans le mixage.....	89
4.4	L’aller-retour avec le cinéma.....	90
4.5	L’évolution de la course poursuite.....	91
	Conclusion.....	93
	Bibliographie indicative.....	95
	Annexes.....	98

Introduction

Les avancées des constructeurs automobiles dans le domaine de la voiture électrique ne cessent de faire parler d'elles. Pourtant, dès 1899, la « Jamais Contente », munie de ses deux moteurs à traction électrique, franchissait la barre symbolique des 100km/h. Avec les acquis des nouvelles technologies et 125 ans plus tard, on peut croiser dans nos rues des véhicules tels que la BMW i8, la Nissan Leaf, l'Autolib ou encore la Renault Zoé.

Ce progrès est le synonyme de l'évolution des mentalités en terme de conduite automobile. En effet, à l'heure où les gouvernements font pression sur des aspects écologiques et où le carburant est cher, les constructeurs automobiles doivent ruser pour trouver des solutions adaptées aux acheteurs. Et c'est dans cette mouvance que, depuis un certain nombre d'années, le marché des véhicules électriques a fait un bond considérable. Entre 2013 et 2014, leurs ventes ont augmenté de 50% (968 ventes sur la période janvier – mai 2013 contre 2350 sur la même période en 2014). Et pour cause, tout est là pour séduire l'acheteur : un véhicule propre, peu gourmand en énergie, dont l'autonomie croît au fur et à mesure que les modèles se perfectionnent.

Pourtant, un problème d'un nouveau genre fait surface : la question du son de ces derniers. En effet, de part leur technologie silencieuse, les véhicules électriques n'émettent absolument aucun son, si ce n'est le bruit de roulement des pneus sur la chaussée. Ainsi, la question des nombreux problèmes de sécurité vient alimenter les débats ; les constructeurs automobiles sont conscients de ces nouveaux problèmes : piétons et cyclistes sont plus exposés au danger sur la chaussée, du fait qu'ils n'entendent pas arriver le véhicule. Les conducteurs de véhicules électriques doivent-ils être plus attentifs au monde qui les entoure ? Les manières de conduire doivent-elles évoluer ?

La question principale que nous allons nous poser dans ce travail de recherche est la suivante : est-il nécessaire d'ajouter du son sur les véhicules électriques, dits silencieux ? Si oui, quelles sont les caractéristiques auxquelles doivent répondre ces sons ?

Certaines instances ont déjà leur avis sur la question, et des constructeurs automobiles tels que Bolloré BlueCar (qui a mis au point la fameuse Autolib') ont déjà équipé leurs petites citadines de hauts parleurs émettant un léger sifflement.

Ce mémoire va consister en l'analyse des travaux déjà effectués en matière de sonification de véhicules électriques, selon la problématique suivante : l'inscription du

véhicule électrique dans un paysage sonore urbain ; le but étant, à terme, d'aboutir à un outil de simulation de conduite d'un véhicule électrique dans un paysage sonore urbain. Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux bases de notre problématique, à savoir qu'est-ce qu'un paysage sonore, comment varie-t-il, et quels sont les critères à prendre en compte. De même, nous étudierons les différentes approches proposées quant à la sonification des véhicules électriques.

Dans un deuxième temps, notre étude portera sur la classification des environnements urbains. En effet, même si cela peut paraître secondaire, le paysage dans lequel évolue le véhicule électrique est en réalité d'une importance capitale ; il va déterminer la manière dont on adapte le son du véhicule électrique. Il est donc très important d'étudier la question de la typologie des multiples espaces sonores urbains. Pour ce faire, nous nous pencherons sur différentes études concernant la sémantique de classification des paysages sonores urbains, avant d'en proposer une selon nos propres critères.

Une fois cette étape achevée, nous envisagerons une partie plus pratique : la mise au point de l'outil de simulation d'un véhicule électrique dans un paysage sonore urbain.

Ainsi, nous pourrions apporter des éléments de réponses à notre questionnement.

Enfin, une dernière partie traitera de la question du véhicule électrique au cinéma. Est-il judicieux d'intégrer des véhicules électriques dans des scènes de course-poursuite ? Nous nous intéresserons à la manière dont un montage son permet de traduire la vitesse d'un véhicule électrique, ainsi que sur les possibilités qu'ont le monteur son et le mixeur d'apporter une part de spectaculaire au film.

Cette étude sur la sonification des véhicules électriques peut se justifier par l'obligation de trouver une alternative aux moteurs thermiques et par la part croissante des véhicules électriques dans le parc automobile mondial.



Figure 1 : Photographie de la Jamais Contente, premier véhicule (électrique) à franchir la barre symbolique des 100km/h.

1. Travail d'exploration – le paysage sonore & le véhicule électrique.

1.1 L'aire urbaine.

Un espace urbain est, selon la définition de l'Insee, un ensemble continu formé par des aires urbaines et par les communes dont au moins 40 % de la population active résidente travaille dans l'une ou l'autre de ces aires urbaines ; ces communes sont dites multipolarisées.

Il s'agit là d'une définition de l'aire urbaine limitée à la démographie. En fait, chacun de nous fréquente de manière quotidienne l'espace urbain. Paris en est l'exemple le plus flagrant avec une densité de population de 21000 habitants au kilomètre carré.

Nous allons, dans cette partie, nous efforcer de caractériser la manière dont est représentée une aire urbaine, par le biais du son. Nous n'y consacrerons cependant pas la majeure partie de cette étude. Il s'agit ici de définir les bases, afin de pouvoir déterminer le milieu dans lequel évoluent les véhicules électriques.

Pour limiter l'étude à un cas représentatif de ce qu'est une aire urbaine, nous nous en tiendrons à la ville de Paris intra muros. Cependant, uniquement au sein de notre capitale, nous sommes capables de définir nombre d'ambiances, en fonction notamment des différentes sources qui interviennent.

1.1.1 Les éléments constitutifs

C'est Raymond Murray Schafer, qui en 1977, publie l'ouvrage « Le Paysage Sonore » [1] qui est à l'origine d'une réflexion mondiale sur ce qu'est un environnement sonore. Il dit dans cet ouvrage qu'il faut « isoler et étudier un environnement acoustique, comme on analyse les caractéristiques d'un paysage donné. »

C'est ce que nous allons essayer de faire dans cette partie afin de définir au mieux le cadre de notre étude.

Paris est une ville dans laquelle une quantité phénoménale de sources sonores se côtoient. Nous allons les énumérer et en faire ressortir une entité caractéristique pour chacune d'elle. Avant toute chose, il faut définir les deux notions principales qui vont ressortir de ces listes : évènements et textures.

Un **événement** sera un élément court, distinct, que l'on peut facilement caractériser. Une **texture** en revanche, sera le corps du paysage sonore, quelque chose de « lisse », une couche fréquentielle du paysage.

Parmi les événements, on distingue :

- Le piéton (conversations plus ou moins proches, pas, pleures de bébés, cris);
- La faune urbaine (chants des oiseaux, chiens domestiques) ;
- Bruits de moteurs thermiques (voiture, autobus, scooter, moto);
- Métro aérien ;
- Sirènes diverses (police, pompiers, ambulances, alarmes etc...);
- Activité de commerces (ouvertures de rideaux de fer, empilage de palettes etc...);
- Activités de voirie (travaux d'aménagements, travaux de nettoyage) ;
- Moteur d'avion en phase de décollage/d'atterrissage ;
- Cloches d'églises etc...

Parmi les textures, on distingue :

- Rumeur de périphérique ;
- Rumeur de trafic en ville ;
- Influence de la météo (bruits de vent, pluie etc...) ;
- Aérations continues d'usines ou d'entreprises ;

Il est difficile d'établir précisément toutes les sources qui prennent part au paysage sonore urbain. Nous essayons toutefois au maximum d'établir une liste des sources les plus communes que l'on retrouvera à chaque fois, dans n'importe quelle situation.

Toutefois, pour certains quartiers particuliers, il est possible de répertorier avec exactitude les différentes sources qui le composent. Par exemple, pour le quartier Graslin à Nantes, nous obtenons le tableau suivant :

Source P.H. : PRÉSENCE HUMAINE Pas 12,93 % Voix 10,81 % De nombreux pas 4,16 % Murmure 1,82 % Des passants 1,79 % Rires 0,85 % Cris d'enfants 0,83 % Sifflements 0,55 % Les enfants jouent 0,53 % Toussetements 0,48 % Cris 0,31 % Bébé 0,09 %	Source A.H. : ACTIVITÉ HUMAINE Impact 2,73 % Couinement 0,70 % Porte 0,68 % Rumeur 0,66 % Bruits de vaisselle 0,55 % Poussette 0,39 % Regard d'égout 0,35 % Cliquetis 0,33 % Extracteur d'air 0,33 % Cabine téléphonique 0,22 % Caisson 0,20 % Raclement 0,20 % Froissement 0,18 % Sonnerie 0,15 % Clefs 0,13 % Manège 0,11 % Escalier mécanique 0,09 % Jouet 0,09 % Grincement 0,07 % Balayeur 0,07 % Téléphone 0,04 % Activité d'une poissonnerie 0,04 % Terrasse 0,04 % Volets 0,04 % Friterie 0,02 % Horodateur 0,02 %	Source A.M. : ACTIVITÉ MÉCANIQUE (CIRCULATION) Voitures 15,36 % Moteur 5,08 % Circulation 4,33 % Moto 3,22 % Portière 1,66 % Freins 1,31 % Camion 1,09 % Bus 0,79 % Klaxon 0,79 % Démarreur 0,61 % Tramway 0,50 % Travaux 0,37 % Crissements 0,35 % Pneumatiques 0,33 % Marteau 0,28 % Perceuse 0,15 % Avion 0,11 % Amortisseurs 0,04 % Éboueurs 0,04 % Embrayage 0,02 % Vélo 0,02 %
Source B.d.F. : BRUITS DE FOND Calme 6,37 % Période plus calme 2,71 % Bruit de fond 2,12 % BdF urbain 1,25 % BdF humain 0,96 % Très calme 0,79 %	Source L. : COMMUNICATION ET LANGAGE Voix intelligible 1,93 % Musique 0,81 % Tintement 0,63 % Sifflet 0,04 % Cloches 0,02 % Sirène 0,02 %	Source B.d.N. : BRUITS DE LA NATURE Oiseaux 0,90 % Fontaine 0,70 % Aboiements 0,48 % Vent 0,18 % Battements d'aile 0,40 % Roucoulement de pigeons 0,20 % Miaulement 0,10 %
Liste des items sonores répertoriés dans le quartier Graslin, classés par source suivant leur fréquence d'apparition.		

Figure 1 : Liste des différentes sources sonores constituant le quartier Graslin (Nantes).

1.1.2 L'aspect fréquentiel des sources sonores



Figure 2 : Analyse fréquentielle d'un enregistrement stéréophonique d'une scène sonore d'un paysage urbain
[fréquence = f (temps)]

Nous avons procédé, grâce au logiciel iZotope RX, à une analyse fréquentielle d'une prise de son stéréophonique à un carrefour parisien. On y retrouve beaucoup de sources constitutives d'un paysage sonore urbain, dont il est fait une liste se trouvant plus haut.

Pour information, la situation est la suivante : il fait relativement beau, le temps est donc sec. Le point d'écoute est en altitude, sur un balcon au 4^{ème} étage d'un immeuble, qui donne sur une petite place. Il est aux environs de midi.

Cette scène est assez représentative d'une grande ville telle que Paris, et donc peut servir de base pour une analyse fréquentielle.

Globalement, on remarque que la zone [20Hz – 6kHz] est remplie de manière homogène quoiqu'il arrive.

La limite supérieure est d'environ 12kHz et elle est atteinte uniquement par quelques éléments ponctuels qui viennent s'insérer dans la scène sonore (par exemple, un disque de frein de véhicule qui grince).

Suite à une deuxième analyse, effectuée avec le plug-in PAZ Frequency de Waves, qui nous donne le niveau en fonction de la fréquence, il est constaté qu'en réalité, le domaine de fréquence dont il ressort le plus de niveau va de 60Hz à environ 2kHz. Il s'agit en fait des principales textures qui constituent le paysage sonore.

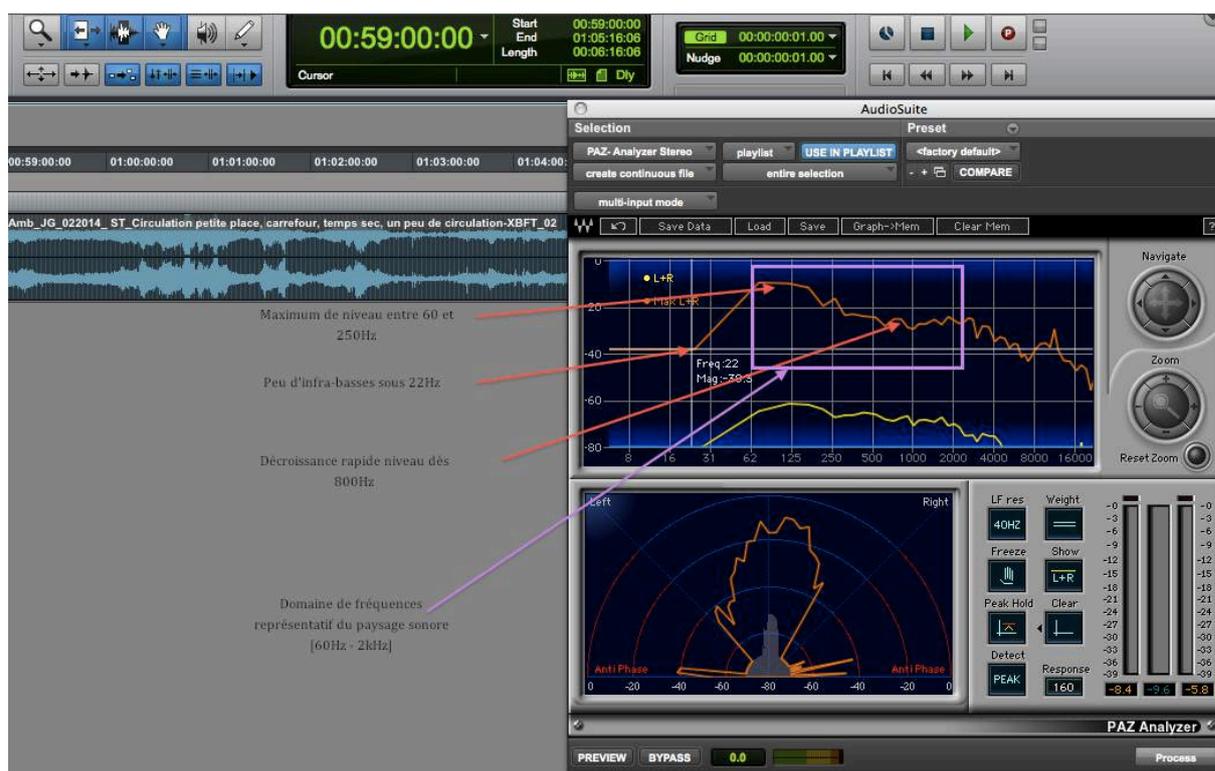


Figure 3 : Analyse fréquentielle d'un enregistrement stéréophonique d'une scène sonore d'un paysage urbain [Niveau = f (fréquence)]

Ce qui se passe au-delà de 2kHz fait partie du domaine des événements et sont des éléments ponctuels, d'où de nombreuses aspérités dans la courbe donnée.

De même, il existe de nombreux phénomènes de masquage du fait de l'accumulation de sources ayant respectivement des domaines de fréquences proches les uns par rapport aux autres.

La rumeur de ville qui est présente dans n'importe quel décor sonore de Paris intra muros occupe une grande partie de ce spectre, ainsi, les autres éléments ne font que s'ajouter à un spectre déjà occupé en grande partie.

En définitive, nous en concluons que le bruit routier, qui est une source large bande, occupe la majeure partie de la scène sonore dans un cas de prise de son comme celle-là. Bien évidemment, un autre endroit dans Paris ne donnerait pas forcément les mêmes résultats, néanmoins nous verrons par la suite que ce type de typologie sonore est très représentatif de Paris.

1.1.3 La variabilité de la scène sonore en fonction de la météorologie

Nous avons tous déjà remarqué la différence qui apparaît dans un paysage sonore urbain par temps de neige. En effet, la météorologie possède un rôle important dans la propagation des ondes sonores, et ceci est connu depuis nombre d'années.

Marin Mersenne en parlait déjà en 1627 dans son œuvre intitulée « *L'Harmonie Universelle* » [2], en disant : « *Il faut répéter plusieurs fois cette expérience, et particulièrement lorsque le vent est favorable et contraire, et que l'air est plein de brouillard et de vapeurs, ou qu'il est calme, clair et serein [...] et remarquer que le son va plus vite de haut en bas, que de bas en haut, en pleine montagne qu'à travers les montagnes et les vallées, sur l'eau des rivières, ou de la mer que sur la terre, et car ces différentes situations apportent de grandes différences aux sons* ».

On en déduit donc que dès le XVII^{ème} siècle, les scientifiques étaient au fait de l'influence de la météorologie sur la propagation des ondes sonores.

Ainsi, la scène sonore variera en fonction des divers phénomènes climatiques.

Il est, de ce fait, important de définir la notion d'**absorption sonore** en champ diffus.

Ce phénomène est régi par plusieurs facteurs, à savoir :

- L'éloignement du point d'écoute par rapport à la source ;
- Le contenu fréquentiel de la source (nous avons vu plus haut que le contenu fréquentiel est très riche dans ce type de situation) ;
- La température ambiante du milieu ;
- Le taux d'humidité du milieu (liée à la pression atmosphérique) ;
- La puissance du vent ;

De même, l'absorption atmosphérique a peu d'influence sur les basses fréquences, du fait de leur importante longueur d'onde (phénomène qui s'applique aussi en acoustique des salles).

La variation de perception de la scène sonore peut s'expliquer pour chacun des critères :

En ce qui concerne le vent, il aura tendance à souffler plus fort pour des altitudes élevées. En effet, près du sol (jusqu'à 20 mètres d'altitude), les constructions et autres aspérités de la ville auront tendance à ralentir l'évolution du souffle. Ainsi, cette différence de vitesse de souffle en fonction de l'altitude va favoriser une incurvation descendante des ondes sonores, ce qui aura pour conséquence la création d'une zone favorable de propagation du côté vent portant de la source, et la création d'une zone défavorable de propagation du côté de la source contre le vent.

Enfin, nous remarquons que l'influence est négligeable sur des distances inférieures à 50 mètres mais importante au-delà.

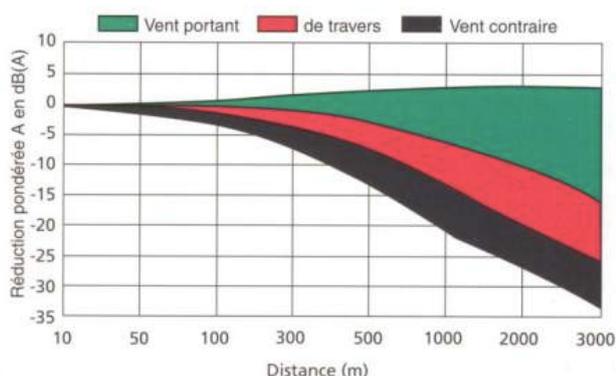


Figure 5 : Influence du vent sur la réduction du niveau sonore en fonction de la distance [3]

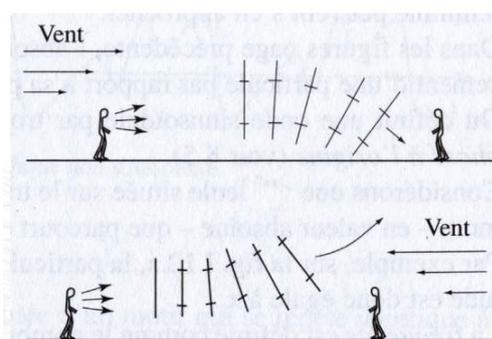


Figure 6 : Représentation du trajet des ondes sonores en fonction de leur position par rapport au vent [3]

En ce qui concerne la température, elle a tendance à être plus importante en surface de la terre et à diminuer avec l'altitude. Or la masse volumique de l'air sera plus faible pour des températures élevées. De ce fait, l'air en surface aura tendance à s'élever et les ondes sonores suivront. Il en résulte donc une diminution du niveau sonore en fonction du gradient de température. En revanche, si l'on prend l'exemple d'une nuit d'été par temps chaud, la température près du sol sera plus facilement faible que la température en basse altitude. A l'inverse, les ondes sonores suivront une décroissance d'altitude et il en résultera une augmentation du niveau sonore au niveau du sol.

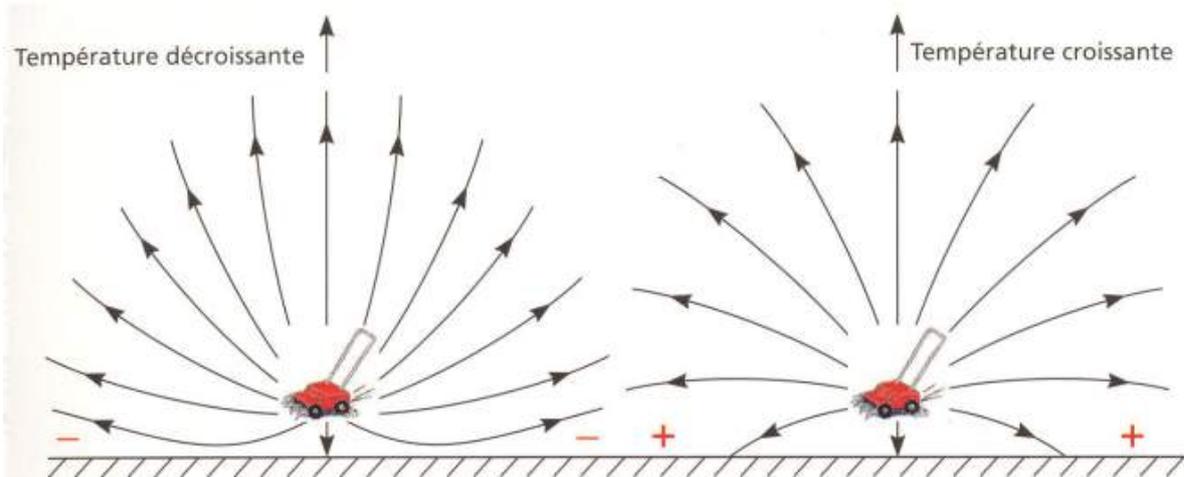


Figure 7 : Représentation du trajet des ondes sonores en fonction du gradient de température [Réf : acoustique environnementale BBRI.be]

Enfin le dernier critère à prendre en compte est le taux d'humidité dans l'air ambiant. En effet, la masse volumique de l'air humide n'est pas la même que celle de l'air sec. Cela implique déjà un changement de propagation des ondes sonores.

Au delà de ça, ce qu'il est important d'étudier est la parcours de l'onde sonore dans un milieu urbain. En effet, deux occurrences sont perçues par l'auditeur :

- L'onde directe, qui part de la source, et qui rejoint, de manière rectiligne l'oreille de l'auditeur ;
- L'onde réfléchi, qui vient heurter toutes les parois réfléchissantes, avant d'atteindre l'oreille de l'auditeur.

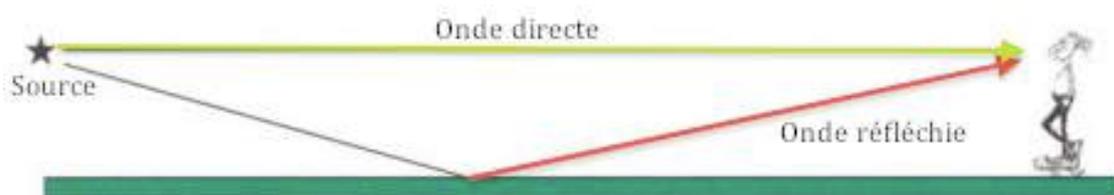


Figure 8 : Représentation du trajet de l'onde sonore, prenant en compte les effets de sol [Réf : acoustique environnementale BBRI.be]

C'est cette division de l'onde sonore qui a une influence sur la perception du son qui arrive à l'oreille de l'auditeur.

Les effets du sol ont une influence sur la fréquence perçue de l'onde sonore, en fonction de plusieurs critères : matière du sol, porosité du sol, humidité de l'air etc...

Il en ressort ainsi la courbe suivante, qui donne l'atténuation en décibels (dB) en fonction de la fréquence et du milieu sur lequel l'onde se réfléchit :

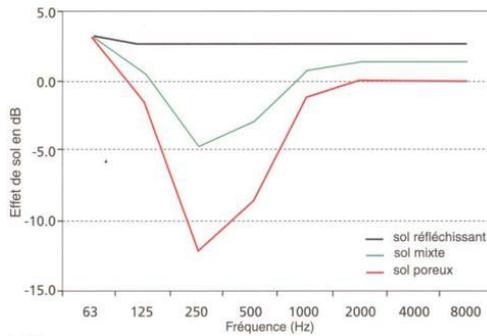


Figure 9 : Représentation de l'influence du sol sur l'atténuation (en dB) de certaines fréquences.

On comprend donc pourquoi, par temps de pluie, le spectre fréquentiel change et se retrouve ainsi concentré dans un domaine plus aigu. En effet, l'eau est un matériau absorbant, ce qui rend le sol poreux. Ainsi la répartition des ondes arrivant à l'oreille de l'auditeur se fait en faveur de l'onde directe.

Ainsi, nous comprenons qu'au vu de tous ces paramètres il sera nécessaire de choisir de manière très sérieuse les lieux dans lesquels nous ferons évoluer le véhicule électrique. En effet, il y a une telle variabilité dans un paysage sonore au sein d'une même ville qu'il sera nécessaire de choisir des paysages caractéristiques. Par exemple, un boulevard très passant à l'heure de pointe, une rue calme du XVIème arrondissement en plein mois d'août etc...

Maintenant que nous avons défini le cadre d'évolution des véhicules électriques, il est logique de s'intéresser au véhicule électrique à proprement parler. Dans un premier temps, nous allons analyser ce véhicule d'un point de vue extérieur puis dans une deuxième analyse, nous tâcherons de nous intéresser à l'acoustique perçue au sein de l'habitacle du véhicule.

1.2 Véhicules électriques = véhicule « silencieux » ?

Dans cette partie, il s'agit de faire un état de l'art de ce qui a déjà été fait en matière de sonification des véhicules électriques.

Jusqu'à présent, du fait de la non réglementation en ce qui concerne le sujet, beaucoup de théories ont été diffusées, dans l'unique but de répondre à la question suivante :

Avec quels types de sons peut-on équiper un véhicule silencieux, le tout en ayant une approche sur des critères précis de perception, mais aussi une vision plus artistique qui consiste à évaluer l'acceptabilité des usagers vis à vis de ces sons ?

Le Japon, qui est un grand fabricant de véhicules électriques, et plus particulièrement Tabata & al. propose une problématique simple liée au design sonore des véhicules électriques, qui est basé sur 3 critères :

- Les piétons doivent rapidement détecter le son ;
- Les sons émis à l'extérieur ne doivent pas être émis à l'intérieur du véhicule ;
- Les sons émis à l'extérieur ne doivent pas ajouter de la pollution sonore à l'environnement dans lequel le véhicule évolue.

1.2.1 Le véhicule électrique d'un point de vue extérieur.

Il existe indéniablement, à l'heure actuelle, une contradiction industrielle entre la volonté de rendre moindre le niveau sonore des paysages urbains et la sonification des véhicules électriques. En effet, qui dit sonifier dit ajouter du son à des véhicules qui pourtant, répondent aux recommandations anti-pollution sonore, car silencieux. Et pourtant, il est nécessaire d'apporter une signature sonore à ces véhicules, pour des raisons évidentes de sécurité et de cohabitation entre les différents usagers de la route. Quelles sont alors les solutions apportées par les industriels de l'automobile pour sonifier le véhicule électrique sans pour autant ajouter un domaine de fréquence au paysage sonore urbain ?

1.2.1.1 Menzel & al. – le niveau sonore des stimuli.

Menzel & al. [4] a mis en place une expérience qui consiste à diffuser 3 stimuli différents : un klaxon de voiture, un ralenti moteur de véhicule thermique et un bruit blanc filtré (de 100Hz à 1kHz). Ces 3 stimuli sont diffusés au sein de 4 ambiances différentes : une rue à double sens en ville avec circulation, une rue à double sens peu chargée dans un quartier résidentiel, une autoroute chargée et une petite rue dans un centre commercial.

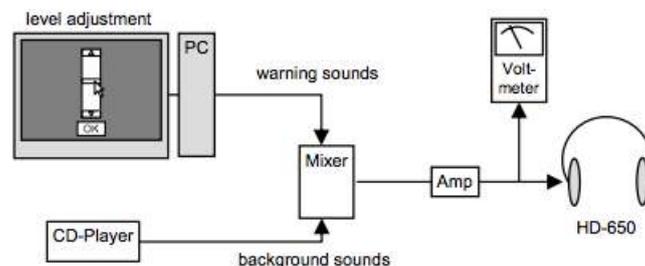


Figure 10 : Installation mise en place pour l'expérience.

Ce qu'il essaye de mettre en exergue dans cette expérience est le niveau sonore minimum requis émis par le véhicule électrique pour permettre au piéton ou à l'utilisateur de la route de le distinguer parmi toutes les autres sources. En l'occurrence, il est demandé aux sujets qui prennent part à l'expérience d'effectuer 2 « tâches » : la première consiste à ajuster le niveau sonore des stimuli pour qu'ils soient facilement audibles et se démarquent du fond sonore ; la deuxième consiste à ajuster le niveau sonore de ces mêmes stimuli afin qu'ils atteignent le seuil d'audibilité suffisant dans ces mêmes paysages sonores.

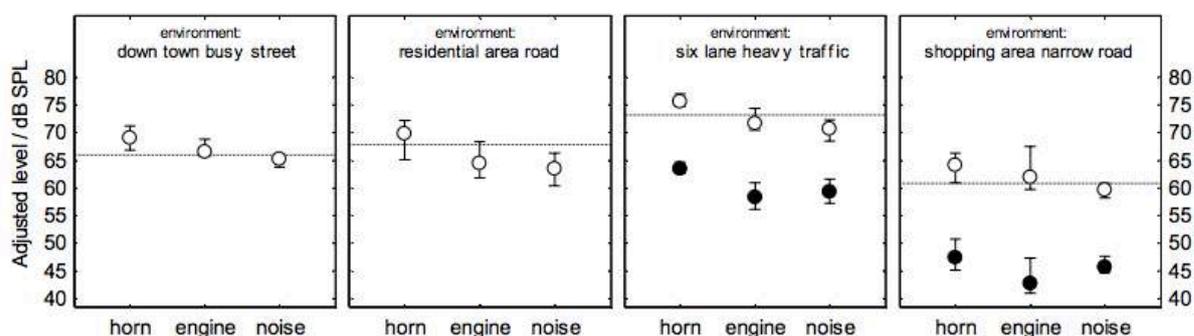


Figure 11 : Résultats de l'expérience (médianes et écarts interquartiles de l'étendue du niveau) [figures blanches : niveaux sonores absolu / figures noires : niveaux sonores au seuil d'audibilité]

La conclusion à tirer de cette expérience menée par Menzel & al. est la suivante : les recommandations gouvernementales actuelles en matière de niveau sonore émis par les véhicules électriques sont inadéquates. En effet, prenons un exemple : le Japon où il est imposé que les véhicules électriques doivent émettre un son à 50dB(A). Nous comprenons bien, par ces résultats, que fixer un tel niveau sonore aura pour conséquence un passage sous le seuil d'audibilité du véhicule de part les différentes situations et les différents stimuli. Il faut donc adapter le niveau sonore en fonction de la situation.

1.2.1.2 Wogalter & al. – la nature des stimuli.

L'enquête menée par Wogalter & al. [5] tend à définir quels types de sons correspondent le mieux au véhicule électrique, selon les usagers.

En effet, maintenant que nous savons à quel niveau sonore diffuser les stimuli éventuels issus du véhicule électrique, il faut maintenant essayer de déterminer quels stimuli

correspondent le mieux à l'image du véhicule électrique. Cette enquête est basée sur des critères subjectifs de préférences.

Un effectif de 285 personnes a donc été interrogé sur plusieurs points, notamment sur la sensibilisation à l'émergence du véhicule électrique dans le paysage sonore actuel.

A la question : « Quels type de sons verriez-vous le plus équiper les véhicules électriques (par exemple, bruits de moteur, sifflements, bourdonnements) ? », les résultats sont les suivants :

<i>Sound</i>	<i>Frequency (f)</i>
Engine	109
Hum	109
None	31
Music	14
Whistle	8
Beeps	5
Horn	5
Clicking	2
Exhaust	2

Figure 12 : Résultats de l'enquête menée par Wogalter & al. - Quels types de sons verriez-vous équiper le plus les véhicules électriques?

Le bruit de moteur et le bourdonnement ressortent en premier. Nous pouvons donc facilement confirmer ce qui était déjà assimilé, à savoir que les sons continus auront tendance à être plus facilement adaptables sur des véhicules électriques que des sons périodiques. En effet, dans l'esprit de sujets naïfs, les habitudes auraient du mal à être changées ; or le moteur d'un véhicule thermique émet un son continu, il faut donc rester sur un son de même nature. Pourquoi ne pas ajouter un son artificiel de moteur pour ne pas changer les habitudes des usagers de la route ? (Aussi bien piétons que conducteurs).

1.2.1.3 Sandberg & al. – Sonifier un véhicule électrique; est-ce vraiment nécessaire ?

La théorie de Sandberg & al. [6] est quant à elle, tout autre que les précédentes. En effet, il démontre que la sonification des véhicules électriques ne changerait rien aux problèmes d'insécurité dont tout le monde fait part jusqu'à présent.

Premièrement, les améliorations acoustiques qui ont été effectuées ces dernières années sur les véhicules thermiques leur permettent d'être, à basse vitesse, tout aussi silencieux que les véhicules électriques. En dessous de 20km/h, le bruit des pneus sur la route prédomine sur le bruit du moteur.

Il prend d'ailleurs pour référence une étude menée par le BRRC (Belgian Road Research Center) mettant en jeu la mesure du niveau émis par le moteur de véhicules

thermiques à une vitesse constante de 20km/h. Il en résulte que les bruits de moteurs sont considérés comme négligeables par rapport au bruit de la route à ces vitesses. Le problème étant que nombreuses sont les situations où les véhicules roulent au-dessus de 20km/h, auquel cas, cette assertion n'est plus valable. Or, dans un rapport de la Police Nationale évaluant le « Bruit à Paris » [7] de quelque source que ce soit, il est indiqué que la vitesse moyenne d'un véhicule dans Paris intra muros est d'environ 18km/h.

Deuxièmement, le fait de sonifier les véhicules électriques ne ferait qu'apporter encore en pollution sonore, et mènerait à une cacophonie sonore en plus des sons déjà existants.

Pourtant, il est conscient des problèmes de sécurité que pose l'absence de son des véhicules électriques, mais prône la vigilance accrue des conducteurs envers les autres usagers de la route.

Enfin, il explique que le fait que le véhicule électrique fasse moins de bruit que le véhicule thermique est déjà quelque chose d'acquis dans l'esprit des usagers de la route depuis quelques années. Nous nous serions donc habitués à cette carence en son et le fait d'ajouter du son de manière artificielle ne ferait qu'à nouveau changer les habitudes des usagers de la route.

Enfin, il donne comme argument que les véhicules thermiques actuels sont de plus en plus silencieux. Ainsi, si les industriels continuent sur cette lancée, les véhicules électriques et les véhicules thermiques se retrouveront sur un pied d'égalité quant au niveau qu'ils émettent.

En définitive, Sandberg & al. souhaite vraiment sensibiliser l'utilisateur sur de nouvelles manières de conduire. En effet, dans le document intitulé « *Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals?* » [6], il apporte énormément d'éléments sur la manière dont l'état d'esprit devrait s'adapter en fonction de la situation et du type de véhicule mis en jeu.

De ce fait, il propose donc un certain nombre de solutions alternatives à la sonification du véhicule qui sont les suivantes :

- Effectuer de nombreuses campagnes de publicités, sensibiliser les nouvelles générations de conducteurs et équiper les voitures de panneaux informatifs sur les dangers du silence des véhicules électriques ;
- Equiper les véhicules électriques de puces électroniques qui envoient des ondes radios sur un petit périmètre ; ainsi, les piétons équipés de récepteurs adaptés seraient informés de l'approche de ce véhicule ;

- Intégrer aux véhicules électriques des systèmes de prévision de choc, comme Volvo qui a équipé son modèle V60, qui freine automatiquement lorsqu'un objet étranger se présente sur la trajectoire du véhicule, ou encore comme la Toyota Crown Hybrid équipée d'un système de vision nocturne qui détecte les piétons plus facilement.



Figure 13 : Système de freinage automatique de Volvo V60 lors de la détection d'un élément étranger sur la trajectoire du véhicule.



Figure 14 : Aperçu du système Night View de Toyota qui permet une détection rapide des piétons en vision nocturne.

Il est difficile, après avoir lu les précédents articles d'apporter une réponse unique à la question de la sonification. D'un côté nous avons Menzel & al., Wogalter & al. ou encore Kerber & al. qui s'accordent sur le fait qu'il est absolument nécessaire de sonifier ces nouveaux véhicules silencieux, car ils apportent un nouveau type de danger pour les piétons et pour les usagers. De l'autre, Sandberg & al. vient démontrer que ce n'est pas nécessairement utile, car les piétons n'écoutent pas forcément ce qu'il se passe sur la route (ils sont de plus en plus nombreux à porter des écouteurs par exemple). De même, il explique qu'ils sont déjà habitués à ne pas entendre les véhicules du fait d'une rumeur de ville très importante qui vient masquer l'approche du véhicule, enfin ajouter du son sur les véhicules silencieux serait en contradiction avec les politiques de réduction de bruit de fond en ville.

Cependant, Sandberg & al. et les autres n'aborde pas un point qui nous semble essentiel : la sensation de vitesse ressentie par le conducteur du véhicule silencieux. Qu'en est-il dans l'habitacle ?

1.2.2 Le véhicule électrique d'un point de vue intérieur

Les progrès effectués dans l'industrie automobile se font aussi bien au niveau des performances des véhicules en terme de vitesse, d'écologie ou encore de design mais aussi en terme de confort de conduite. Pour cela, il est nécessaire de rendre le cadre de

vie du conducteur le plus agréable possible, et cela passe notamment par la réduction des bruits extérieurs à l'habitacle.

Il faut cependant modérer cette volonté de rendre quasi anéchoïque le cadre de vie du conducteur, car certains signaux sonores sont nécessaires à son jugement et au bon discernement de la situation dans laquelle il se trouve (régime moteur, alertes d'autres usagers etc...). De même, les voitures dites de sport ne doivent pas trop isoler ces bruits de moteur, car nombreux sont les acheteurs de ce type de voitures qui sont justement séduits par les bruits de moteurs lors d'une accélération.

1.2.2.1 Un peu d'acoustique

Une voiture en mouvement engendre de nombreux phénomènes vibratoires qui viennent nuire au confort de l'utilisateur. En effet, que ce soit des bruits d'aérodynamisme liés à la vitesse, le bruit des pneus sur le revêtement de la chaussée ou encore les bruits de carrosserie, tous créent des vibrations qui entraînent une modification de l'acoustique de l'habitacle.

Nous pouvons diviser ces types de nuisances en 3 catégories simples : les sons basses fréquences (qui sont principalement dus au son émis par le moteur), moyennes fréquences (qui proviennent le plus souvent de la mécanique du véhicule) et hautes fréquences (qui sont produits le plus souvent par des phénomènes aérodynamiques).

Parmi les sons basses fréquences, on retrouvera notamment le bourdonnement lié au bruit du moteur. Pour palier à cette nuisance, on favorisera l'utilisation de pièces en élastomère favorisant le découplage entre le moteur et l'habitacle. Ainsi, les vibrations entre le point de jonction moteur/châssis sont amorties. De même, il est possible d'augmenter l'épaisseur de l'isolant sur le tablier (cloison entre le compartiment moteur et l'habitacle).

En ce qui concerne la vibration des roues, il est possible, encore à l'aide d'élastomère, de réduire rapidement la nuisance apportée par le train roulant du véhicule.

Enfin, de nombreuses simulations numériques sont effectuées pour prédire les vibrations engendrées par la carrosserie ou l'air qui vient se frotter au véhicule.

Pour la carrosserie, certains problèmes peuvent être résolus en ajoutant des renforts sur cette dernière, de façon à accroître sa raideur, ce qui lui confèrera ainsi une moins grande flexibilité et réduira la propagation des vibrations. La correction acoustique de la carrosserie est une opération très délicate car quelque changement que ce soit induit de nouvelles propriétés vibratoires et peut ainsi avoir des effets néfastes sur un autre paramètre.

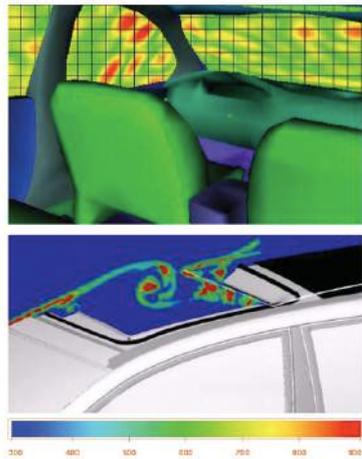


Figure 15 : Simulations d'écoulements d'air sur un véhicule à toit ouvrant ou sur les vitrages [8]

Enfin, en ce qui concerne les sons hautes fréquences, on s'intéressera plutôt à la réduction des bruits de circulation d'air au sein du véhicule. L'exemple le plus représentatif est celui du rétroviseur. En effet, les sifflements qu'il est capable d'engendrer peuvent rapidement nuire à l'acoustique de l'habitacle, mais le rétroviseur est surtout capable de transmettre des vibrations à la carrosserie. Ainsi, nous revenons au problème précédent, consistant à réduire les phénomènes vibratoires de la carrosserie. Ce phénomène se produit aussi avec les joints des fenêtres et pare-brise. Il est nécessaire qu'ils soient suffisamment épais pour assurer l'étanchéité du véhicule à l'air et à l'eau, mais il ne faut pas qu'ils soient trop épais, sous peine de créer une rupture dans les courbes de la carrosserie, ce qui impliquerait des écoulements tourbillonnaires, qui sont les principaux écoulements générateurs de bruits.

1.2.2.2 La méthode VINS

Une méthode très utilisée par l'industrie automobile pour prédire au mieux les contributions de bruits induits, qu'ils soient solidiens ou aérodynamiques, est la suivante : la méthode VINS (Vehicle Interior Noise Simulation) [9]. Nous allons essayer de détailler cette méthode de simulation.

La méthode VINS se divise en deux parties principale : la première partie consiste à mesurer la contribution des transmissions aérodynamiques au sein du véhicule.

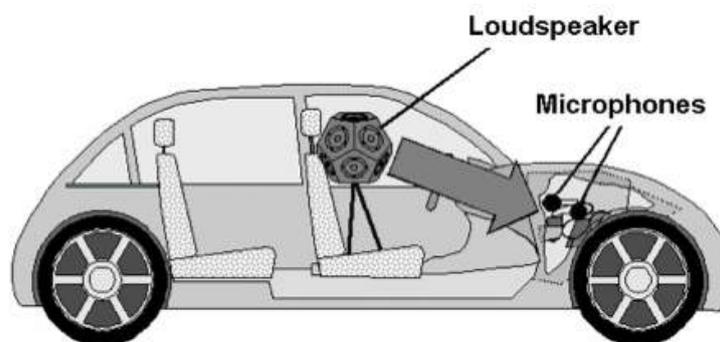


Figure 16 : Principe de mesure de transmission de bruit aérodynamique dans l'habitacle selon la méthode VINS.

La mesure se fait ici de manière réciproque. En effet, une enceinte sphérique envoie des stimuli qui doivent symboliser les sources de bruit aérodynamiques et une tête artificielle microphonique placée dans le compartiment moteur vient enregistrer ces sources. Cette méthode a plusieurs avantages par rapport à la méthode classique :

- Il n'y a pas nécessité d'enlever le moteur pour les mesures ;
- On obtient une fonction de transfert unique pour chaque type de compartiment moteur ;
- Une mesure fidèle du comportement acoustique du compartiment moteur est effectuée.
-

La deuxième partie de la méthode VINS consiste en la mesure de la transmission des bruits solidiens issus du châssis du véhicule.

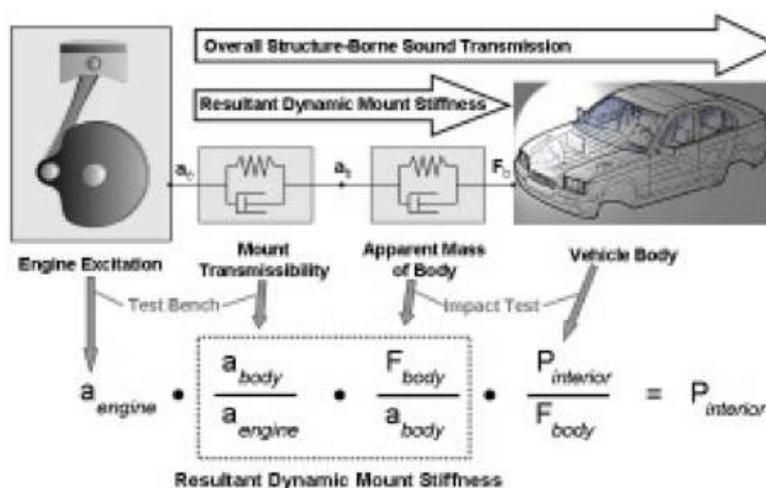


Figure 17 : Principe de mesure de transmission de bruit solidien dans l'habitacle selon la méthode VINS.

On peut aisément voir sur la figure 16 que l'on obtient facilement la pression acoustique résultant des sources de bruits induites par l'excitation du moteur et de tout le compartiment moteur/transmission.

Enfin, on comprend rapidement que la méthode VINS a ses limites, du fait de l'unique prise en compte de ces deux paramètres. Il est clair que l'acoustique résultante dans un habitacle de véhicule ne se limitera pas aux seules contributions aérodynamiques et solidiennes dont la source principale est le moteur. Bien évidemment, cette méthode permet de prédire une partie importante de l'acoustique globale de l'habitacle, mais nous allons voir que tout ceci ne suffit pas.

1.2.2.3 Le cas du véhicule hybride (HEV).

Nous nous intéressons au véhicule hybride lorsque les vitesses sont assez basses afin qu'uniquement le moteur électrique soit en route. Ainsi, on peut assimiler le véhicule hybride au véhicule tout électrique.

La mission des ingénieurs n'a cessé d'évoluer depuis l'apparition de plus en plus massive de véhicules équipés de moteurs nouvelle technologie. Il s'agit maintenant de se concentrer sur les bruits perçus qui ne sont plus masqués par les bruits de moteur à combustion. De même, les acousticiens qui mettent au point la signature sonore de l'habitacle ne peuvent pas se contenter uniquement d'une réduction de ces bruits indésirables, mais doivent jouer avec les émotions et les sensations de l'utilisateur. Nous irons même plus loin en disant que le son perçu au sein de l'habitacle doit être délibérément créé de toute pièce. Cela veut donc dire que certains sons perçus doivent être accentués alors que d'autres sons, aux propriétés plus désagréables à l'écoute doivent être éliminés. En effet, ce Sound design effectués sur les véhicules hybrides doit refléter la performance du véhicule, l'image de marque du groupe automobile, ou encore les préférences de l'utilisateur.

Prenons comme premier exemple le cas où le HEV est à l'arrêt, où il est maintenant commun que le moteur se coupe. L'utilisateur n'étant pas forcément coutumier de cette technologie, des transitions trop brutales peuvent conduire à des plaintes de ce dernier. Il faudra donc que les arrêts ou les démarrages du moteur se fassent de manière plus douce, via des rampes de coupure ou de redémarrage.

Par conséquent, au vu de cet exemple, de nombreuses simulations acoustiques sont effectuées sur des véhicules prototypes faisant ressortir les propriétés acoustiques des différents évènements.

La figure 14 montre le spectrogramme effectué lors d'une accélération d'un prototype de HEV. On peut distinguer plusieurs évènements :

- La partie encadrée de vert représente la partie tout électrique du véhicule ;
- L'onduleur qui émet un bruit continu aux alentours de 7kHz ;
- La rumeur de moteur électrique que l'on distingue entre 500Hz et 2kHz et qui tend à s'arrêter lorsque le moteur à combustion prend le dessus ;
- L'allumage du moteur à combustion à environ 7,5 sec.

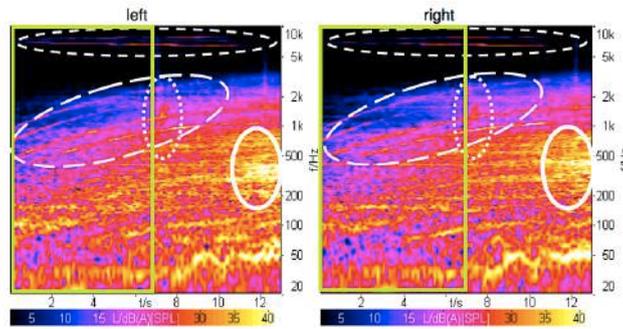


Figure 18 : Spectrogramme du bruit de fond intérieur lors d'une accélération de 0 à 50 km/h, [10].

Le principal enjeu des acousticiens est donc d'essayer de juger quels sont les bruits à éliminer et quels sont ceux qui, au contraire, donnent des informations à l'utilisateur. Par exemple, est-il nécessaire d'entendre de manière continue le bruit de l'onduleur ? D'un côté, il paraît logique de le garder de manière à informer le conducteur du bon fonctionnement du moteur électrique. De l'autre, il s'agit d'un son qui peut vite devenir désagréable car il émet une fréquence quasi continue à 7kHz.

1.2.2.4 Le cas de la Fiat FEV Liion Drive

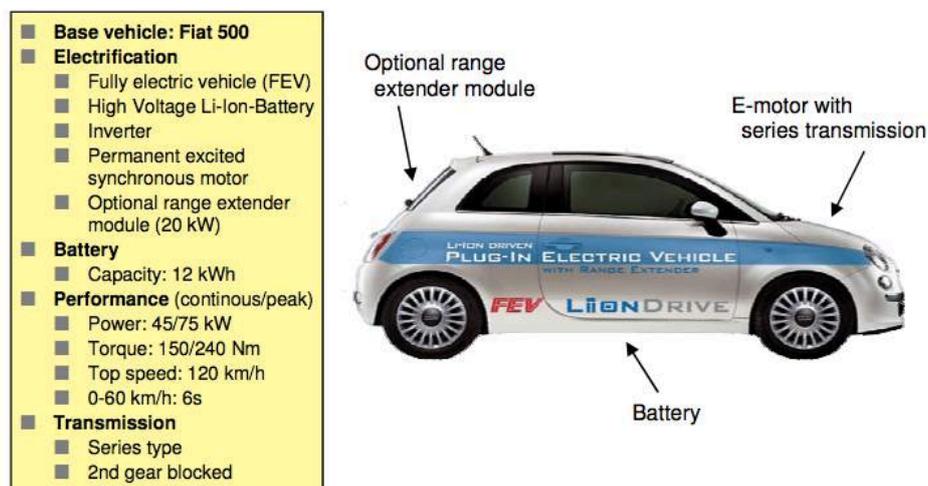


Figure 19 : Spécifications du prototype Fiat 500 LiionDrive, [11].

1.2.2.4.1 Du point de vue fréquentiel

Ce modèle de véhicule électrique est basé sur un modèle grand public qui, encore aujourd'hui, est fabriqué en masse. L'architecture de la Fiat 500 LiionDrive est la même que la Fiat 500 thermique. C'est sous la calandre que tout fait la différence. En effet,

même si la LiionDrive garde les transmissions de série, le moteur quant à lui est tout électrique, et est alimenté par batteries Litium-Ion.

Encore une fois, au delà du fait des technologies tout à fait différentes, ce qui change considérablement entre la Fiat 500 thermique et la Fiat 500 électrique, c'est le ressenti acoustique aussi bien au sein de l'habitacle qu'à l'extérieur. Nous nous intéresserons ici uniquement à l'acoustique intérieure du véhicule.

Comme sur les autres véhicules, le fait de ne plus avoir cette contribution sonore du moteur à combustion induit l'apparition de nouvelles sources qui étaient jusque-là masquées. La plupart de ces sources interviennent dans un domaine de fréquence relativement haut, ce qui à pour conséquence d'être désagréable à l'oreille, du fait de sa sensibilité plus accrue dans ce domaine de fréquences. Quelles ont été les solutions apportées pour créer l'ambiance sonore intérieure de ce véhicule ?

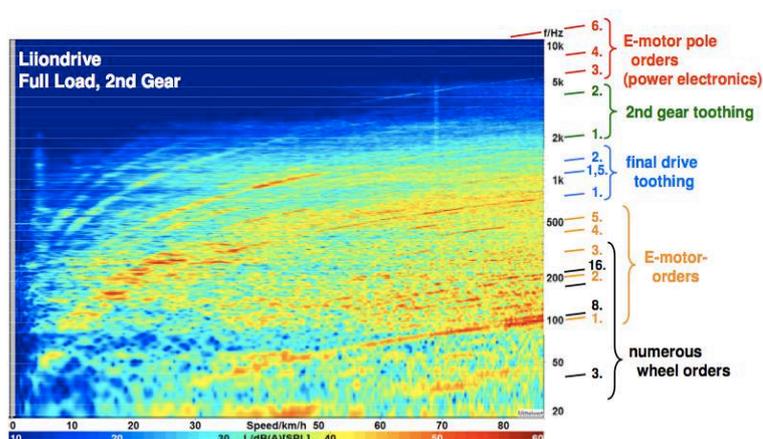


Figure 20. : Spectrogramme de l'habitacle de la Fiat 500 LiionDrive - Fréquence = f (vitesse), [11].

On remarque sur ce spectrogramme que de nombreuses occurrences viennent agrémente l'acoustique de l'habitacle (que ce soit la pompe à huile, la pompe à eau, le système de ventilation etc...) Tous ces éléments sont des contributions matérielles. Certaines sont nécessaires pour le jugement du conducteur, d'autres sont à éliminer.

Nous allons ainsi pouvoir exploiter les résultats d'une analyse comparative du son qu'émettent les différents moteurs dans le compartiment à moteur lors d'une accélération sur un même rapport de vitesse. Les deux sujets sont la Fiat 500 thermique équipée d'un moteur essence 1,2L 4 cylindres et la Fiat 500 LiionDrive tout électrique, du fait qu'elles aient exactement le même « corps ».

Le spectrogramme suivant nous montre la différence spectrale entre le moteur thermique qui équipe la Fiat 500 série et le moteur électrique de la Fiat 500 LiionDrive. Connaissant le mode de fonctionnement du moteur thermique (voir Figure 18), on détecte rapidement que le domaine fréquentiel [200-500Hz] est le fruit de la mécanique du moteur. Cependant, on remarque aussi de nombreuses occurrences dans un domaine fréquentiel que l'on ne soupçonne pas : [1-7kHz]. Il s'agit des différentes fréquences de résonance et des chocs entre les différents matériaux constitutifs du moteur.

Le moteur électrique quant à lui est de manière évidente moins bruyant au vu du spectrogramme résultant. Les contributions du moteur interviennent principalement entre 500Hz et 1,5kHz. De même, on ne retrouve pas de bruits large bande dans le haut du spectre, qui sont caractéristiques des résonances des moteurs thermiques, mais des domaines de fréquences très ténus, qui correspondent soit à l'onduleur, soit à l'inverseur etc...

Enfin, les bruits d'aérodynamismes liés à la vitesse, mêmes s'ils sont peu présents dans le compartiment moteur, ressortiront plus facilement sur le véhicule électrique que sur le véhicule thermique, car ils sont masqués par les nombreuses contributions aigues du moteur thermique.

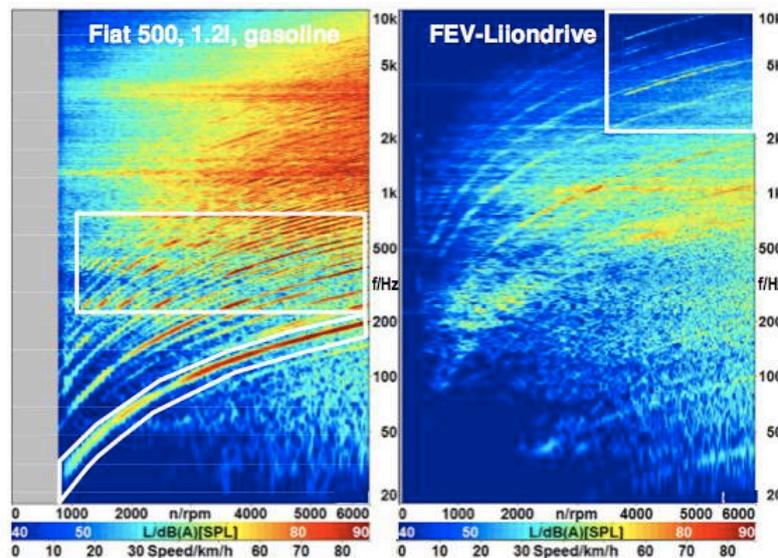


Figure 21 : Comparaison fréquentielle entre le moteur essence 1,2L 4 cylindres et du moteur tout électrique (fréquence = f [tours/minutes]), [11].

Nous constatons ainsi que de nouveaux problèmes de perception font surface en terme de qualité de conduite. Le conducteur n'entendra plus le son de son moteur, et aura besoin de nouveaux indices de bon fonctionnement de son véhicule.

Cycle à 4 temps allumage commandé

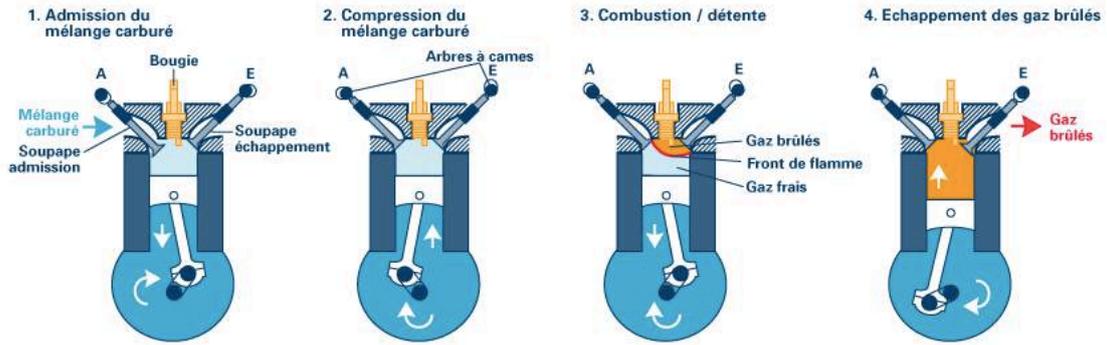


Figure 22: Principe de fonctionnement d'un moteur thermique 4 cylindres

1.2.2.4.2 La dynamique perçue.

Il est certes important de percevoir une retranscription fidèle de la cartographie fréquentielle lorsque nous nous situons dans l'habitacle du véhicule, mais il en va de même pour la dynamique perçue. Cet aspect a tendance à évaluer la performance plus que l'agréabilité acoustique du véhicule.

Nous allons donc évaluer à quel point le véhicule électrique rend compte de la performance du moteur avec lequel il est équipé. Toujours sur la comparaison entre la Fiat 500 équipée d'un moteur essence 1,2L 4 cylindres et la Fiat 500 LiionDrive tout électrique, nous allons analyser les spectrogrammes suivants :

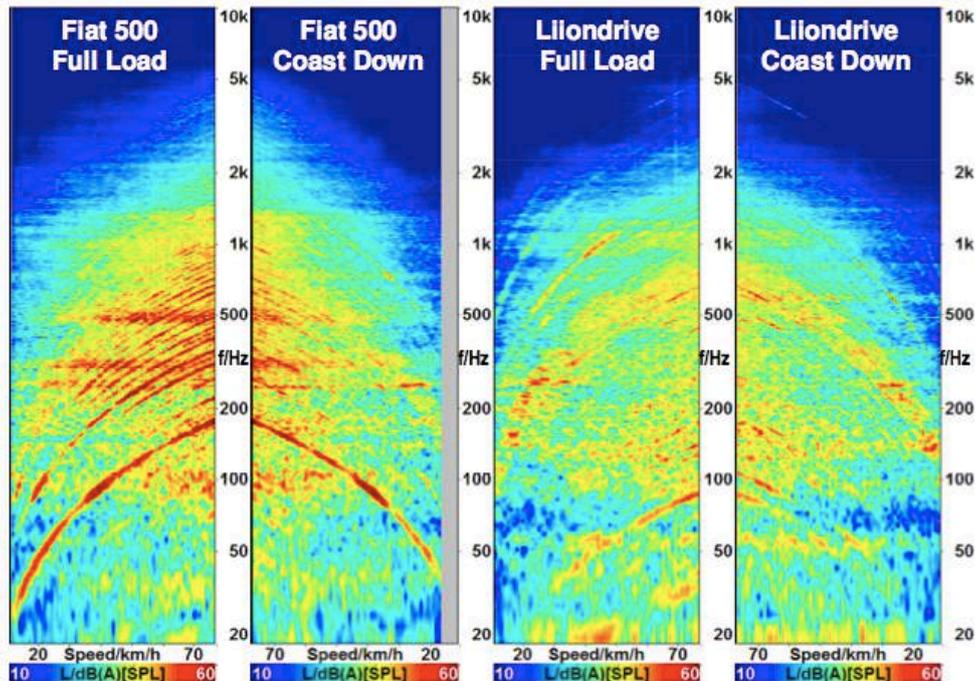


Figure 23 : Comparaison de l'acoustique de l'habitacle entre une Fiat 500 série et une Fiat 500 LiionDrive en phase d'accélération et de roue libre, [11].

En ce qui concerne l'accélération, nous retrouvons les mêmes résultats que sur les tests fréquentiels. Globalement, les mêmes domaines de fréquences sont mis en jeu, même si les mesures sont maintenant effectuées dans l'habitacle et non dans le compartiment moteur. Les contributions aigues des 2 moteurs sont moins présentes, et des sons qui se situent dans le domaine des basses fréquences apparaissent ; ce sont les bruits d'aérodynamisme, qui sont quasi inexistant dans le compartiment moteur.

Ainsi, nous remarquerons que la Fiat 500 série aura tendance à mieux rendre compte de l'accélération du fait de la technologie du moteur et de son ronronnement caractéristique, chose dont ne bénéficie pas le moteur électrique. En phase de décélération ou de roue libre, nous retrouvons globalement le même schéma mais de manière symétrique.

De là, il est facile d'en conclure que l'impression de performance rendue par le véhicule électrique sera moins flagrante que sur le véhicule thermique. Le bruit du moteur ayant un rôle très important dans cette impression de vitesse lors d'une accélération, le véhicule électrique pâtira du manque de son qu'émet son moteur électrique. Ainsi, nous avons tendance à sous estimer la performance du véhicule électrique de part son silence.

1.2.2.4.3 L'acoustique perçue : uniquement une question de motorisation ?

Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'effectuer des mesures à vitesse constante. Lorsqu'un véhicule roule à vitesse constante, le niveau sonore perçu du moteur au sein de l'habitacle est globalement moins important que lors d'une accélération. Ce sont les bruits d'aérodynamisme et de roulements qui prennent le dessus.

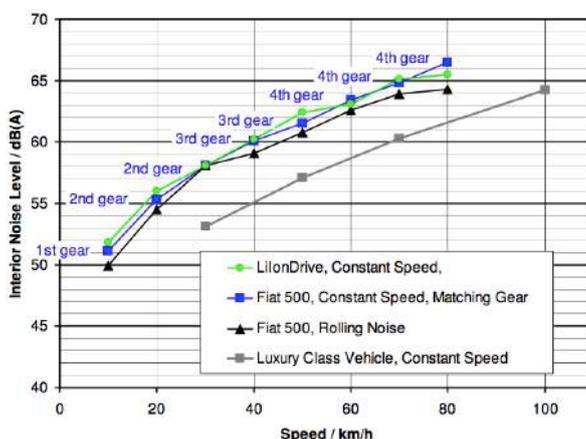


Figure 24 : Comparaison des niveaux perçus dans l'habitacle de différents véhicules à vitesse constante à différentes vitesses (Niveau = f[vitesse]), [11].

Sur ce diagramme représentant le niveau perçu dans l'habitacle à une vitesse donnée, nous remarquons que globalement, à toutes les vitesses testées, les courbes de niveaux de la Fiat 500 série équipée d'un moteur thermique et la Fiat 500 LiionDrive sont quasiment similaires, et sont juste au-dessus de la courbe de niveau représentant le niveau perçu lorsque le véhicule est en roue libre.

En revanche, la courbe du véhicule haut de gamme équipé d'un moteur similaire à la Fiat 500 série sera bien en-dessous de la courbe de cette dernière.

Nous en concluons donc que le niveau de bruit perçu dans l'habitacle est plus influencé par les matériaux composant le véhicule et son isolation, que par sa motorisation. Il est vrai qu'aujourd'hui, à condition d'y mettre le prix, nombreuses sont les voitures équipées de moteurs thermiques, dont le niveau sonore dans l'habitacle est comparable à celui perçu dans les véhicules électriques. Il s'agirait donc plus d'une question d'isolation que de motorisation.

Encore une fois, il faut être prudent avec cette interprétation. Seuls les voitures haut de gamme bénéficiant d'une chaîne de production et de matériaux de qualité peuvent prétendre à entrer en concurrence face aux véhicules électriques quant aux niveaux sonores dans l'habitacle.

Ce travail d'exploration nous a permis d'identifier les différents problèmes auxquels les professionnels de l'automobile nouvelle génération doivent faire face en ce qui concerne sa sonification.

Dans un premier temps, il faut aborder la question du paysage sonore dans lequel le véhicule évoluera. Les trois paramètres principaux sont la fréquence, la dynamique et la variabilité en fonction de la météorologie. En effet, à l'heure actuelle, on peut assimiler le bruit urbain à un bruit large bande. Il est évident que l'aspect fréquentiel dépend de la dynamique et des éléments constitutifs de ce paysage sonore. Il est donc très important de définir le cadre d'études dans lequel nous ferons évoluer le véhicule électrique. En effet, ce genre de véhicule, très peu gourmand en énergie sera préféré dans les espaces urbains car il ne pollue pas et entre ainsi dans le cadre de la politique actuelle de réduction de pollution (de l'air et pollution sonore). Ainsi, nous concentrerons notre étude à une mégalopole telle que Paris, représentative d'un paysage sonore urbain. Il y existe une dynamique extrêmement variable, liée de manière intime aux sources sonores. Un boulevard très passant à l'heure de pointe n'aura évidemment pas la même dynamique qu'une rue calme dans un quartier résidentiel. Cette dynamique sera due aux différences de sources sonores, et le tout entraînera une modification du spectre

fréquentiel. Nous en concluons que tous les paramètres sont liés les uns par rapport aux autres.

C'est ici que la question de la sonification du véhicule entre en jeu. Est-il nécessaire de rendre audible un véhicule dont une des principales caractéristiques est d'être silencieux ? Certains diront qu'un véhicule silencieux dans un paysage sonore urbain pose des problèmes de sécurité évidents, le principal étant la cohabitation entre les utilisateurs de véhicules électriques et les autres usagers de la route.

En effet, un véhicule silencieux dans un paysage sonore ne permet pas aux piétons de prévoir l'arrivée du véhicule, ce qui entraînerait de nombreux accidents. Se pose alors la question de la manière dont il faut sonifier le véhicule. Quelle doit être la nature des stimuli, leur niveau sonore, doivent-ils être continus ou aléatoires ? Autant de questions que de réponses apportées par les scientifiques. Cela n'est pas étonnant, car une importante part de subjectivité entre en jeu. Il faut d'une part que la sonification soit efficace, c'est-à-dire qu'elle joue un vrai rôle d'alerte, mais il faut aussi qu'elle soit agréable pour l'utilisateur.

D'autres prennent le parti de ne pas sonifier un véhicule. Effectivement, la politique actuelle de réduction du niveau sonore en ville trouverait sa solution dans le véhicule électrique (silencieux) et son développement en masse.

Il est donc facile de comprendre que la question de la sonification du véhicule électrique ne trouve pas une seule réponse mais autant de réponses que de théories. Qu'en est-il alors de l'acoustique perçue au sein de l'habitacle ?

Dans un véhicule, la principale source sonore perçue par l'utilisateur est le bruit du moteur. A partir d'une certaine vitesse, les bruits d'aérodynamisme entrent en jeu. La vibration des roues, et de la carrosserie vient s'ajouter aux flux d'air qui s'engouffrent dans les orifices d'aération. Au delà des critères objectifs concernant des éléments concrets du véhicule, l'utilisateur est très attaché au confort de conduite. D'autres notions comme la performance, la fatigue auditive entrent en compte, et il est donc important de définir une signature sonore du véhicule qui correspond le mieux au chauffeur. Plusieurs questions se posent alors : le moteur n'étant plus une source de bruit, d'autres éléments jusqu'alors masqués par la contribution du moteur ressortent. Il faut alors isoler ces derniers, mais jusqu'à quel point ? Il est nécessaire par exemple d'être au fait de certaines source sonores qui interviendront dans le jugement de l'utilisateur et qu'il ne faudra donc pas essayer de masquer.

Plus qu'une question d'isolation : doit-on garder une acoustique qui, comme sur les véhicules thermiques est uniquement le fruit des éléments mécaniques, ou au contraire,

doit-on ajouter des sons de manière artificielle ? En effet, après une analyse fréquentielle et dynamique, on se rend compte que la performance perçue par l'utilisateur n'est pas fidèle. Une fréquence continue, une dynamique relativement plate ne donne pas une impression de vitesse lorsque le véhicule est en pleine accélération. Ainsi, il pourrait être idéal d'ajouter un son d'accélération.

Encore une fois, nous nous rendons compte que la sonification du véhicule à l'intérieur de l'habitacle, comme pour l'extérieur, n'est pas facile. Il faut travailler avec de nouveaux outils, les technologies utilisées jusqu'à présent changent du tout au tout, et il demeure encore la question principale : y'a-t-il une réelle nécessité de sonifier le véhicule ?

Nous allons, dans la suite de ce travail, grâce à la mise au point de certains outils de simulation et de tests perceptifs, de répondre à ces questions. Nous n'avons évidemment pas la prétention de pouvoir apporter une réponse unique à ces questions sur lesquels les scientifiques travaillent depuis des années. Nous espérons tout de même pouvoir apporter une contribution cohérente sur les questions suivantes : est-il nécessaire de sonifier un véhicule électrique (silencieux) d'un point de vue extérieur mais aussi d'un point de vue intérieur. Ainsi, cette sonification permettrait de rendre compte de la performance du véhicule. Aussi, sonifier permettrait de renforcer la sécurité concernant la cohabitation véhicule électrique – autres usagers de la route.

2. L'environnement dans lequel évolue le véhicule électrique – Classification des paysages sonores.

Il va ici s'agir d'établir une typologie sémantique qui rendra compte du paysage sonore urbain au sein de la ville de Paris.

En effet, le but de ce travail étant la conception d'un outil de simulation d'évolution d'un véhicule électrique dans un environnement sonore urbain, il est nécessaire d'effectuer des travaux préalables quant aux lieux dans lequel le véhicule évolue.

Pour ce faire, il est nécessaire d'établir un certain nombre de notions ainsi que les prérequis nécessaires, qui nous permettront par la suite d'obtenir un outil cohérent et en adéquation avec la problématique principale.

Nous allons de ce fait reprendre notre étude sur le paysage sonore urbain, afin de définir réellement le cadre d'étude dans lequel nous allons évoluer, en regard de ce que nous avons déjà établi dans la première partie.

Dans un premier temps, nous nous baserons sur les travaux déjà effectués par les scientifiques sur la catégorisation des paysages sonores urbains. Nous essayerons d'en tirer les conclusions nécessaires à l'établissement d'une catégorisation personnelle, qui nous permettra, à terme, de définir des paysages sonores extrêmes, rendant compte de la diversité des environnements au sein de la ville de Paris.

Cette démarche débouchera sur des tests perceptifs qui auront pour but de répondre à la question suivante : Quelle est la meilleure solution de sonification à apporter au véhicule électrique dans une situation de paysage sonore urbain ?

2.1 Définition des différentes typologies sonores.

Nous avons vu dans une première approche que définir un paysage sonore urbain n'était pas chose aisée. En effet, de nombreux paramètres sont à prendre en considération dans la manière dont un sujet va percevoir une scène sonore.

Il va s'agir dans cette partie d'essayer de trouver une classification cohérente des différents paysages sonores présents au sein de la ville de Paris. En effet, nous nous limitons à Paris intra muros, du fait de la grande diversité qu'il existe déjà dans cette ville. De plus, c'est un lieu que nous connaissons bien, du fait que nous le côtoyons tous les jours.

Le but à terme est de définir les lieux dans lesquels nous allons procéder à la campagne d'enregistrement.

Ainsi, le choix des scènes sonores est un élément indispensable au bon déroulement de ce travail de simulation. En effet, l'établissement de scénarii d'usage demande à ce que l'image sonore restituée soit fidèle à la scène sonore initiale.

Nous allons donc dans un premier temps nous intéresser aux différentes méthodes de classification déjà existantes avant de trouver notre propre catégorisation sémantique définissant les paysages sonores de Paris les plus extrêmes.

2.1.1 Une classification pragmatique et objective.

J.D. Polack & al. [12] étudie, au moyen d'une enquête, la perception des espaces urbains. En effet, il réalise des tests perceptifs qui lui permettront d'affirmer ou non la validité d'une première classification typo-morphologique des environnements urbains. Dans un premier temps, il effectue une analyse par composante principale de 42 stimuli de paysages sonores urbains. De cette analyse, il ressort trois facteurs principaux : la densité du trafic, la forme de la rue ainsi que la largeur de cette même rue. Nous obtenons alors les résultats de cette analyse sous forme d'un nuage de points, répartis sur un plan à 2 axes, le premier représentant le degré d'ouverture de la rue (une voie ou plusieurs voies) et le deuxième représentant le niveau de trafic dans cette même rue.



Figure 25 : Graphique en nuage de points donnant une première catégorisation globale du paysage sonore urbain de Lyon [Réf : Polack – Perceptive Relevance of soundscape descriptors : a morpho-typological approach (2008)].

Dans un deuxième temps, J.D. Polack & al. effectue une analyse par cluster. Cette analyse vise à diviser un ensemble de données en différents « paquets » homogènes, en ce sens que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes, qui correspondent le plus souvent à des critères de proximité que l'on définit en introduisant des mesures et classes de distance entre objets. Ainsi, cette méthode va

permettre, à partir de la catégorisation précédente, de déterminer une classification des paysages sonores urbains de manière plus précise. Les caractéristiques qui composent chaque catégorie sont des critères physiques (architecture de la rue, nombre de voies de circulation etc...).

Voici donc une représentation des cinq catégories issues de ces analyses :

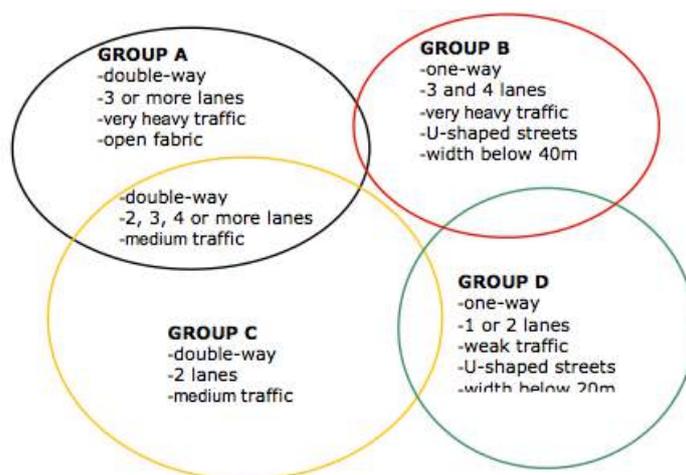


Figure 26 : Classification plus détaillée des différents paysages sonores de la ville de Lyon [Réf : Polack – Perceptive Relevance of soundscape descriptors : a morpho-typological approach (2008)].

A des fins de validation de cette classification, des tests perceptifs sont effectués sur des sujets naïfs. Le protocole est le suivant : des enregistrements multicanaux respectant les contraintes de ces cinq catégories ont été effectués et diffusés en laboratoire. Les participants doivent alors répondre à un certain nombre de questions.

Les résultats sont plutôt positifs, du fait que un tiers des personnes savent répondre à la question « Pouvez vous indiquer dans quel type de lieu vous vous imaginez être et où situez-vous ce lieu ? ».

En effet, ils n'ont pas de mal à situer le lieu où l'enregistrement a été effectué. Du moins, s'ils ne sont pas capables de retrouver le lieu précis, ils savent déterminer le type de lieu.

Ainsi, on peut considérer qu'il est cohérent de se baser sur cette classification dans un premier temps.

Il est certain que ces cinq classes demandent à être précisées et étoffées, mais partons de cette base pour définir une sémantique des différentes typologies urbaines.

En définitive, l'analyse de J.D. Polack peut servir de base pour une typologie objective des environnements urbains. En effet, ces cinq catégories englobent tous les paysages sonores que l'on retrouve dans Paris. Par exemple, une rue à double sens, composée de

plusieurs voies avec un trafic dense pourrait être assimilé au boulevard Sébastopol à l'heure de pointe. De même, une rue à sens unique composée d'une seule voie avec peu de trafic pourrait être une rue du seizième arrondissement.

Cependant, même si nous arrivons à une classification morpho-typologique cohérente, il est difficile de s'en tenir à ces cinq classes pour définir de manière précise un environnement sonore urbain. Il faut alors, définir une série d'émotions et de termes de bases qui viennent préciser l'environnement dans lequel on se trouve.

Nous en avons une esquisse avec une question concernant le ressenti agréable ou non de chacune des situation : à la dernière question qui demande de définir la situation la plus agréable, tous ont répondu en citant l'enregistrement représentant le groupe A. De même, tous ont répondu que le groupe D était la situation la moins gênante.

Malgré cette esquisse de réponse apportée, nous préférons nous baser sur les travaux effectués par J. Kang ou encore C. Guastavino.

2.1.2 Une classification subjective - la perception du paysage sonore.

Beaucoup de théoriciens encouragent un cheminement de l'analyse d'un paysage sonore en deux temps : la première description doit être holistique et globale. Ainsi, le sujet pourra donner son avis sur le niveau sonore ainsi que le confort acoustique. Dans un deuxième temps, il est important d'adopter une démarche analytique afin d'identifier les différentes source sonores.

Valérie Maffiolo [13] met d'ailleurs en évidence l'existence d'un couplage entre les processus de traitement, qu'ils soient analytiques ou holistiques, et la nature (événements ou textures) des sons. Elle montre que les séquences sonores composées d'évènements requièrent une écoute analytique. Décrites par les sujets en termes de sources sonores, d'évènements et d'activités, elles bénéficient d'un traitement sémantique de type top-down. Les séquences amorphes, quant à elles, requièrent une écoute holistique. Décrites au moyen de descripteurs acoustiques, elles bénéficient d'un traitement sémantique de type bottom up.

Enfin il est nécessaire de s'attarder sur la notion d'attention. Elle est la capacité de notre système auditif à se focaliser sur des composantes spécifiques de notre environnement sonore. Le flux audio qui arrive à notre cerveau dépend de plusieurs indices. En fonction du contexte de la scène, certains stimuli ont tendance à attirer plus facilement notre attention. Un des paramètres du stimulus qui nous permet de nous focaliser sur une certaine source est appelée la saillance. La saillance d'un flux audio peut se voir

comme l'impact d'un stimulus sur notre perception. De ce fait, l'attention et la saillance ont une influence dans l'identification des sources. Or, l'écoute analytique est une étape primordiale dans le processus de création de l'image d'un paysage sonore ; ainsi, un élément saillant est facilement identifiable. A l'inverse, un fond sonore, dénué d'évènements et donc par définition peu saillant sera moins discernable.

2.1.3 Une méthode particulière pour définir la typologie du lieu

Nous procédons de manière inverse à ce qui est fait habituellement. En effet, la tendance pour définir la typologie sonore d'une ville est la suivante : une première étape consiste en un parcours (ou « soundwalk » dans la littérature) en passant par des points stratégiques de la ville. Une fois ce parcours effectué, une écoute globale des rushes permet de définir les lieux qui sont les plus caractéristiques de la ville. Une fois cette étape réalisée, il est nécessaire d'aller enregistrer à nouveau aux points caractéristiques de la ville à différents moments de la journée pour avoir un échantillon cohérent de l'enregistrement in situ. Enfin, pour définir la typologie du lieu, il faut faire passer des tests perceptifs à des sujets, naïfs ou experts, afin d'avoir leur ressenti sur les ambiances sonores qu'on leur donne à écouter. Sur ce point, de nombreuses théories sont à prendre en compte et une seule méthode n'est pas meilleure qu'une autre.

Notre démarche va dans le sens contraire. En effet, notre but étant de créer un outil de simulation qui intègre un véhicule électrique dans des paysages sonores typiques de Paris, il faut qu'ils soient définis avant même de les enregistrer.

Pour ce faire, il faut donc partir de méthodes de catégorisation connues.

2.1.3.1 Les facteurs perceptifs de J. Kang & al.

J. Kang & al. se base sur les démarches connues de catégorisation de paysages sonores urbains [14]. En effet, il effectue des soundwalks avec différents sujets, qu'ils soient naïfs ou experts, et leur soumet un questionnaire. De ce questionnaire ressortira différents résultats qui mèneront à une classification sémantique des paysages sonores traversés.

Le premier résultat de son étude que nous cherchons à mettre en avant est le fait que niveau sonore et confort acoustique ne sont pas forcément corrélés. En effet, les questions qui permettent d'en arriver là sont les suivantes :

- 1) Évaluez le niveau sonore (1 : très léger – 5 : très fort)

2) Évaluez le confort acoustique (1 : très confortable – 5 : très inconfortable)

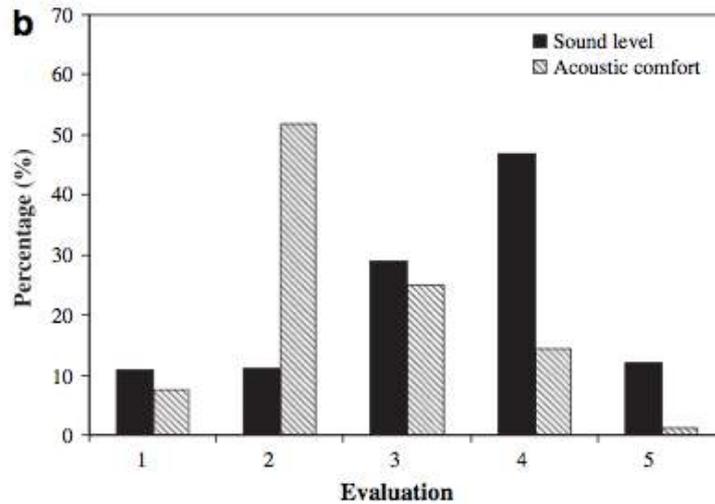


Figure 27 : Histogramme du pourcentage de réponses évaluant le niveau sonore et le confort acoustique [Réf : Kang - Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces (2009)].

Cet histogramme donne le pourcentage de réponses à ces deux questions. On constate effectivement qu'il n'y a pas de corrélation entre le niveau sonore et le confort acoustique. En effet, pour un lieu donné, ici le Peace Garden à Sheffield (Grande-Bretagne), un échantillon principal des interrogés estime que le niveau sonore est bruyant, et pourtant le confort acoustique reste correct selon la plupart des sujets. S'il n'est pas question d'une relation entre le niveau sonore et le confort acoustique, il faut alors chercher du côté des sources sonores, qui même à niveau moindre peuvent entraîner des gênes. En effet, il est commun de préférer les sons d'origine naturelle que ceux d'origine artificielle. Cependant, encore d'autres facteurs peuvent influencer la perception du paysage sonore. L'origine du sujet, l'acoustique du lieu de vie, la sensibilité au niveau sonore etc...

Ainsi, de toutes les réponses données par les sujets, Kang définit quatre facteurs subjectifs qui permettent de définir un environnement sonore : la **relaxation**, la **communication**, la **spatialité** et la **dynamique**.

Kang met en parallèle ces quatre facteurs avec des catégories plus objectives, à savoir : la **fonctionnalité** du lieu, l'**espace** du lieu, et le **temps**.

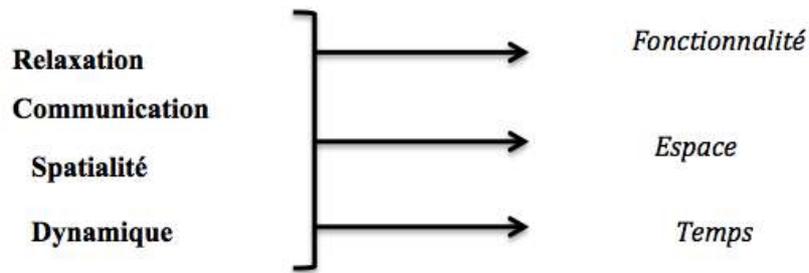


Figure 26 : Mise en parallèle des critères subjectifs et objectifs définis par J. Kang [Réf : Kang - Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces (2009)].

En définitive, il est encore une fois compliqué d’apporter une réponse claire quant à la perception de l’environnement sonore, du fait de sa subjectivité et de sa variabilité en fonction des sujets, mais cette méthode permet de faire ressortir quatre facteurs majeurs de la caractéristique d’un lieu. Enfin, il est nécessaire de porter son attention sur les caractéristiques des sources pour définir cette classification.

2.1.3.2 Les critères définissant un environnement urbain.

L’idée du travail mené par C. Guastavino [15] est d’identifier les différentes catégories de sources sonores composant une ville et d’y associer la sémantique pour chacune d’elles. Pour ce faire, le questionnaire pose des questions ouvertes, qui permettent au sujet de répondre de manière plus précise. En effet, prônant l’écoute globale, on s’intéresse à la source sonore et non pas à la texture du son. Ainsi, les résultats sont analysés et une catégorisation se dessine au vu des différentes réponses obtenues.

La première question est la suivante : « Quel serait selon vous l’ambiance sonore idéale d’une ville ? ». Il est ici nécessaire de préciser la signification du terme « idéal ». On ne parle pas ici d’idéal comme une ambiance agréable mais d’idéal comme un environnement qui est caractéristique de la ville.

Les sujets ont tendance à décrire un environnement sonore de manière analytique (76% des réponses) plutôt que de manière globale (26% des réponses). En effet, la tendance est de recréer l’environnement en s’intéressant aux sources qui composent le paysage sonore.

De nombreux termes sont utilisés par les sujets pour qualifier l’environnement sonore urbain idéal.

Ainsi, l’analyse du champ lexical utilisé par les différents sujets sur la question peut être regroupée en quatre critères :

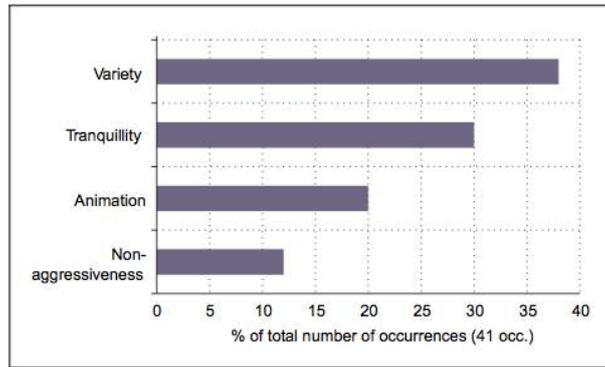


Figure 28 : Catégories émergeant des réponses spontanées des sujets sur la question de l'environnement idéal [Réf : Catherine Guastavino. The ideal urban soundscape : Investigating the sound quality of french cities (2006)].

Les quatre critères établis par Guastavino & al sont donc les suivants :

- La **variabilité** (38% des réponses), qui peut s'apparenter à la dynamique à court terme du lieu. En effet, un environnement sonore urbain doit être un lieu où cohabitent un nombre de sources sonores très différentes, qui doivent structurer le paysage par des différences de niveau sonore ;
- La **tranquillité** (30% des réponses), qui en d'autres termes revient à un environnement calme et relaxant. L'environnement ne doit pas être trop chargé. Cependant, il n'est à aucun moment question de silence.
- L'**animation** (20% des réponses), qui doit symboliser l'activité humaine en ville. Cette notion est proche de la spatialité du lieu, car qui dit activité humaine dit création d'un espace sonore. En effet, par animation, les sujets entendent la cohabitation de nombreuses sources humaines qui forment cet environnement typique d'une aire urbaine.
- Le **confort** (12% des réponses), qui lui est lié à la cohabitation entre les usagers de l'aire urbaine. Il ne faut pas qu'il y ait d'agression sonore entre les différents acteurs de l'environnement urbain.

Parmi ces quatre facteurs définis, on en retrouve certains en commun avec ceux établis par J. Kang. En effet, la variabilité est à rapprocher de la dynamique à court terme, la tranquillité est à relier à la relaxation, l'animation à la spatialité, car l'animation crée l'espace sonore urbain, et enfin le confort à la communication puisque le confort, synonyme de non agression signifie une communication entre les différents usagers de l'espace sonore urbain.

Critères subjectifs – parallèle entre les critères de Kang et de Gustavino	Kang	Guastavino
	relaxation	tranquillité
	communication	confort
	spatialité	animation
	dynamique	variabilité

Tableau 1 : Tableau représentant le parallèle entre la classification de Kang et celle de Guastavino.

Nous avons donc quatre facteurs qui permettent de définir un environnement sonore urbain. Il nous sera plus aisé de résumer ce champ lexical par des termes techniques, afin de faciliter la recherche des lieux où nous allons enregistrer nos ambiances. Nous pouvons donc définir un champ lexical plus technique qui correspond à celui qui ressort de l'analyse de Guastavino à savoir :

- la **dynamique** du lieu ;
- les **dimensions** de ce lieu ;
- le **niveau sonore** du lieu ;
- la **nature des sources** qui compose le paysage sonore.

En ce qui concerne la nature des sources, le discours des sujets est similaire chez Guastavino comme chez Kang & al. En effet, les sujets préfèrent les sons issus de sources naturelles plutôt qu'artificielles.

Prenons l'exemple de la musique, pour laquelle, de manière générale, les avis sont mitigés. L'aspect positif de la musique est initié par les musiciens dans la rue, ce qui confère une atmosphère de détente au lieu. En revanche, les musiques issues d'enceintes, de téléphones portables et autres sources de musique artificielles sont vues comme des sources désagréables et inconfortables à l'écoute.

Enfin, on ressent l'aspect imagé des objets dans le discours des sujets. Prenons l'exemple du véhicule. Les avis sont, comme pour la musique, mitigés. En effet, à l'heure actuelle, un jugement plutôt négatif du véhicule est émis, du fait de la pollution sonore et de la tendance à vouloir réduire le bruit de trafic. Pourtant, les avis sont positifs en ce qui concerne le véhicule électrique. On peut donc en conclure que les gens sont attachés à l'image que génère mentalement la source, et que l'évaluation subjective des phénomènes acoustiques est liée aux caractéristiques sémantiques de la source.

Prenons pour exemple la place Saint Michel dans le 5^{ème} arrondissement de Paris. Il s'agit d'une place piétonne, bordée de deux avenues très passantes : le boulevard Saint Michel et la rue Danton. De plus, dos à cette place se situe le quai Saint Michel. Bref, il y a une cohabitation forte avec le trafic. D'autre part, de nombreuses terrasses de café se situent à proximité de cette place, la Seine se trouve derrière le quai Saint Michel.

Ce lieu est-il donc un environnement urbain idéal, en d'autres termes, respecte-t-il les contraintes liés à la ville? Au niveau de la dynamique et de l'espace, il est clair que ces contraintes sont respectées. En effet, le flux de véhicules discontinu ainsi les nombreuses sources sonores (activités humaines diverses, métro, véhicules, bateaux en arrière plan etc...) constituent à elles seules un environnement sonore urbain typique. Pour ce qui est du niveau sonore et du confort acoustique, ces données sont variables. En effet, en fonction de l'heure de la journée, le niveau sonore aura une dynamique globale importante. Les périodes de non-affluence seront donc propices à entrer dans les critères idéaux. Enfin en fonction de l'emplacement où l'on se trouve sur la place, l'acoustique variera de confortable lorsqu'on se situe à proximité de la fontaine, du fait de l'omniprésence d'un son naturel. En revanche, dès que l'on s'éloigne de la fontaine, pour se rapprocher donc du trafic routier, ce confort acoustique sera moindre.

Ainsi, par cette étude de cas sommaire, nous pouvons faire ressortir des facteurs liés à la définition d'un environnement sonore urbain. Quels sont maintenant les types de lieux que nous recherchons pour notre étude? En effet, nous souhaitons trouver un échantillonnage des lieux qui prennent en compte tous les types d'ambiances urbaines.

2.2 Une cartographie sonore de la ville de Paris.

Nous avons, de part l'étude des différentes théories sur la classification des paysages sonores, défini quatre critères fondamentaux dans l'analyse d'un paysage sonore urbain : la dynamique du lieu, ses dimensions, son niveau sonore ainsi que la nature des sources sonores qui constituent ce lieu. Nous allons maintenant devoir définir les différents facteurs entrant en jeu dans un environnement urbain afin de trouver une classification d'environnements sonores, que nous analyserons grâce aux quatre critères définis plus hauts.

En effet, la question principale de cette deuxième partie est la suivante : quels sont les paysages sonores que nous cherchons à illustrer ?

Il faut toujours garder à l'idée que cette étude des paysages sonores urbains se fait dans le cadre d'un outil d'intégration de véhicule électrique. Ainsi, il est nécessaire au

préalable de définir des lieux qui soient caractéristiques et extrêmes d'une agglomération.

Pour cela, nous limitons notre étude au cas de Paris, et il faut donc choisir des ambiances qui soient typiques de la ville pour tenter de répondre à cette question de manière la plus précise possible.

2.2.1 Les critères objectifs...

De nombreux critères sont à prendre en compte dans l'établissement de la cartographie sonore de Paris. Le but est de classer les situations selon les quatre critères que nous avons établis dans la partie précédente, à savoir : la dynamique du lieu, son espace, le niveau sonore qui y est présent, ainsi que le confort acoustique ressenti. Pour cela, il est nécessaire d'analyser de nombreuses situations.

2.2.1.1 La vitesse des véhicules.

Dans un premier temps, il est intéressant de se pencher sur la vitesse de circulation des véhicules. En effet, un rapport de la police nationale fait état de la vitesse moyenne de conduite des automobiles privées. Sur le boulevard périphérique, la vitesse moyenne est d'environ 45 km/h alors qu'elle est de 18 km/h en ville. Cette vitesse de 18 km/h qui peut paraître anecdotique est en fait très importante. En effet, nous avons vu dans la première partie de ce travail que 20 km/h est une vitesse de transition. Pour les véhicules thermiques d'une certaine gamme, en-dessous de 20 km/h, ce sont les bruits de contact pneus/chaussée qui prédominent par rapport au bruit du moteur. De même, pour les véhicules hybrides, jusqu'à cette vitesse, c'est le moteur électrique qui est en fonctionnement. Ainsi, on peut donc définir deux catégories en ce qui concerne la vitesse : *en dessous de 20km/h* où le trafic global émet plutôt des sons de pneus sur l'asphalte et *au dessus de 20km/h* où les sources entendues ont tendance à être des moteurs thermiques.

2.2.1.2 Le trafic routier.

Le trafic routier entre en compte dans la manière dont on va catégoriser la ville de Paris. En effet, ce paramètre joue un rôle important sur les quatre facteurs perceptifs déjà définis. Les chiffres varient en fonction de la période de l'année, ou encore du jour de la semaine. En revanche, il est commun de définir deux périodes de circulation sur une

journée de 24 heures. De 7h du matin à 21h, on considère que la circulation est suffisante pour qu'elle soit significative et donc mesurable. En revanche, de 21h à 7h du matin le lendemain, on ne la prend pas en compte, car les véhicules circulants sont en nombre moindres.

Nous pouvons donc baser notre étude sur des journées allant de 7h du matin à 21h. Durant cette période, on peut définir trois densités de trafic : *très dense, trafic à flux variable, faible*.

2.2.1.3 Le type de revêtement au sol.

Le bruit de contact pneu-chaussée représente une part importante du bruit extérieur émis par les véhicules routiers. Selon un rapport de PSA sur les bruits générés à l'intérieur des véhicules, pour une voiture roulant à 30 km/h, en seconde, le bruit de contact pneu-chaussée compte pour 30 % environ du bruit généré par le véhicule, les bruits du moteur, de la transmission et de l'échappement étant prédominants au dessus de 20 km/h. A 50 km/h en troisième, le bruit de contact représente la moitié de la contribution sonore du véhicule.

Ce bruit de roulement est lui-même essentiellement occasionné par deux phénomènes : l'impact des pneus sur la chaussée, qui provoque des vibrations et génère des sons plutôt graves, ainsi que la compression puis la détente de l'air piégé dans les alvéoles des pneus, qui s'accompagne d'un « effet ventouse », phénomènes qui se traduisent par des sons plutôt aigus.

Ainsi, étant au fait de ces bruits engendrés par le revêtement de la chaussée, certaines sociétés tentent de mettre sur le marché des revêtements prenant en compte la pollution sonore engendrée par ces phénomènes. La société Colas par exemple, a mis au point un revêtement appelé Nanosoft®, qui permet de réduire de 9dB la contribution pneu-chaussée.

Cependant, il est difficile à Paris de faire un bilan des différents revêtements de chaussée. On peut tout de même définir deux types de revêtement : *l'asphalte* et *les pavés* (qui représente tout de même 18,3% des revêtements parisiens). Il est évident que le bruit de contact pneu-chaussée est bien plus important sur les pavés que sur de l'asphalte (jusqu'à 5dB en plus).

Ainsi, encore une fois, nous pouvons définir deux catégories pour le type de revêtement.

2.2.1.4 Le type de rue.

Ce critère rejoint en partie l'étude qu'avait effectué J.D. Polack sur la classification des paysages sonores urbains. La démarche qu'il avait adopté était une démarche plutôt pragmatique, qui consistait à catégoriser les environnements sonores urbains en fonction du type de rue et du trafic.

Nous avons déjà défini le trafic comme un critère à part entière, mais le type de rue, ainsi que son architecture est importante dans la classification que nous sommes en train d'effectuer. En effet, il existe une distinction à faire entre la taille des rues. Un boulevard n'aura rien à voir avec une rue. En réalité, par « type de rue », on entend plutôt « nombre de voies ». Le trafic routier pouvant avoir le même volume mais pas le même flux dans une rue à une voie qu'un boulevard à quatre voies. Ainsi, nous définirons dans cette partie le nombre de voies comme un critère à part entière.

L'avenue parisienne possédant le nombre de voies le plus important est l'avenue des Champs Elysées avec 2x4 voies. Ainsi, nous pouvons définir un nouveau paramètre : le nombre de voies de circulation (allant donc d'une voie jusqu'à huit voies).

2.2.1.5 Les autres sources présentes.

Pour définir les sources présentes, C. Vogel a demandé à des sujets aléatoires dans la rue de réaliser une « carte mentale sonore » de la ville [16], comme le mentionne la méthode Amphoux, autrement appelée description récurrente. Il s'agit de faire dessiner à un sujet les éléments évocateurs d'un espace connu et quotidien.

Corsin Vogel dans sa thèse a effectué ce travail de recherche auprès de vingt-sept sujets représentatifs de la vie parisienne au niveau de l'âge, du sexe ou encore du milieu socio-culturel.

Les résultats nous permettent donc d'obtenir un vocabulaire caractéristique de chaque catégorie, à savoir :

- Les bruits de circulations :

Dans ces bruits de circulation le périphérique est cité 41% des fois, et des événements ponctuels interviennent aussi à hauteur de 41% dans les réponses.

- Flot ininterrompu de véhicules ;
 - Beaucoup d'évènements ponctuels, type démarrage, arrêt, crissement de freins, klaxons, passages de scooters, vélos, sirènes...
- Les contributions humaines :
 - Discussions ;
 - Déplacement de groupes de touristes ;
 - Pas avec talons ;
 - Pleurs d'enfants ;
 - Marchés (dans lesquels des cris, des accostages, de la vie)
- Les Quais de Seine :
 - Piétons ;
 - Vagues ;
 - Péniches + clapotis sur la coque ;
 - Calme relatif aux avenues passantes ;
 - Sensation d'apaisement ;
- Le métro :
 - Bruit de pneumatiques sur les rails ;
 - Ponts en métal qui vibrent ;
 - Roulis des roues sur les rails ;

Toutes ces contributions sont significatives de Paris selon les personnes interrogées. Il va être maintenant question d'estimer quelles sont celles qui ont lieu d'être dans notre étude. Nous ne nous intéresserons pas aux bruits routiers, du fait qu'ils soient déjà détaillés plus haut, par la vitesse des véhicules, le trafic, le revêtement du sol etc...

2.2.1.6 La proximité avec le boulevard périphérique.

Le boulevard périphérique est une contribution qui a une valeur importante tant dans la dynamique que dans le spectre fréquentiel du paysage sonore urbain de Paris. En effet,

une vitesse moyenne de 45 km/h avec un trafic journalier d'environ un million de véhicules devient une source de bruit importante dans toute la ville de Paris.

Ainsi, en fonction de l'emplacement où l'on se trouve dans la ville, le rayonnement acoustique du boulevard périphérique aura une influence plus ou moins importante sur le niveau sonore ressenti, le confort acoustique, la dynamique ou encore l'espace perçu du lieu.

De même, la présence de nombreux ponts autoroutiers présents sur le boulevard périphérique engendre de nombreuses vibrations qui viennent ajouter des occurrences dans le spectre fréquentiel ainsi que dans la dynamique.

Il sera donc nécessaire dans notre classification de mentionner la distance par rapport au boulevard périphérique.

2.2.2 ... Qui permettent un classement subjectif.

Nous arrivons au terme de l'étude de la typologie sonore urbaine. Nous avons pu mettre en évidence différentes manières de classer subjectivement un environnement sonore, et de transcrire ce ressenti pour définir des critères objectifs.

Pour rappel, ces critères sont les suivants :

- d'un point de vue subjectif, on peut définir un paysage sonore selon la **relaxation** que nous confère le lieu (ou sa tranquillité), la **communication** qui est plus ou moins aisée en fonction du lieu (ou le confort acoustique), la **spatialité** (ou l'animation du paysage sonore) et la **variabilité** (ou la dynamique du lieu).
- D'un point de vue objectif, nous avons défini la **dynamique**, les **dimensions du lieu**, le **niveau sonore** et la **nature des sources**.

L'idéal pour l'étude de la sonification du véhicule électrique est d'obtenir des paysages sonores caractéristiques extrêmes afin de simuler une situation de conduite du véhicule électrique au sein de ces environnements. Pour cela, nous faisons appel à notre subjectivité pour définir quels sont les environnements sonores extrêmes au sein de la ville de Paris.

Nous ne cherchons pas à obtenir une classification d'une précision extrême, mais simplement de trouver des endroits qui soient caractéristiques de certaines situations. On peut ainsi considérer de manière arbitraire qu'il y a trois principaux paysages sonores urbains : un **environnement calme** à opposer à un **paysage sonore**

insupportable. Entre les deux, nous étudierons le **paysage sonore bruyant mais supportable**, qui est sans doute l'environnement le plus présent dans la ville.

Il est difficile de déterminer un paysage sonore en fonction des facteurs précédents du fait d'un grand nombre de combinaisons possibles. Basons notre étude sur ces trois environnements qui sont représentatifs de nombreuses situations. Nous verrons d'ailleurs plus tard que dans un type environnement peut régner plusieurs combinaisons de facteurs.

2.2.2.1 Un environnement calme.

En regard des paramètres cités dans la partie précédente, il s'agit d'établir les conditions nécessaires à l'obtention d'un paysage sonore urbain « calme » dans la ville de Paris.

La plupart des travaux effectués quant à la catégorisation des paysages sonores urbains s'accordent sur le fait qu'un environnement de ce type doit être composé d'une part plus importante de sources d'origine naturelle que de sources artificielles.

De même, si nous devons analyser un paysage sonore calme tel que l'on s'en fait la représentation dans notre esprit, il faudrait qu'il réponde aux éléments suivants :

- Une dynamique qui ne soit pas trop élevée (ce qui sous-entend peu d'évènements ponctuels). L'environnement doit être composé de textures et de rumeurs ;
- Des dimensions qui peuvent être variable. En effet, ici, la spatialité du lieu n'a pas une grande influence, dans le sens où un très grand espace peut être calme ;
- Un niveau sonore qui ne dépasse pas 50dB (cette valeur est indicative) ;
- Des sources de nature agréable, qui permet une conversation entre plusieurs personnes sans problèmes d'attention, ni de saillance.

Il est cependant difficile de déterminer un scénario type d'un environnement calme, du fait de nombreux facteurs qui entrent en jeu, comme nous l'avons déjà mentionné.

Ainsi, on peut penser d'une part à une rue piétonne. En effet, par définition, il n'y a pas de véhicules (ou alors ils passent de manière très ponctuelle), ce qui implique la présence unique de contributions humaines (pas, conversations, cris, pleurs etc). De même, le revêtement du sol n'est alors pas d'une importance primordiale. Enfin, l'idéal serait que le métro et le boulevard périphérique ne se situent pas dans un périmètre proche du lieu.

Cependant, nous définissons ici un scénario qui n'est pas l'unique représentant de ce type de paysage sonore. Nous pouvons aussi penser à une rue dans laquelle évoluent des véhicules, mais de manière disparate, avec peu de contributions humaines et un revêtement en asphalte. Il sera donc de notre responsabilité de choisir des lieux qui nous semblent correspondre le mieux au paysage sonore que l'on souhaite entendre.

2.2.2.2 Un environnement bruyant mais supportable.

Nous avons défini un premier paysage sonore typique de Paris. Il est cependant en minorité par rapport aux deux environnements que l'on va définir par la suite. A commencer par ce que l'on peut appeler un environnement « bruyant mais supportable ». Que veut-on dire par là ?

Par définition, les deux caractéristiques principales vont être le niveau sonore et la nature des sources. Dans un premier temps, le niveau global du lieu doit être assez important pour que l'auditeur ressente une atmosphère de grand espace, composé de sources plutôt artificielles qui émettent à un niveau sonore élevé.

Et pourtant, J. Kang a démontré que niveau sonore et confort acoustique n'étaient pas forcément liés [14]. En effet, on peut se trouver dans un endroit bruyant sans pour autant ressentir d'inconfort acoustique. C'est par exemple le cas lors d'un concert de musique symphonique. Les niveaux sonores peuvent atteindre une centaine de décibels avec une dynamique souvent importante et pourtant, l'auditeur ne ressent pas forcément de gêne.

Nous pouvons donc faire une analogie avec le paysage sonore urbain. Nous aurons ici un environnement avec un niveau sonore élevé, mais pour autant, le sujet qui s'y trouve ne ressentira pas de gêne particulière. Il pourrait très bien engager une conversation sans hausser la voix, aucune sirène ou événement inconfortable (tel qu'un démarrage de scooter) ne viendrait perturber sa perception du paysage sonore. De même, il pourrait rester de nombreuses minutes dans cet environnement sans qu'une fatigue auditive importante soit induite.

Ainsi, quels sont les paramètres de ce paysage sonore ?

La dynamique aura tendance à être plus élevée que pour un environnement calme, avec des moments de silence relatif à d'autres où le niveau s'élèvera considérablement. Cela sous-entend que le niveau sonore sera fluctuant. On peut prendre l'exemple d'un carrefour muni de feux de signalisations. Lorsque le feu est rouge, les véhicules sont arrêtés, le niveau est constant est plutôt « faible ». En revanche, lorsque le feu passe au

vert, tous les véhicules démarrent, aussi bien les voitures que les scooters et les moteurs à deux temps. Le confort acoustique quant à lui ne doit rester supportable. Par supportable, on veut dire qu'il n'est certes pas agréable de rester dans cet environnement durant un période importante, mais qu'un sujet qui s'y trouve doit pouvoir y rester quelques minutes sans pour autant ressentir de fatigue auditive ou de gêne. Enfin, l'espace perçu par l'auditeur doit être fidèle et représentatif d'un lieu assez grand, dans lequel évolue toutes sortes de véhicule, avec de nombreuses contributions autres que celles de ces derniers.

Un paysage représentatif de cette situation est celui que nous avons présenté dans la première partie (1.1.2) de ce travail de recherche. En effet, il s'agit d'une place du 18^{ème} arrondissement de Paris. Il y a un carrefour, régit par des feux de signalisations. De même, le trafic peut être élevé aux heures de pointes, une caserne de pompiers se situe à proximité, ce qui engendre des événements ponctuels qui font s'élever la dynamique et le niveau moyen. D'autre part, s'agit d'un quartier résidentiel avec de nombreux commerces et des écoles, ce qui implique de nombreuses contributions humaines (bruits de pas, conversations, cris, pleurs etc...). Enfin, le boulevard périphérique ne se situe qu'à 950 mètres du lieu, ce qui induit une rumeur de trafic relativement forte.

Encore une fois, il est très compliqué de déterminer un lieu type, qui soit le seul et unique représentant du paysage sonore que l'on souhaite. La place dont on parle dans le paragraphe précédent n'est qu'une situation, à titre d'exemple. De même, comme ce type d'environnement représente un gros pourcentage des paysages sonores de Paris, la tâche est d'autant plus complexe que de trouver une situation idéale, car de nombreux environnements correspondent aux prérequis que l'on s'impose.

2.2.2.3 Un environnement insupportable.

Nous nous attelons maintenant à décrire un paysage sonore dans lequel nous n'avons pas forcément l'habitude d'évoluer, ou, si tel est le cas, nous ne nous y attardons jamais trop. Il s'agit d'un paysage sonore qui rassemble toutes les conditions qui rendent la vie en son sein très difficile.

De manière pragmatique, de quelle manière un paysage sonore peut-il être insupportable ? Dans un premier temps, le niveau sonore doit être supérieur à 75dB(A) de manière quasi-continue. Cette valeur, arbitraire est connue de la littérature scientifique représente une rue à très fort trafic. La dynamique peut être assez grande, mais au vu des niveaux sonores élevés, elle aura tendance à être relativement faible. Les

dimensions du lieu peuvent être assez variables. Un espace grand pourra rayonner tout autant qu'un petit espace dans lequel il existe de nombreuses réflexions. Enfin en ce qui concerne la nature des sources, elles entraînent un inconfort acoustique qui induit une difficulté à rester dans cet environnement de manière continue pendant un temps certain.

Il n'est pas compliqué de décrire cet environnement, du fait de sa régularité dans les forts niveaux sonores. Il faut toutefois bien définir quelles sont les limites entre ce paysage sonore et celui que nous avons décrit précédemment. En effet, dans l'environnement bruyant mais supportable, il peut y avoir des occurrences désagréables, mais elles ne seront que ponctuelles (par exemple, un marteau piqueur qui viendra alimenter de temps en temps les forts niveaux ou des démarrages de véhicules à un carrefour) ; en revanche, dans ce paysage sonore qualifié d'insupportable, les niveaux forts sont présents de manière continue et une fatigue auditive se fera sentir au bout de quelques minutes.

L'environnement typique de ce genre de situation pourrait tout à fait correspondre aux abords du boulevard périphérique. De même, il faudrait que toutes les contributions soient réunies. Par exemple, elle pourrait la situation pourrait être la suivante : nous nous situons aux abords du boulevard périphérique sur lequel il y a 6 voies de circulation, à proximité d'un pont à l'heure de pointe, où le trafic est le plus dense. Les contributions humaines doivent avoir un apport important. De même, il faudrait être à proximité d'une voie de chemin de fer.

Ce paysage est donc typique des avenues se trouvant en bordure de Paris, à proximité du boulevard périphérique.

De même, une autre situation pouvant correspondre à un environnement insupportable serait celle des grands axes parisiens aux heures de pointes.

L'étude des différentes classifications sémantiques des paysages sonores urbains nous a amené à définir un classement personnel, donnant trois paysages sonores représentatifs de Paris : un **environnement calme**, un **environnement bruyant mais supportable** et un **environnement insupportable**.

Cette étude va donc nous permettre de choisir avec précision les lieux où nous allons réaliser des enregistrements d'ambiances sonores, ainsi que de définir le matériel avec lequel nous allons tourner. Ces choix toujours dans le but de mettre au point un outil de simulation de véhicule électrique dans des paysages sonores urbains.

2.3 Les prérequis nécessaires aux enregistrement des paysages sonores urbains.

Le but de cette partie va être de déterminer les lieux au sein desquels nous allons mener une campagne d'enregistrement de paysages sonores.

En effet, pour la mise au point de notre outil de simulation, nous avons besoin d'y intégrer des ambiances qui sont en adéquation avec les paysages sonores que nous avons défini dans la partie précédente. Ainsi, pour chaque environnement, nous allons effectuer une sélection qui répond au mieux à nos attentes.

2.3.1 Un environnement calme à Paris.

- La butte Montmartre (zone rue des Saules – rue Norvins) ;

La zone de la butte Montmartre sélectionnée est la suivante : les rues sont pour la plupart à sens unique, dotées d'une seule voies de circulation. Le revêtement habituel est de type pavé, mais le faible trafic, la prédominance des contributions humaines naturelles, et l'absence des occurrences du métro correspondent à un paysage sonore calme.

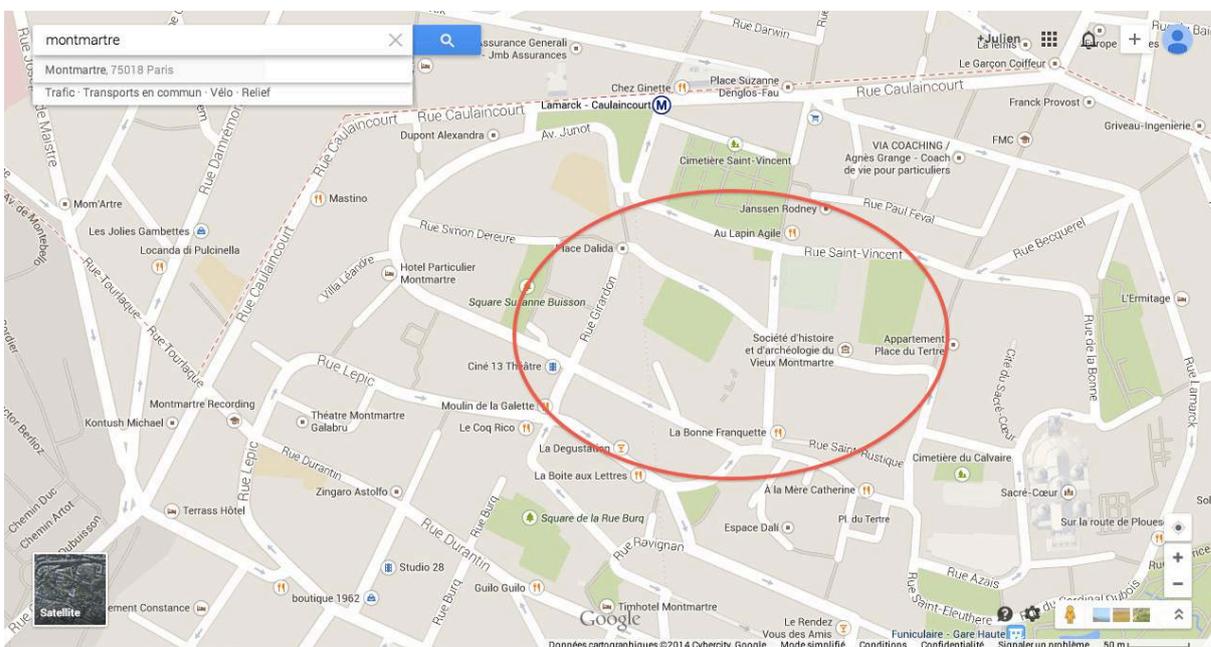


Figure 29 : 1ère zone d'enregistrement de paysage sonore calme : la butte Montmartre [Réf : Google Maps].

- Le croisement rue Maspéro – rue d’Andigné :

Le XVIème arrondissement de Paris est connu pour son calme ambiant. Le croisement entre la rue Maspéro et la rue d’Andigné est assez représentatif de l’environnement sonore qui règne dans ce quartier. En effet, il existe de nombreuses rues étroites, à sens unique, dans lesquelles évoluent peu de véhicules, du fait de l’aspect résidentiel du quartier. Ainsi, nous obtenons un paysage avec un niveau sonore assez peu élevé, alors même que nous ne nous situons pas loin du boulevard périphérique. De même, cet arrondissement possédant de nombreux jardins. Ainsi, il existe de nombreuses contributions d’origine naturelle, ce qui induit un confort acoustique assez élevé, qu’il est difficile de retrouver dans d’autres quartiers.

Enfin, la dynamique du lieu est assez faible, ce qui donne une impression de petit espace, propre aux rues du XVIème arrondissement.

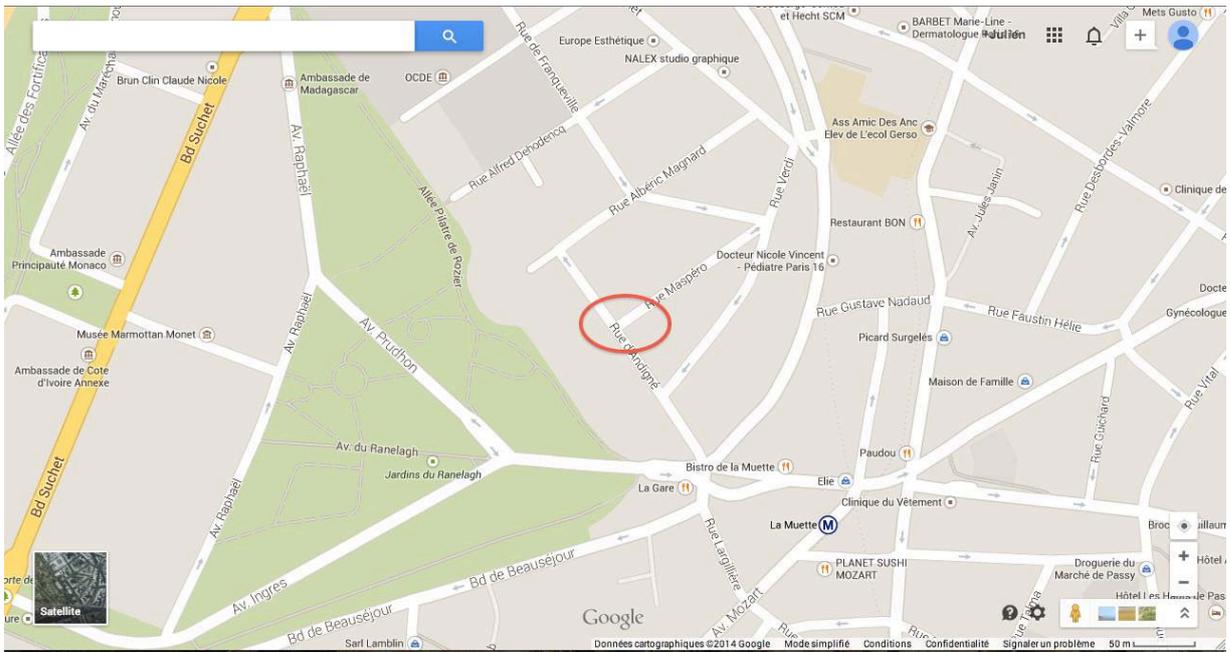


Figure 30 : 2ème zone d’enregistrement de paysage sonore calme : le croisement rue Maspéro – rue d’Andigné [Réf : Google Maps].

▪ La rue Cler :

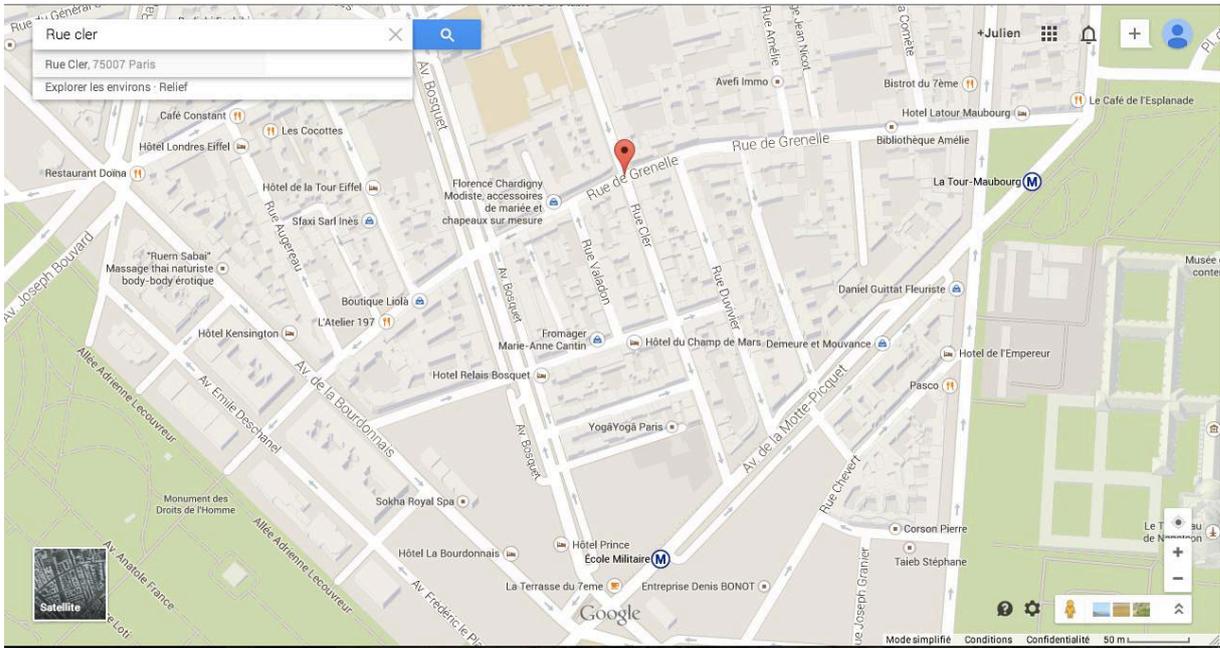


Figure 31 : 3^{ème} zone d'enregistrement de paysage sonore calme : la rue Cler [Réf : Google Maps].

La rue Cler est la dernière zone d'enregistrement qui rassemble les conditions d'un paysage sonore calme. En effet, elle possède les caractéristiques d'une rue piétonne. Ainsi, le trafic est quasi nul, les facteurs humains prédominent très largement par rapport aux contributions artificielles telles que le métro. La rue Cler possède une seule voie en sens unique, dont le revêtement est fait de pavés assemblés. Enfin, le périphérique se situe loin par rapport au lieu. Encore une fois, ci-dessous un aperçu Street View de la rue Cler. On constate bien que la typologie de la rue entraîne induit un paysage sonore calme.

2.3.2 Définition de l'environnement bruyant mais supportable.

Un environnement bruyant mais supportable représente une part importante des paysages sonores de Paris intra muros. De ce fait, de nombreuses situations sont envisageables, qui selon la théorie ne sont pas conformes, mais qui, in situ, sont représentatives de ce type d'environnement.

Le premier paysage sonore auquel nous allons nous intéresser est le suivant :

▪ Angle rue Michel le comte – rue Beaubourg :

Ce carrefour se situe dans le 4^{ème} arrondissement de Paris. Il se situe aux abords de lieux fréquentés de Paris (centre Pompidou) et du boulevard Sébastopol, très emprunté par de nombreux automobilistes. La typographie de ce lieu correspond assez bien à l'environnement que nous recherchons. En effet, un carrefour matérialisé par des feux de signalisation implique des évènements tels que arrêts de véhicules, accélérations et démarrages, notamment de scooters. De même, on y trouve une voie de bus, ce qui implique des occurrences de poids lourds. En ce qui concerne les facteurs humains, il n'est pas rare de trouver des groupes de touristes qui apportent une contribution supplémentaire.

Ainsi, le niveau sonore ainsi que le dynamique sont relativement élevés. En ce qui concerne le confort acoustique, il n'est pas rare de devoir faire face à des éléments désagréables, mais une écoute prolongée n'implique pas forcément de fatigue auditive

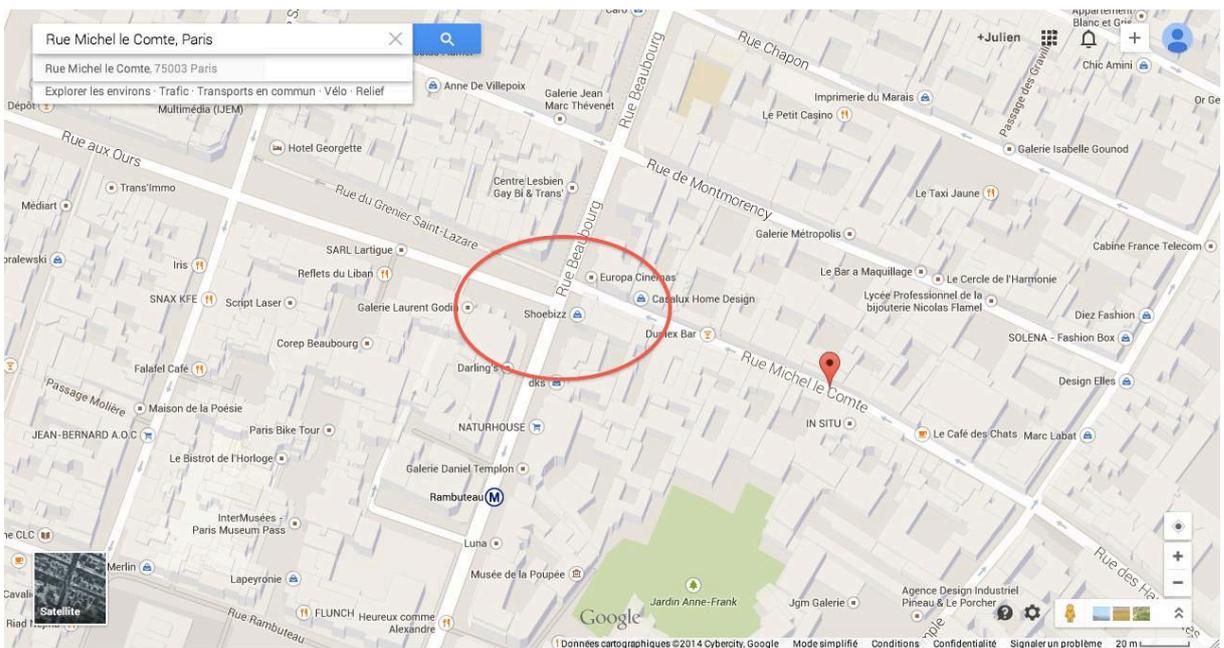


Figure 32 : 1ère zone d'enregistrement d'environnement bruyant : le carrefour Michel le Comte – Beaubourg [Réf : Google Maps].

- La rue de Rivoli (métro Saint-Paul) :

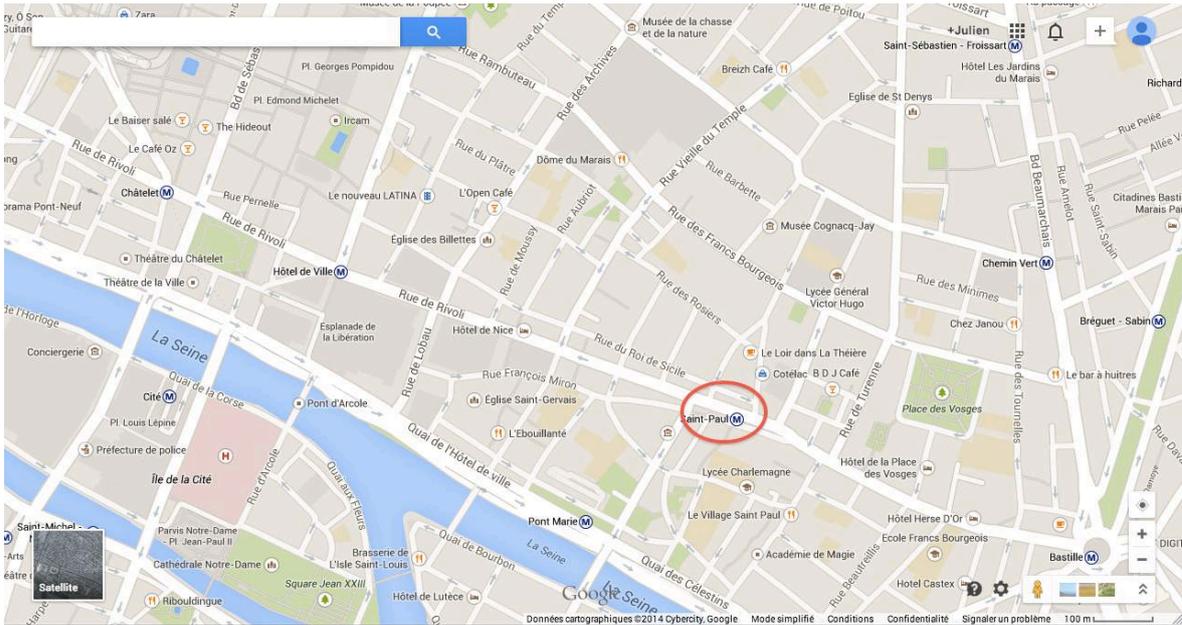


Figure 33 : 2ème zone d'enregistrement d'environnement bruyant : rue de Rivoli [Réf : Google Maps].

La rue de Rivoli est un paysage sonore qui se situe à la limite entre l'environnement bruyant mais supportable et l'environnement insupportable. En effet, de nombreux paramètres agissent sur le paysage sonore de ce lieu, et de ce fait, deux situations sont à prendre en compte : la première à une heure quelconque dans l'après-midi, la deuxième à l'heure de pointe.

Pour notre étude, nous nous intéresserons à la rue de Rivoli à une heure qui ne se situe pas dans la période de pointe. Ainsi, le trafic n'est pas aussi dense qu'à l'heure de grande circulation. Ainsi, nous avons une rue de taille relativement grande dont le revêtement est composé d'asphalte avec, dans un sens de circulation de deux voies plus une voie de bus et dans l'autre, une voie pavée. De même, de nombreux feux de signalisation régulent la circulation, ce qui entraîne de nombreuses occurrences de véhicules. Ce quartier touristique induit de nombreuses contributions humaines (en particulier, la présence du manège sur la place Saint Paul), notamment des flux de touristes, facilités par des installations artificielles (notamment l'escalier mécanique de sortie du métro, la signalisation pour personnes non-voyantes etc...)

▪ Le croisement Caulaincourt – Abbesses – Damrémont – Joseph de Maistre :

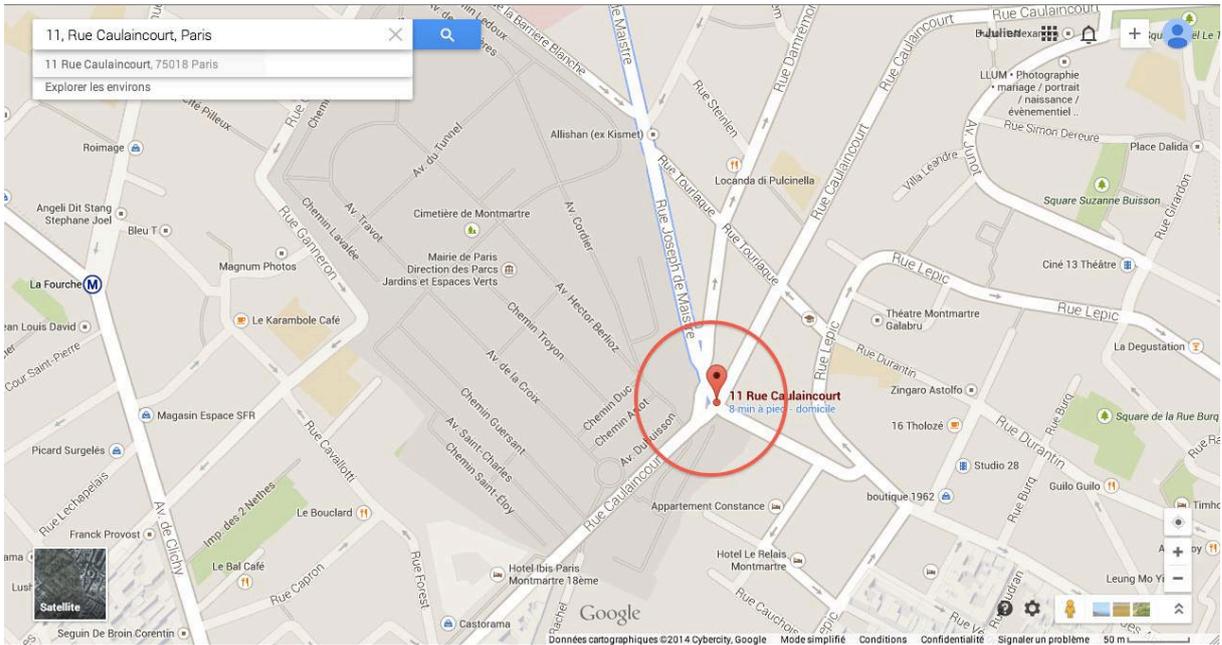


Figure 34 : 3ème zone d'enregistrement d'environnement bruyant : le carrefour Caulaincourt [Réf : Google Maps].

Cette partie de la rue Caulaincourt a une typologie particulière. En effet, il s'agit ici d'un petit carrefour qui relie quatre rues importantes, ce qui implique parfois un trafic conséquent notamment aux heures de pointes. Ce carrefour est intéressant pour l'étude car plusieurs types de voies se côtoient. La partie reliant la place de Clichy à la rue Caulaincourt est matérialisée par un pont en métal qui passe au-dessus du cimetière de Montmartre. De même, sur la droite de la rue Caulaincourt se situe la rue des Abbesses, dont le revêtement est de type pavé. Ainsi, des véhicules identiques émettent des sons de nature différente en fonction de l'endroit où ils se trouvent dans la rue. De ce fait, des sources de natures différentes auront tendance à se côtoyer en cet endroit.

Enfin, en ce qui concerne les facteurs humains, ils ne sont pas nombreux. En effet, ce quartier, plutôt résidentiel, n'est pas favorable à de nombreuses contributions humaines hors des heures de pointes.

2.3.3 Définition de l'environnement insupportable.

Les environnements insupportables ne sont représentés pas la majorité des cas dans Paris intra muros, mais il n'est pas rare d'en trouver notamment aux portes de Paris, lorsqu'on s'approche du boulevard périphérique.

▪ Porte de la Chapelle :

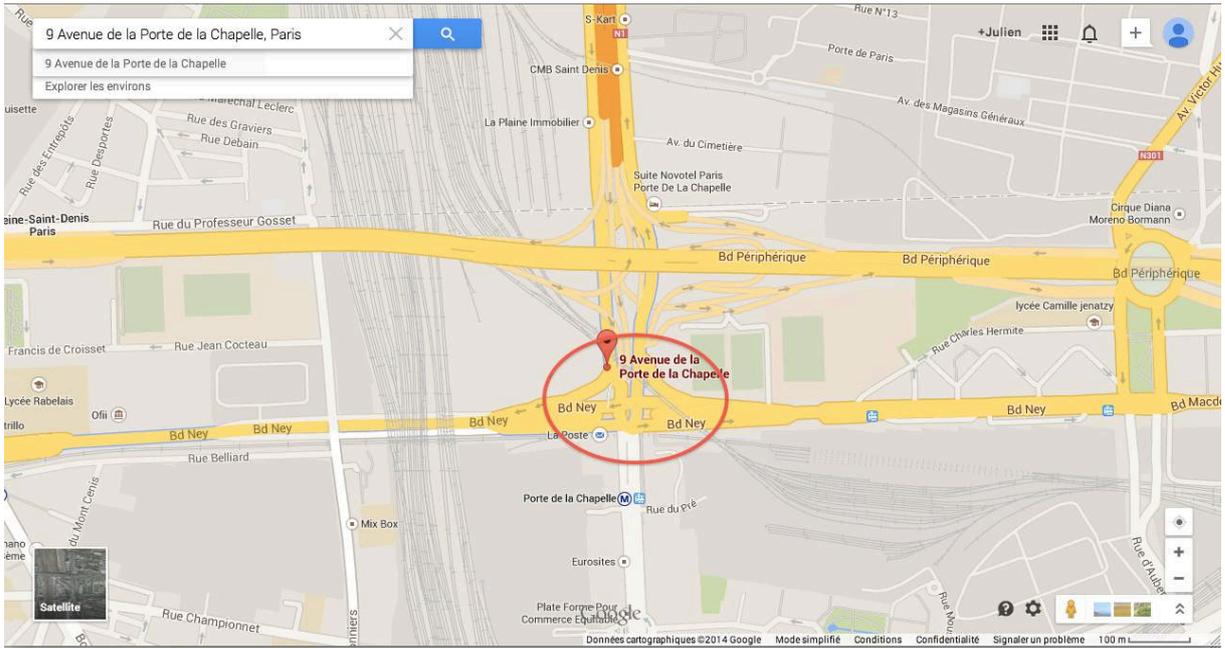


Figure 35 : 1ère zone d'enregistrement d'environnement insupportable : Porte de la Chapelle[Réf : Google Maps].

Cet endroit est particulièrement critique, car il se situe au carrefour de nombreuses voies de communications non des moindres. A commencer par les voies de chemin de fer qui partent de la gare du Nord et qui relient de nombreuses villes de banlieue via les RER, transiliens ou encore TER, ainsi que des villes de province via les Grandes Lignes. En somme, une grosse partie du réseau ferroviaire francilien emprunte ces voies de chemin de fer.

D'autre part, nous nous situons entre deux boulevards de taille très importante : le boulevard Ney d'un côté, le boulevard périphérique de l'autre, qui possède un embranchement direct vers l'autoroute du Nord. Ainsi, au vu de ces éléments, on peut en conclure d'une part que le niveau sonore est élevé, et que le confort acoustique est au plus désagréable. En effet, il y a très peu, si ce n'est aucune contribution humaine et naturelle, le trafic est très dense, et nous y retrouvons de nombreuses sources génératrices de bruits artificiels et désagréables (son strident des trains sur des aiguillages, véhicules en tous genre, rumeur de périphérique et d'autoroute etc...)

▪ L'avenue des Champs-Élysées – place de l'Étoile :

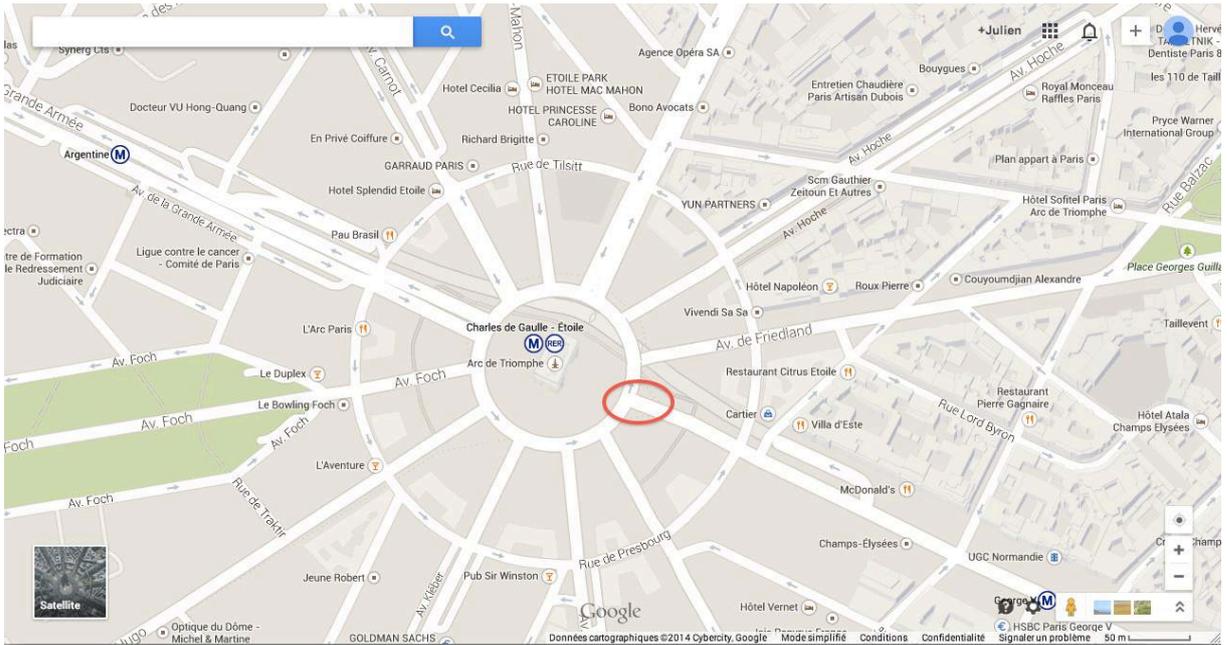


Figure 37 : 2ème zone d'enregistrement d'environnement insupportable : Place de l'Étoile[Réf : Google Maps].

L'avenue des Champs-Élysées a beau être la plus belle avenue du monde, elle semble aussi être l'avenue la moins confortable au niveau de l'acoustique. En effet, les critères de classification la relègue de manière logique à ce statut : le trafic est dense, car c'est d'une part un axe principal dans la ville, d'autre part sans doute l'avenue la plus touristique, et enfin l'avenue est composée de huit voies de circulation sur un revêtement pavé, qui débouchent sur la place de l'étoile, où une certaine anarchie se fait sentir.

En ce qui concerne les contributions humaines, elles sont très nombreuses, du fait de nombreux touristes : conversations, rires, pleurs, cris, pas, animations musicales, interpellations entre personnes etc... Enfin, de nombreuses installations ont été créées pour le bien des touristes, ce qui a induit d'autres contributions matérielles et artificielles.

Enfin, l'arc de triomphe, point culminant de l'avenue a tendance à venir ajouter encore une couche supplémentaire de bruit du fait des réflexions qu'il envoie ainsi que les nombreux touristes qui se situent à sa proximité.

■ Barbès –Rochechouart :

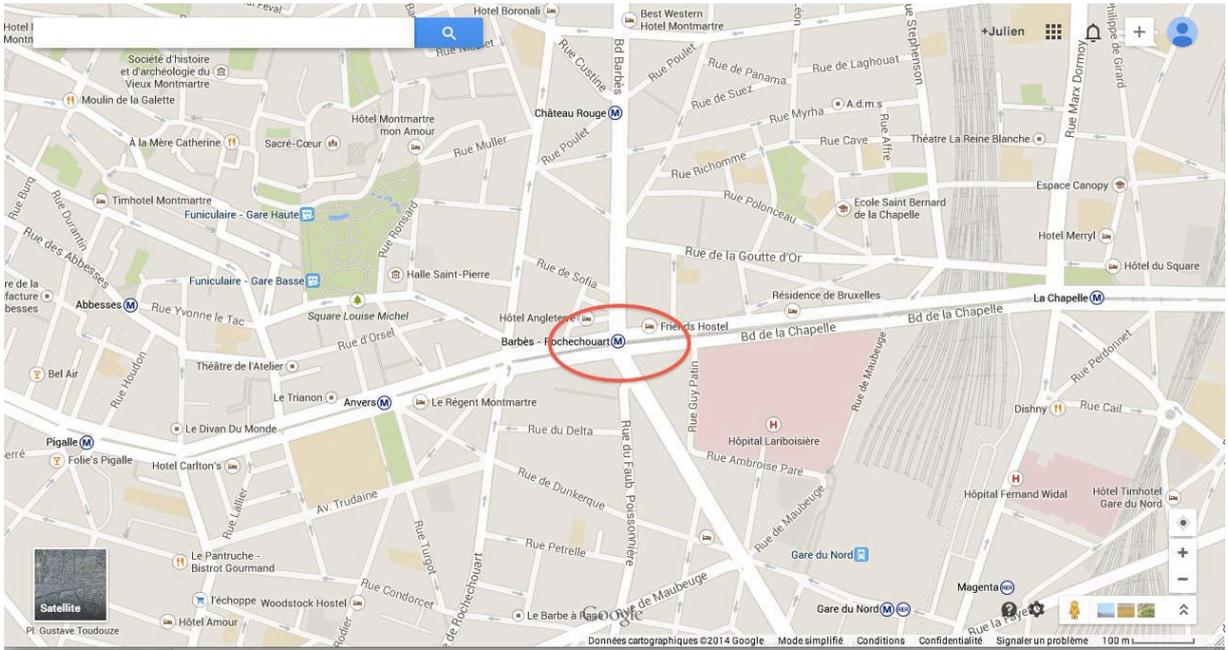


Figure 38 : 3ème zone d'enregistrement d'environnement insupportable : Barbès-Rochechouart [Réf : Google Maps].

La zone de Barbès-Rochechouart est aussi une zone sensible dans laquelle il ne fait pas bon vivre d'un point de vue acoustique. C'est un axe très emprunté, car il relie certains points névralgiques de la capitale aussi bien d'Est en Ouest que du Nord au Sud. De ce fait, il est très souvent le théâtre de nombreux embouteillages, qui induisent un trafic en règle général assez très dense, notamment aux heures de pointe. D'autre part, les nombreux vendeurs à la sauvette et les commerces se situant à proximité favorisent de nombreuses allées et venues de la part des gens. Les contributions humaines y sont donc fortes. Enfin, le métro est aérien à ce moment de la ligne 2. De même, il y a une autre ligne souterraine (ligne 4) ce qui implique des installations facilitant l'accès aux personnes. Ainsi, le niveau sonore y est élevé, la dynamique n'est pas tant élevée que ça du fait de la régularité des forts niveaux et le confort acoustique n'est pas du tout optimisé.

Nous avons défini trois environnements propres à chacun des trois paysages sonores. Il est certain que lors des différentes sessions d'enregistrements, nous ne nous en tiendrons pas à ces seuls lieux. En effet il s'agit, à terme, d'obtenir une variété d'échantillons qui nous permette de définir de nombreuses situations de passage de véhicule électrique.

Pour ce faire, nous allons dans une dernière partie définir le matériel d'enregistrement nécessaire pour rendre compte des paysages sonores que nous allons enregistrer.

2.3.4 La chaîne d'enregistrement – le matériel nécessaire.

Nous verrons par la suite le problème auquel de nombreux scientifiques font face quant à la vraisemblance du paysage sonore lors de la restitution. Pour réduire le champ des éventualités concernant cette question, nous allons effectuer des enregistrements qui doivent retranscrire au plus proche l'écoute immersive. Pour ce faire, nous bénéficierons du matériel que nous allons énumérer par la suite.

En ce qui concerne les microphones, nous bénéficierons du matériel suivant :

- 1 x Ambisonics Soundfield ST250 ;
- 1 x couple stéréophonique ORTF Schoeps MSTC 64 U
- 1 x micro hyper-cardioïde Audio Technika AT 8015

De même, les enregistreurs dont nous nous servirons seront :

- 1 x Zoom H6
- 1 x Tascam HDP2

Il s'agit d'enregistrer simultanément le signal issu du Soundfield ST250 ainsi que du couple ORTF. En effet, à l'écoute, il est difficile de se faire une idée de ce qu'il ressort du Soundfield. Ainsi, ayant une meilleure connaissance du couple ORTF Schoeps, il est plus simple de monitorer ce dernier, afin de trouver une position idéale de nos systèmes microphoniques. En effet, lors du déploiement Soundfield vers un système 5.1, il y a des effets de zoom sur les sources lors de leur passage devant le système, qui ne sont pas nécessairement désirables. L'idéal est donc de se positionner un peu plus en hauteur, afin de lisser les textures, et d'éviter les occurrences des piétons.

Enfin, le micro hyper cardioïde nous servira pour la prise de son de certains évènements, que nous pourrons ensuite intégrer à l'outil de simulation afin d'ajouter de la matière à nos textures de paysages sonores.

Cette partie se termine donc sur un plan de prise de son de paysages sonores parisiens.

Nous avons donc réussi à trouver une classification personnelle des paysages sonores urbains propres à la ville de Paris.

Dans un premier temps, nous avons mis en parallèle des études menées par des scientifiques tels que Kang, Guastavino ou encore Polack.

D'une part, J.D. Polack & al. défini des typologies en fonction de l'architecture des voies.

D'autre part, Kang ou Guastavino définissent une sémantique de classification des paysages sonores urbains, établie de manière subjective par des tests perceptifs. De cette sémantique, nous en avons fait ressortir quatre critères techniques, nécessaires à l'établissement de notre propre classification. Les critères de dynamique du lieu, de dimensions du lieu, de son niveau sonore ainsi que de nature des sources nous permettent d'arriver à trois classifications de paysages sonores urbains : un paysage calme, un paysage bruyant mais supportable et un paysage insupportable.

Une fois cette catégorisation posée, nous pouvons donc facilement choisir des lieux précis qui permettent de rendre compte au mieux de la catégorie dans laquelle ils se trouvent.

Il va maintenant s'agir d'analyser les enregistrements proposés dans la partie suivante, afin de les restituer au mieux pour retrouver le phénomène d'immersion de l'écoute in situ. De même, nous allons développer un patch MaxMSP afin d'intégrer dans ces ambiances des stimuli de véhicule électrique pour simuler une trajectoire.

3. Un outil de simulation de déplacement – une approche nouvelle dans le sound design de véhicule électrique.

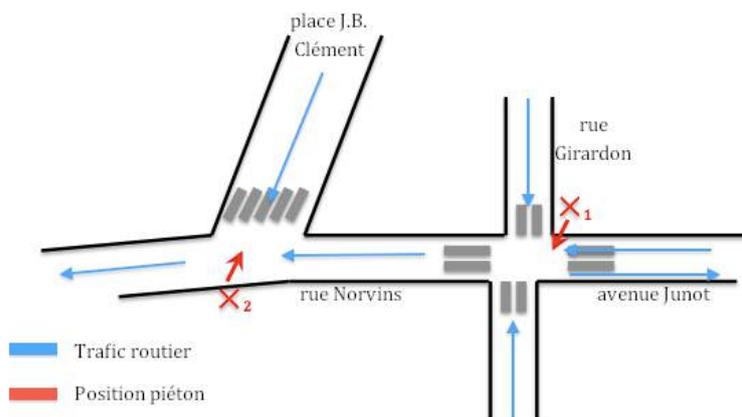
3.1 Les scénarii issus de la campagne d'enregistrements

A partir des lieux que nous avons définis dans la partie précédente, il va maintenant s'agir d'expliquer de manière précise les scénarii envisagés en fonction de chaque lieu dans lequel nous avons procédé à l'enregistrement.

De nombreux critères sont à prendre en compte dans la définition du scénario. En effet, le but de notre outil de simulation est d'intégrer dans une ambiance enregistrée en Ambisonics une signature sonore de véhicule électrique. L'intérêt est de définir une trajectoire du véhicule afin de rendre la situation vraisemblable.

Tout cela veut donc dire que le véhicule doit avoir : une vitesse (constante ou non), un rapport champ direct/champ réverbéré en fonction de la distance au point d'écoute, une trajectoire, un effet doppler etc... Nous détaillerons les processus de fabrication de ces scénarii dans la partie suivante. Dans un premier temps, nous allons illustrer les prises de son et définir un scénario global pour chaque situation.

3.1.1 La rue Norvins.



Scénario :

- 1) le véhicule électrique vient de droite (av. Junot) et remonte la rue Norvins ;
- 2) le véhicule électrique vient de la place Jean-Baptiste Clément et tourne devant le point d'écoute n°2 ;
- 3) le véhicule électrique vient de la droite du 1^{er} point d'écoute et tourne avenue Junot.



Figure 39 : Panoramique de la rue Norvins depuis le 2ème point d'écoute

3.1.2 La rue Maspéro

Scénario :

- 1) Le véhicule vient de la rue d'Andigné et tourne à droite rue Maspéro, passe devant le 1^{er} point d'écoute puis tourne à gauche rue Verdi ;
- 2) Le véhicule vient de la rue Maspéro et tourne à droite rue Verdi devant le point d'écoute n°2 ;
- 3) Le véhicule vient de la rue de Francqueville et tourne à gauche rue Verdi.

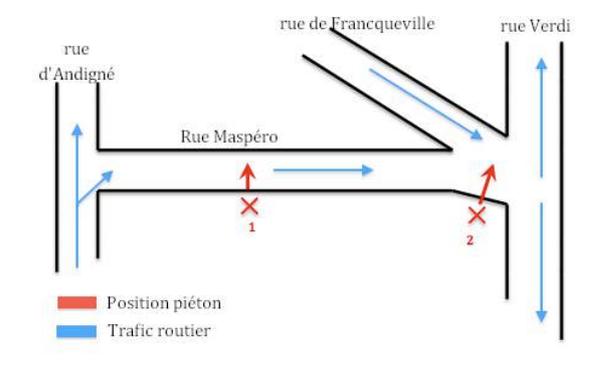
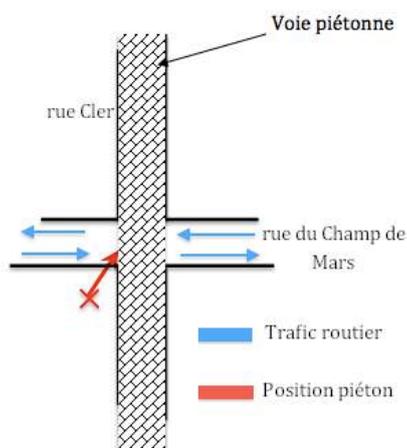


Figure 40 : Panoramique de la rue Maspéro depuis le 2ème point d'écoute.

3.1.3 La rue Cler.



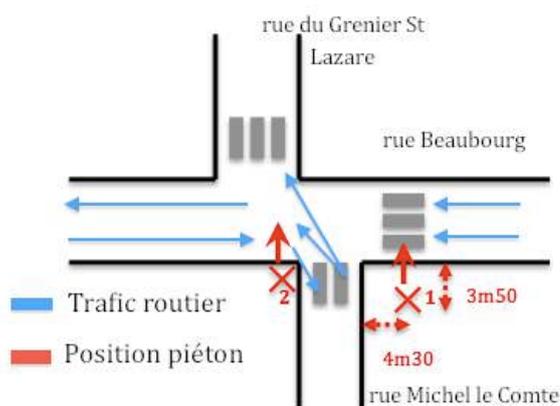
Scénario :

Un véhicule traverse la rue Cler dans la longueur et passe de droite à gauche devant le point d'écoute.



Figure 41 : Panoramique de la rue Cler.

3.1.4 La rue Beaubourg.



Scénario :

- 1) Le véhicule vient de la rue Beaubourg, passe devant les 2 points d'écoute et continue tout droit ;
- 2) Le véhicule vient de la rue Beaubourg, passe devant le 1^{er} point d'écoute et tourne devant le 2^{ème} au niveau de la rue du Grenier St Lazare ;
- 3) Le véhicule vient de la rue Michel le Comte et tourne à gauche rue Beaubourg.

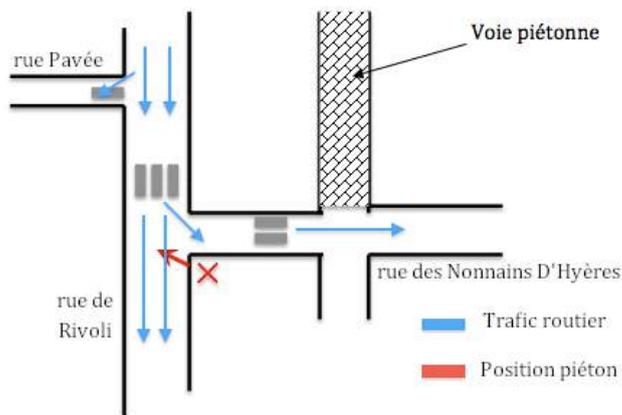


Figure 42 : Position correspondant au premier point d'écoute.



Figure 43 : Position correspondant au second point d'écoute.

3.1.5 Saint-Paul.



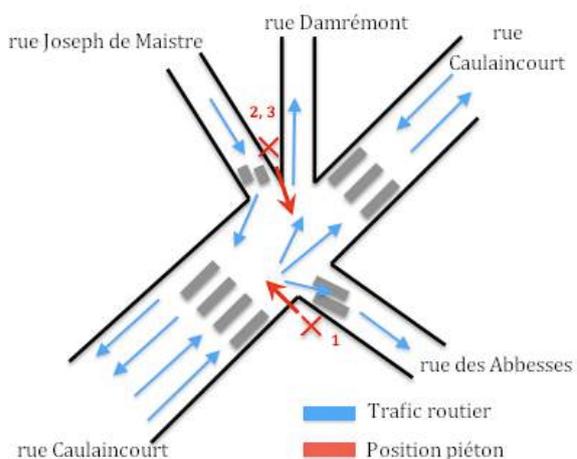
Scénario :

- 1) le véhicule électrique vient de la rue de Rivoli et continue en ligne droite ;
- 2) le véhicule électrique vient de la rue de Rivoli et tourne devant le point d'écoute ;
- 3) le véhicule électrique sort de la rue des Rosiers et tourne devant le point d'écoute.



Figure 44 : Panoramique du lieu depuis le point d'écoute.

3.1.6 La rue Caulaincourt.



Scénario :

- 1) Le véhicule monte la rue Caulaincourt, passe devant le point d'écoute n°1 de gauche à droite ;
- 2) Le véhicule monte la rue Joseph de Maistre, tourne à gauche devant le 2ème point d'écoute et monte la rue Caulaincourt ;
- 3) Le véhicule monte la rue Caulaincourt et tourne à droite vers la rue des Abbesses.

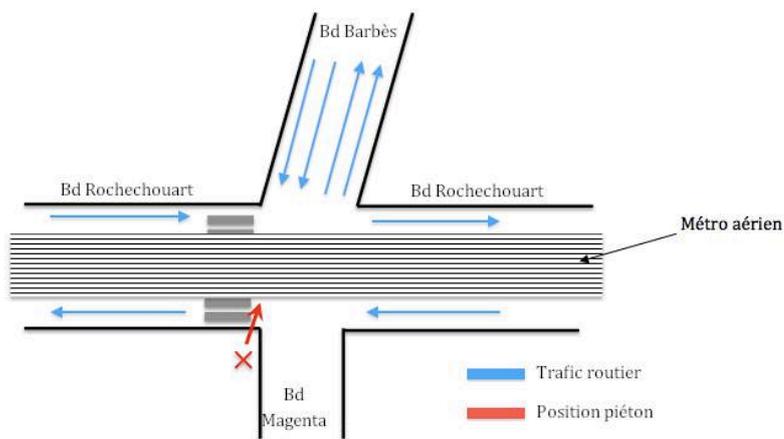


Figure 45 : Panoramique du lieu depuis le 1er point d'écoute.



Figure 46 : Panoramique du lieu depuis le 2ème point d'écoute.

3.1.7 Barbès-Rochechouart.



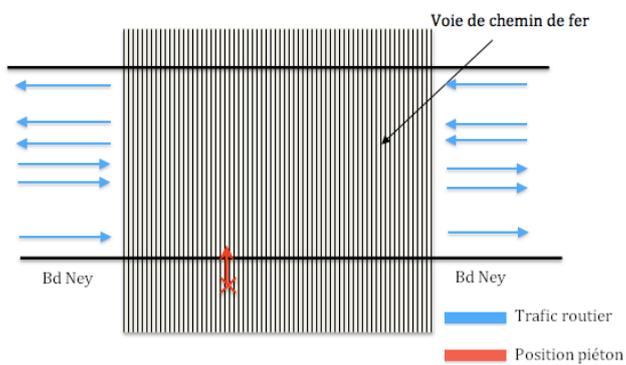
Scénario :

- 1) Le véhicule arrive par le boulevard Magenta et tourne à gauche rue de Rochechouart ;
- 2) Le véhicule passe tout droit devant le point d'écoute ;
- 3) Le véhicule arrive par le boulevard Barbès et continue sur le boulevard Magenta.



Figure 47 : Panoramique de la position d'écoute à Barbès-Rochechouart.

3.1.8 Boulevard Ney – Porte de la Chapelle.



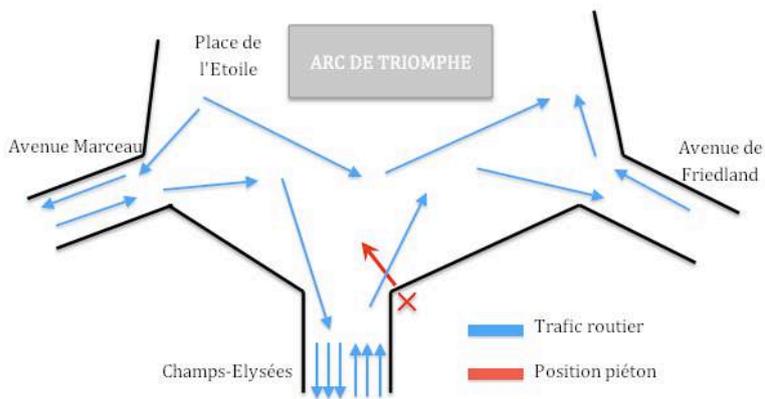
Scénario :

- 1) Le véhicule passe de gauche à droite devant le point d'écoute ;
- 2) Le véhicule passe de droite à gauche devant le point d'écoute.



Figure 48 : Panoramique du tunnel du boulevard Ney.

3.1.9 La place de l'Etoile.



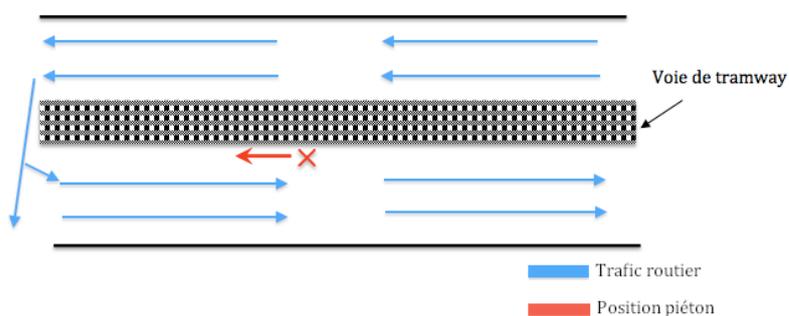
Scénario :

- 1) Le véhicule sort des Champs-Elysées et entre sur la place de l'Etoile en passant devant le point d'écoute ;
- 2) Le véhicule tourne sur la place de l'Etoile ;
- 3) Le véhicule sort de la place de l'Etoile et descend les Champs-Elysées.



Figure 49 : Panoramique du point d'écoute sur la place de l'Etoile

3.1.10 Les Maréchaux.



Scénario :

- 1) Le véhicule se trouve dans un flot de circulation continu, le tramway passe au même moment ;
- 2) Le véhicule passe de droite à gauche devant le point d'écoute et fais demi-tour sur l'îlot central.



Figure 50 : Panoramique du point d'écoute boulevard des Maréchaux.

Nous avons défini les scénarii globaux concernant chaque environnement sonore. La configuration de l'installation nous permet de définir un point d'écoute pour chaque situation comme si nous étions un piéton.

La configuration était la suivante :



Le micro Soundfield ST250 était fixé sur un pied, à une hauteur d'environ 2m20. Le couple ORTF était quant à lui positionné de la même manière à une hauteur d'environ 2m10. Nous gardions la même configuration pour chaque lieu. Ainsi, une certaine hauteur permet de lisser le paysage sonore de manière à ce que l'environnement ne soit pas pollué par de nombreuses occurrences indésirables (conversations, bruits de talons marqués, effet de zoom lorsqu'un véhicule passe devant le microphone etc...)

Le couple ORTF était monitoré en priorité, car le résultat étant mieux connu que celui de l'Ambisonics, il nous permettait de positionner le dispositif de manière quasi-idéale.

3.2 L'enregistrement Ambisonics.

Aujourd'hui, la question de la spatialisation sonore est en pleine évolution. En effet, de nombreux prototypes de prise de son multicanale ont été proposés ces dernières années, mais des micros ont tendance à se démocratiser. C'est le cas de la marque Soundfield qui propose une gamme de microphones Ambisonics.

En ce qui concerne notre étude, nous avons préféré enregistrer des paysages sonores dans lesquels les différences de niveaux entre les piétons et la route sont atténuées. Pour ce faire, nous avons placé un microphone Ambisonics en hauteur, afin de lisser la dynamique.

3.2.1 Les principes

Un microphone Ambisonics possède quatre capsules W, X, Y et Z qui correspondent respectivement aux axes du repère cartésien, ainsi que la capsule W qui est une

composante omnidirectionnelle. Ces quatre capsules (W omnidirectionnelle et X Y Z cardioïdes) forment un tétraèdre.

Une fois que le signal est capté par ces dernières, il passe par un décodeur Ambisonics, pour que les quatre pistes résultantes soient encodées au format B. Ce format permet de spatialiser de manière correcte le signal sortant des capsules, à savoir : axe avant-arrière pour la composante en X, axe gauche-droite pour la composante en Y, axe haut-bas pour la composante en Z, et une contribution globale pour la composante en W.

Pour mieux comprendre la manière dont le décodeur agit, voici un aperçu d'une forme d'onde telle qu'enregistrée après le passage dans le décodeur Ambisonics :

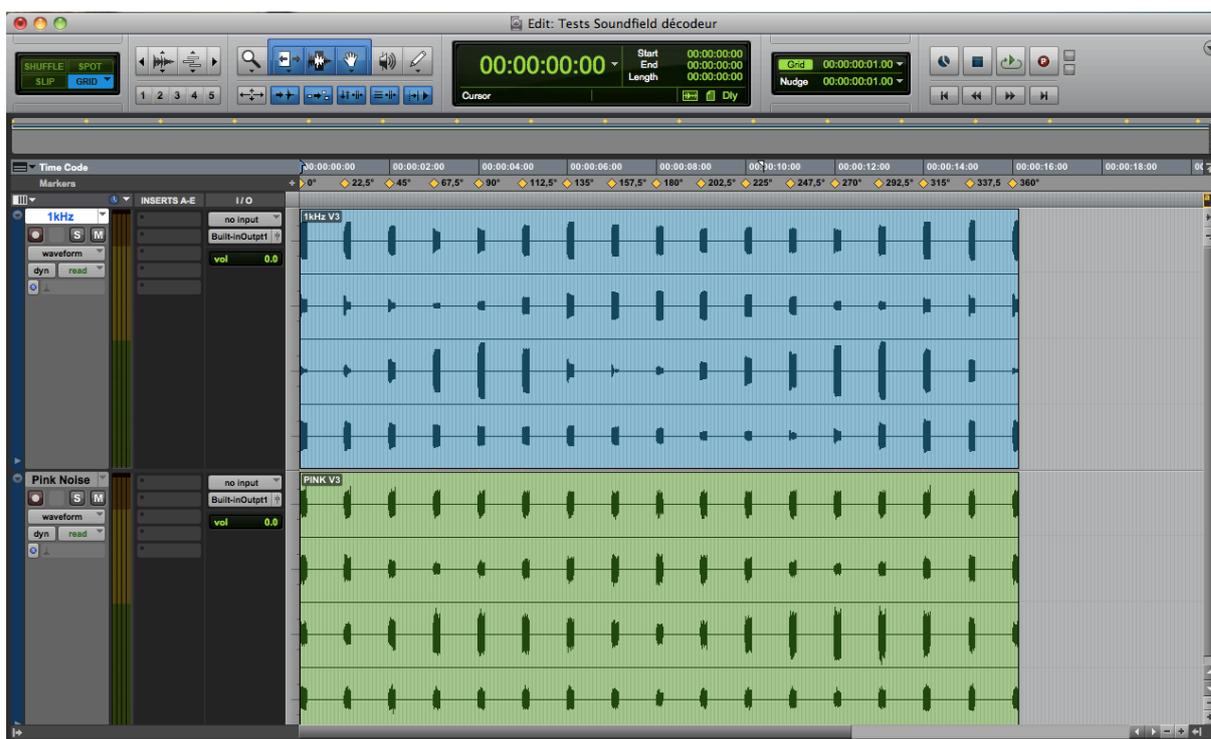


Figure 51 : Timeline d'une session test du microphone Soundfield ST250.

Il s'agit de deux formes d'onde correspondant à un test effectué sur le micro Soundfield ST250. Le protocole était le suivant :

- Le microphone était posé sur une table tournante;
- 10 signaux de 1kHz et 10 signaux de bruit rose, d'une durée de 250ms chacun étaient générés sur une piste mono, puis envoyés dans une enceinte située à 1 mètre de la capsule ;
- une rotation de 22,5° était effectuée après chaque série des 20 signaux tests, entre 0° et 360°, soit un tour complet revenant à 17 positions;
- sur les dix signaux envoyés pour une même position, c'est le 3^{ème} signal de 1kHz et de bruit rose qui était sélectionné pour chaque position, car considéré

comme le plus fiable (pas de bruits parasites qui peuvent être présents sur le début ou la fin de l'enregistrement) ;

- chacun des signaux gardés pour chaque position sont mis les uns après les autres, pour avoir un tour complet sur la même piste.

On remarque que les formes d'onde sont cohérentes. En effet, celles correspondant à la capsule W et Z sont relativement constantes, car il n'y a pas de variation d'altitude, et la capsule omnidirectionnelle capte plus ou moins la même pression à chaque instant. En revanche, la capsule X reçoit un signal maximum lorsque le microphone se situe dans l'axe de l'enceinte (0° et 180°) alors que le signal est minimum lorsque le microphone est perpendiculaire à l'axe de l'enceinte (90° et 270°). D'autre part, la capsule Y réagit de manière strictement inverse.

3.2.2 Les problèmes rencontrés – l'écoute de l'Ambisonics.

Pour écouter le signal issu d'un microphone Soundfield, il est nécessaire de passer par de nombreuses étapes de post-production, qui sont propices à l'apparition d'artefacts.

Le principal problème rencontré est le déploiement d'un son enregistré en Ambisonics vers un format 5.0 ou 5.1. En effet, une fois le son en format B, il faut utiliser différents algorithmes qui permettent de répartir par sommations les différents signaux dans les canaux correspondants. Ces algorithmes n'étant pas normés, il en existe sous de nombreux formats, qui engendrent souvent des artefacts notamment dus à des problèmes de phase.

Les formats les plus communs de normalisation sont : le FuMa et le SN3D. A l'origine, la restitution tridimensionnelle n'étant pas ou très peu utilisée, le format de normalisation le plus utilisé était le SN2D.

3.3 La question de la restitution.

3.3.1 W.J. Davies : in situ vs laboratoire.

La question qui se pose est : est-ce nécessaire d'effectuer des enregistrements de paysages sonores plutôt que d'en créer un par de la synthèse sonore ?

W. J. Davies & al. se base sur l'étude de la sémantique des paysages sonores de J. Kang & al. En effet, il explique la démarche qu'a adopté ce dernier sur la classification des paysages sonores, et se pose la question de la restitution [17].

De nombreux travaux sont effectués sur le sujet de la classification des paysages sonores urbains, et la plupart sont basés sur des jugements de la perception du paysage in situ. W. J. Davies se demande alors si la restitution de l'enregistrement en laboratoire est une démarche cohérente.

Demander à des sujets de donner leur ressenti in situ offre aux résultats une part d'authenticité et de réalisme. Cependant, il est plus difficile de contrôler les réponses, et le paysage sonore que l'on fait écouter aux différents sujets varie dans le temps, et n'est jamais le même.

Ainsi, la notion de validité écologique est abordée. En d'autres termes, la restitution sonore d'un enregistrement est-elle valable, respecte-t-elle les conditions dans lesquelles se trouvait l'ingénieur du son ?

Des travaux menés par Davies, il en ressort la conclusion suivante : la sémantique utilisée par les sujets pour qualifier l'environnement qu'on leur donne à écouter (qui est similaire à ceux présentés dans les travaux de Kang) se rapproche fortement de celle des sujets qui avaient été interrogés par Kang. Il y a certes des différences de langage ou de qualification mais ces différences permettent au sujet d'exprimer une même perception de l'espace qu'ils entendent.

D'autre part, la question de la synthèse sonore est abordée. En effet, la perception d'un environnement différent d'un sujet à l'autre, pourquoi ne pas proposer un outil interactif afin de lui permettre de créer un espace collant le plus possible à la représentation qu'il s'en fait ?

Ainsi, Davies propose à des sujets d'ajouter, à une texture de paysage sonore basique, de rajouter des événements et occurrences ponctuels. Ce qu'il ressort de cette expérience est plutôt positif, car cela permet aux sujets de traduire leurs intentions. De même, les paysages sonores créés par les participants sont plutôt basés sur les attentes qu'ils ont d'un paysage que sur leurs préférences vis-à-vis des sources proposées. Ainsi, pour un paysage sonore attendu, ils ont tendance à ajouter les mêmes sources.

C'est pourquoi nous avons décidé d'effectuer des travaux en studio. En effet, le paysage sonore variant continuellement, les expériences in situ ne permettent pas d'être autant contrôlées qu'en laboratoire, d'autant plus que nous constatons une sémantique proche ressortant de différentes expériences in situ. Ainsi, un travail dans un environnement contrôlé permet d'obtenir des résultats ayant une validité écologique, à condition que l'environnement d'écoute soit fidèle à l'environnement donné.

3.3.2 Evaluation perceptive d'une restitution multidimensionnelle – le protocole à adopter.

Toujours sur la base de tests perceptifs, il est nécessaire de déterminer des facteurs qui permettent de retranscrire au mieux un environnement donné en studio.

Pour ce faire, Guastavino & al. a mené une campagne de tests perceptifs [18] visant à déterminer des attributs sémantiques pertinents pour la perception de l'image sonore.

Ainsi, des tests d'écoute sont effectués selon les configurations suivantes :

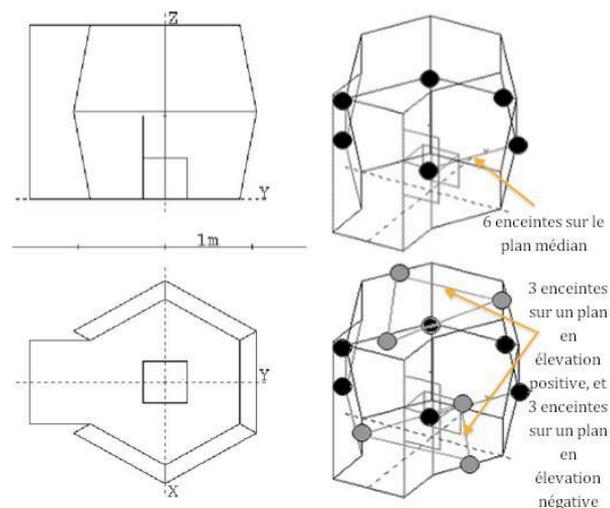


Figure 52 : Plan de l'installation permettant la restitution.

Dans cette expérience, les différentes configurations consistent donc à restituer les stimuli sur un plan à une dimension (avec ajout de reverb), un plan à deux dimensions ou un plan à trois dimensions.

Pour commencer, des tests d'écoute sur deux ou trois dimensions sont effectués sur des sujets experts, ayant l'habitude d'écouter du son. Il leur est demandé de réagir selon une verbalisation libre. Ce test fait ressortir six attributs :

- Trois attributs discriminant la restitution 2D par rapport à la restitution 3D :
 - La lisibilité, i.e. la définition spatiale ;
 - La présence, i.e. l'immersion ;
 - La distance, i.e. le nombre de plans existants.
- Trois attributs qui n'influent pas sur le ressenti entre 2D et 3D :
 - La localisation des sources, i.e. la précision de l'image ;
 - La coloration spectrale, i.e. le timbre ;
 - La sensibilité aux mouvements de tête, i.e. la modification de HRTF.

Une deuxième série de tests est effectuée afin d'établir de manière précise les critères nécessaires à l'établissement d'un protocole d'écoute fidèle.

Six séquences d'ambiances sonores sont diffusées au sujet d'abord selon une dimension, puis sur deux dimensions et enfin sur les trois dimensions.

Il est demandé aux sujets dans un premier temps de dire quelle est, selon eux, la version la plus naturelle de l'ambiance. Ensuite, ils doivent placer un repère sur des échelles sémantiques correspondant aux six attributs précédemment définis. Enfin, comme pour l'expérience précédente, il leur est demandé d'établir une verbalisation libre de leur ressenti.

Ce qu'il faut retenir de ces deux expériences sont les résultats suivants : la restitution en deux dimensions est plus adaptée en ce qui concerne les ambiances. En effet, les sujets se mettent d'accord pour dire que la restitution en deux dimensions confère un meilleur réalisme à la scène ainsi qu'un aspect plus naturel. La restitution en trois dimensions ramène sans doute des artefacts qui entraînent une décorrélation des sources.

De plus, suite à une analyse en composante principale des différentes verbalisations, nous obtenons les critères suivants :

- La **lisibilité** (ou la localisation) ;
- La **présence** (ou la distance) ;
- La **stabilité** ;
- La **corrélation**.

D'autre part, d'autres critères de restitution ont été définis, notamment :

- La **profondeur**, qui est à mettre en rapport avec la lisibilité, car possibilité de distinguer différents plans ;
- L'**enveloppement**, qui est à mettre en rapport avec la présence, car indique la position du sujet par rapport à la scène ;
- La **localisation** des sources ;
- Le **réalisme** de la scène.

Ce sont ces quatre derniers critères sur lesquels nous nous baserons lors du mixage ambiances vs stimuli dans notre outil de simulation. En effet, ce sont des critères connus et utilisés dans le mixage de travaux tels que la musique ou le cinéma. Il paraît donc cohérent d'utiliser ces facteurs comme critères de mixage.

En définitive, en ce qui concerne la restitution à proprement parler, nous avons donc opté pour une restitution en 5.0 ou 5.1, à un niveau sonore égal à celui qui était entendu in situ, ce qui permet une spatialisation tout à fait correcte pour le travail que nous effectuons. En effet, lors de nos prises de son, nous mesurons le niveau sonore de la scène avec un sonomètre, en dB(A). Ainsi, lors de nos travaux en studio, une calibration était effectuée afin d'obtenir le même niveau que sur la scène sonore.

De même, il est compliqué d'interpoler le résultat d'une prise de son en Ambisonics au-delà du 5.1. Par conséquent, nous estimons que cette restitution reste un bon compromis.

3.4 Le patch Max/MSP.

3.4.1 But du patch.

Nous aurions pu mettre au point un montage son mettant en scène une situation de conduite dans un paysage sonore donné, mais cela n'aurait pas été satisfaisant du fait des très nombreuses situations de conduite rencontrées. Nous voulions donc mettre au point un outil de simulation relativement modulaire, qui permette de définir différents paysages sonores pour différentes situations de conduite. De même, nous utilisons des outils qui permettent de spatialiser le son dans un système de restitution 5.1.

Ainsi, mettre au point un patch plutôt qu'effectuer un montage son permet une plus grande latitude dans les actions effectués et les scénarii utilisés.

3.4.2 Les outils utilisés.

Pour les scénarii envisagés, il s'agit d'utiliser les sources de la Renault Zoé, développés par l'équipe Perception et Design Sonore de l'IRCAM, en collaboration avec le compositeur Andrea Cera (Misdariis & al., 2012) [19].

Les stimuli créés pour ce véhicule sont uniquement destinés à la diffusion à l'extérieur du véhicule, via un système de restitution propre au véhicule. Nous ne nous intéressons ici qu'à la diffusion des stimuli en extérieur, le but du patch étant de simuler un déplacement de véhicule.

D'autre part, nous passerons par une phase de choix de décodeur Ambisonics, qui nous permet un déploiement du format Ambisonics vers un format de restitution 5.0.

3.4.3 Le patch de décodage Ambisonics

Nous avons vu dans la partie 3.2.2 qu'un des principaux problèmes de l'enregistrement Ambisonics consiste en son déploiement vers d'autres formats de diffusion. En effet, le passage vers du 5.0 entraîne des problèmes induisant de nombreux artefacts dans l'image restituée, ce qui fausse la perception de l'espace enregistré.

Pour ce faire, nous travaillons en deux étapes. La première consiste à « déformer » le signal reçu, afin de retrouver un signal composé de quatre pistes « brutes » et non déjà normalisée en format B. Ainsi, nous pouvons choisir l'algorithme de normalisation (FuMa, SN3D, SN2D ou RONB) qui permettra de formater le signal entrant dans les différents décodeurs.

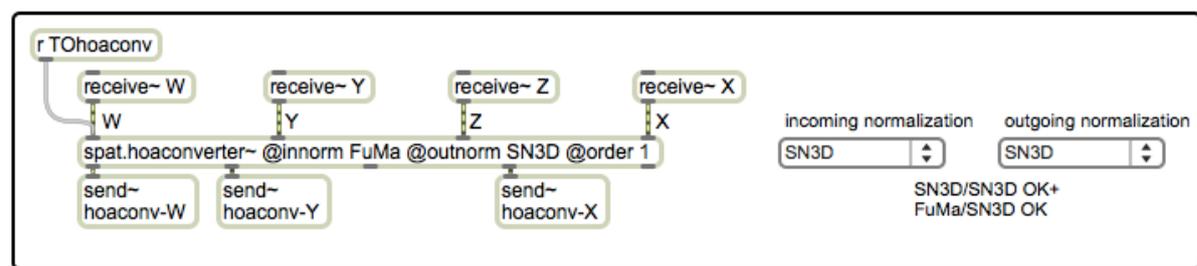


Figure 53 : module de renormalisation du signal.

Une fois que le signal sort normalisé dans un des formats choisis, il entre dans deux des trois différents décodeurs mis en place :

Le premier décodeur reçoit les quatre canaux normalisés en format B par le boîtier Soundfield et non par notre module de renormalisation, car ces signaux W X Y et Z ne sont pas passés par ce dernier, afin de pouvoir comparer les différents algorithmes de normalisation.

Le second décodeur n'utilise que les trois canaux W X et Y, résultant de la renormalisation en SN3D, mais qui ne tient pas compte de la composante en Z, le format de diffusion étant bidimensionnel.

Enfin, le troisième décodeur utilise soit le plugin SurroundZone2 développé par Soundfield soit le plugin Harpex-B, qui tous deux permettent le passage du format B quatre canaux à de nombreux autres formats (de stéréo à 7.1). Les signaux W X et Y entrent dans le module de décodage, puis par les plug-in afin de ressortir dans notre format de restitution.

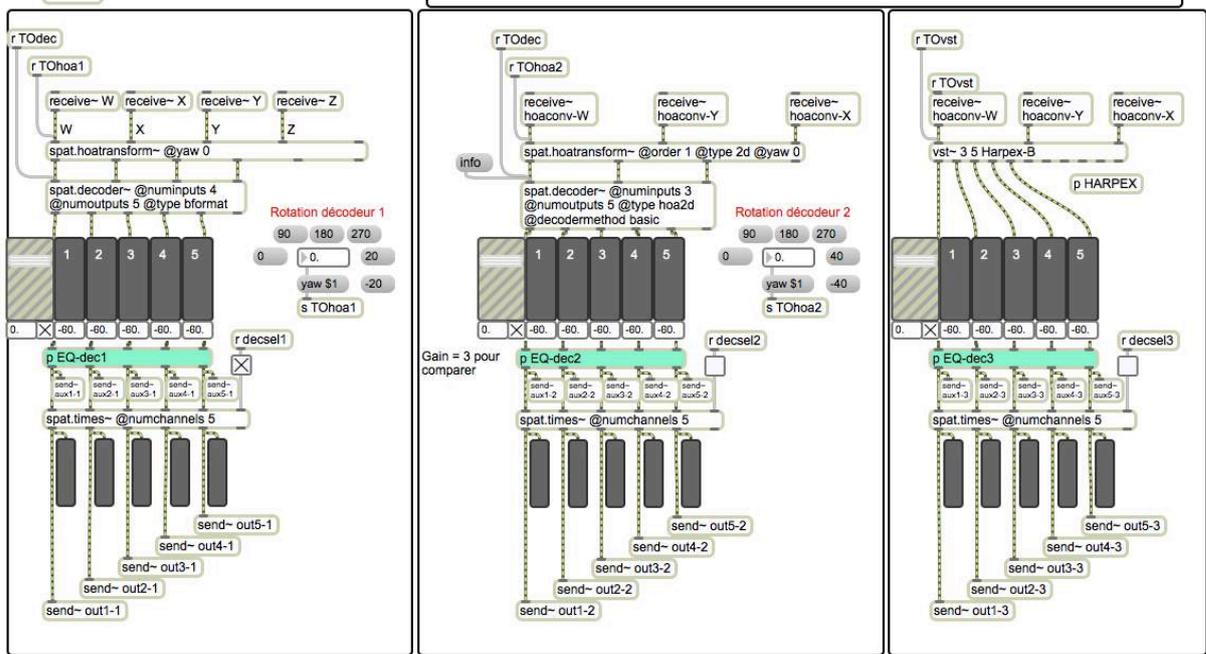


Figure 54 : Modules de déploiement de l'Ambisonics vers un format 5.0.

Grâce à ce patch, nous pourrions alors comparer les différentes images en sortie des décodeurs et décider de laquelle est la plus fidèle par rapport à ce que nous avons enregistré. Evidemment, il s'agit de faire des compromis, du fait qu'un décodeur peut être adapté pour une situation et ne pas être tout à fait optimal pour une autre. Ainsi, une fois le décodeur choisi, nous l'intégrerons dans le patch final, qui permettra la simulation de conduite du véhicule électrique.

De plus, ce patch dispose d'une écoute stéréo. En effet, nous disposons d'un lecteur 6 pistes qui permet de distribuer de manière simultanée les signaux WXYZ issus du microphone Soundfield ainsi que les signaux LR issus du couple ORTF Schoeps dont nous disposons lors des prises de son. Il est important de pouvoir écouter un même paysage sonore sur deux formats différents. En effet, le couple ORTF est une technique de prise de son que nous connaissons bien, autant en terme de spectre et de coloration des micros qu'en terme de spatialisation. Ainsi, cela nous permet d'avoir une référence en tête lors de l'écoute de la scène sonore selon le décodage Ambisonics.

De même, nous avons intégré un dernier module de monitoring au casque, qui permet une écoute binaurale du signal issu des différents décodeurs.

Enfin, en vue de rendre le patch le plus pratique et fonctionnel possible, nous avons intégré une barre de lecture qui permet de naviguer dans le fichier audio, ainsi qu'un

égaliseur une bande, dont les réglages se répercutent sur chaque décodeur, afin qu'une comparaison aisée puisse se faire.

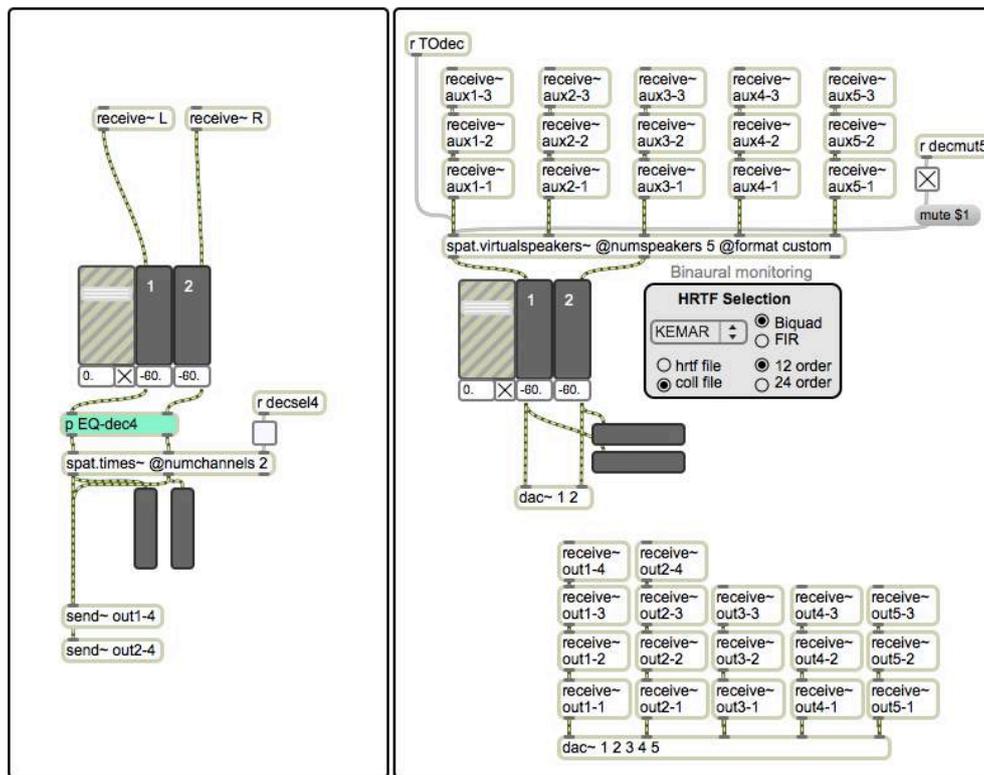


Figure 55 : Modules d'écoute stéréophonique et binaurale.

3.4.4 Le patch de définition des trajectoires.

Une fois le décodeur Ambisonics choisi, nous exportons chacune des ambiances enregistrée en Ambisonics vers un format 5.1, afin d'alléger le patch final de définition des trajectoires d'un véhicule électrique.

Pour ce faire, nous travaillons en parallèle entre MaxMSP et le séquenceur Digital Performer, du fait des échanges de données entre ces deux instances.

Les étapes nécessaires à la définition d'une trajectoire dans un paysage sonore donné sont les suivantes :

- Une ambiance enregistrée en Ambisonics, encodée en format 5.0 est lue depuis Digital Performer et est envoyée sur un bus de sortie 5.0 de MaxMSP ;
- Concernant la définition des trajectoires, plusieurs étapes sont nécessaires :
 1. Le choix du stimulus ;
 2. La définition de la trajectoire (manuelle ou automatique) ;
 3. Le calcul des vitesses instantanées et moyennes ;

4. L'envoi des coordonnées cartésiennes x , y , z , ainsi que de la vitesse v dans le séquenceur Digital Performer via des plugins de transfert de données OSC.
5. La relecture de la source mobile dans le paysage sonore donné.

Dans un premier temps, il est nécessaire de choisir la source qui illustrera notre véhicule électrique. Comme dit précédemment, nous nous baserons sur les stimuli issus de la Renault Zoé, désignés par Andrea Cera au sein de l'équipe Perception & Design Sonore de l'IRCAM (Paris).

Pour ce faire, nous avons créé un module permettant de choisir la source sonore :

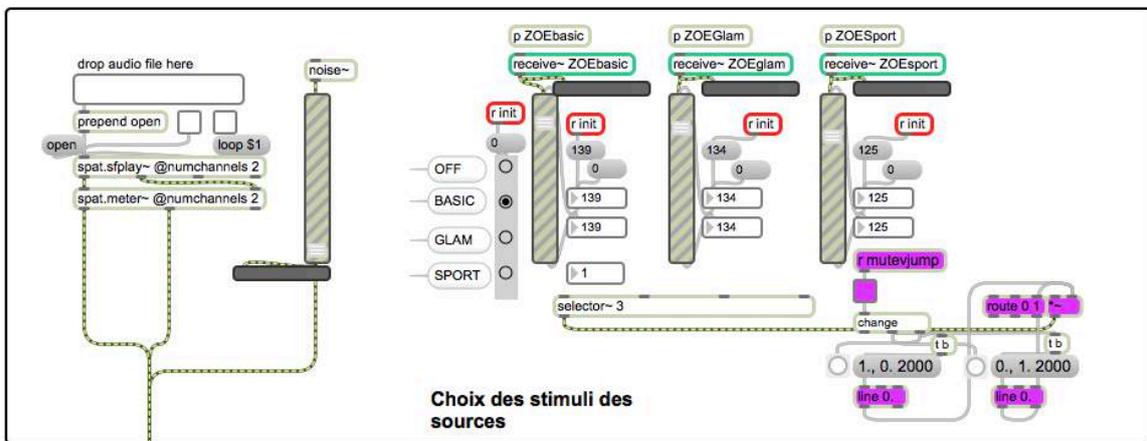


Figure 56 : Module de choix de la source sonore.

Nous avons donc le choix entre jouer un fichier audio stéréo quelconque, un bruit rose ou choisir entre les trois modes de la Renault Zoé (Basic, Glam ou Sport - [20]). Nous n'utiliserons évidemment que les stimuli de cette dernière.

Pour des questions de réalisme dans la restitution, nous avons calibré, sur la base des mesures acoustiques effectuées par Renault au cours du projet, le niveau émis des différents modes de la Zoé, à savoir :

- A 0km/h, à un mètre du point d'écoute : le mode Basic émet à 55dB(A), le mode Sport émet à 49dB(A) et le mode Glam émet à 57dB(A).
- A 25km/h, toujours à un mètre du point d'écoute, le mode Basic émet à 72dB(A), le mode Sport émet à 65dB(A) et le mode Glam émet à 65dB(A).

Il existe un patch d'asservissement de la fréquence du son ainsi que de son niveau par la vitesse du véhicule. Ce patch étant confidentiel, il nous est impossible de le diffuser. Il

est cependant importante de savoir qu'au-delà de 29km/h, la Renault Zoé n'émet plus de son. En effet, il est considéré que lorsque cette vitesse est atteinte, les sons issus de la mécanique du véhicule, que ce soit le roulement des pneus sur la chaussée ou tout simplement les contributions aérodynamiques, permettent de prévenir l'arrivée du véhicule sans avoir la nécessité d'y ajouter du son. Par conséquent, toujours dans l'optique de réduire les nuisances sonores en ville, le son ajouté sur la Renault Zoé permet de prévenir les usagers des trottoirs ainsi que les autres usagers de la route (piétons, cyclistes etc...)

Une fois le stimulus choisi, il faut définir les trajectoires. Pour ce faire, deux modes sont envisageables : un premier mode qui permet de définir manuellement une position initiale, une position finale du véhicule et un temps de trajet pour aller d'une position à une autre. L'autre mode, que nous utilisons principalement est le mode « automatique ». En effet, nous avons créé des séquences de déplacement, en regard des scénarii que nous avons défini en 3.1.

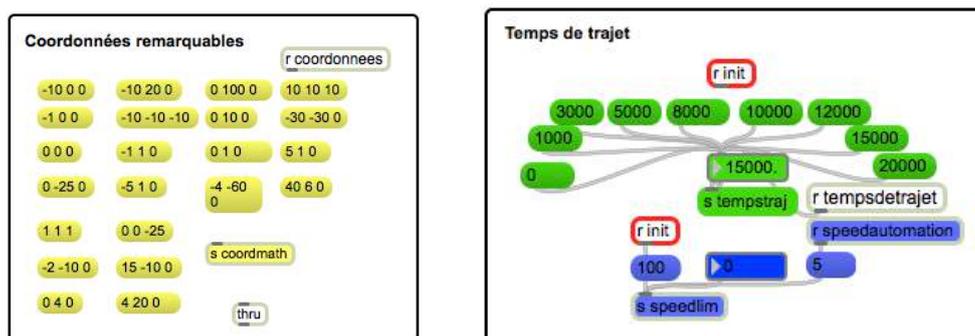


Figure 57 : Modules de définition de trajectoires (manuelles ou automatiques).

Les trajectoires étant définies par des coordonnées en x, y et z, il est possible de calculer la vitesse moyenne ainsi que la vitesse instantanée du véhicule. Ainsi, cette vitesse est envoyée dans le patch de la Renault Zoé, ce qui permet d'avoir un déplacement réaliste, et d'asservir de manière automatique la fréquence ainsi que le gain en fonction de la vitesse.

Enfin, nous utilisons l'outil de simulation de placement de sources SpatOper, développé par l'IRCAM dans le cadre du Spatialisateur©. Cet outil nous permet de placer une source dans un système de diffusion donné, tout en prenant en compte l'acoustique engendrée par le déplacement de la source (rapport champ direct / champ réverbéré, effet Doppler etc...)

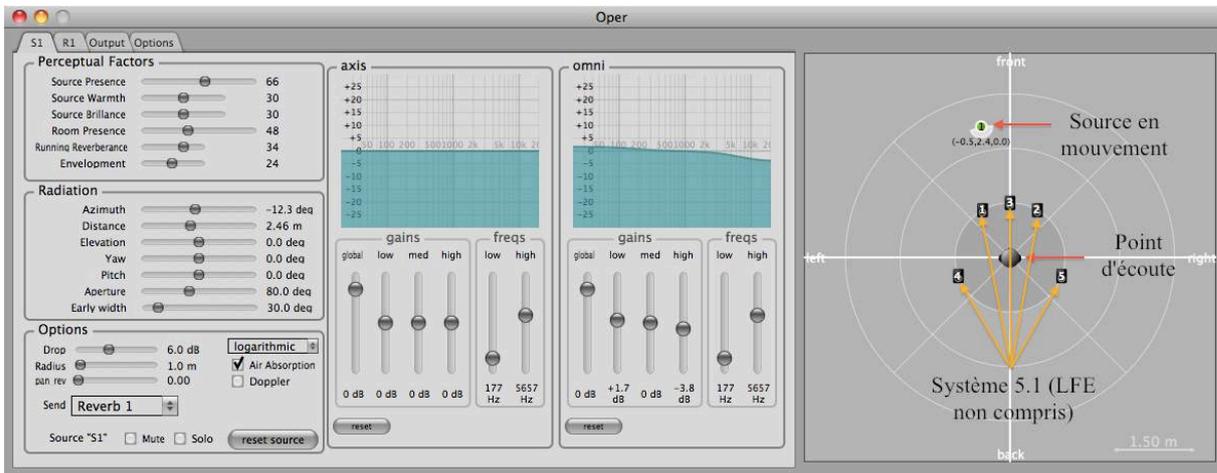


Figure 58 : Spat Oper avec source en mouvement dans un système de restitution 5.1.

A partir de là, la simulation de déplacement du véhicule est quasi-achevée. En effet, les coordonnées x , y , z ainsi que la vitesse v sont envoyées dans le séquenceur via un plug-in d'échange de données OSC.

Ainsi, chaque coordonnée est écrite sur une piste audio, selon une courbe d'automation. Le fait que cette courbe d'automation soit comprise entre 0 et 1 implique un rapport d'échelle à appliquer entre le point initial et le point final du déplacement de chaque coordonnée. Cette solution a été envisagée car elle permet une relecture facile du déplacement. En effet, une fois l'automation enregistrée, il est possible de la relire via le même plug-in et donc d'avoir un aller-retour entre l'écriture et la relecture du scénario.

De plus, il est ainsi possible d'enregistrer le scénario écrit, via le bus de sortie 5.1 de MaxMSP.

Enfin pour simplifier le transport de ces fichiers ainsi que leur écoute, nous procéderons à une dernière étape de downmix du format 5.1 vers un format stéréo ou binaural. Ce travail est encore en cours de réflexion. En effet, il existe de nombreux artefacts lors du repliement du format 5.1 vers un format stéréo ou binaural.

Le plug-in Harpex-B induit du délai sur les pistes Ls et Rs, ce qui a pour conséquence d'engendrer du repliement spectral et donc un filtrage en peigne lors du basculement des canaux Ls et Rs sur les canaux L et R (avec une atténuation de -6dB).

Pour résumer, nous avons procédé de la manière suivante :

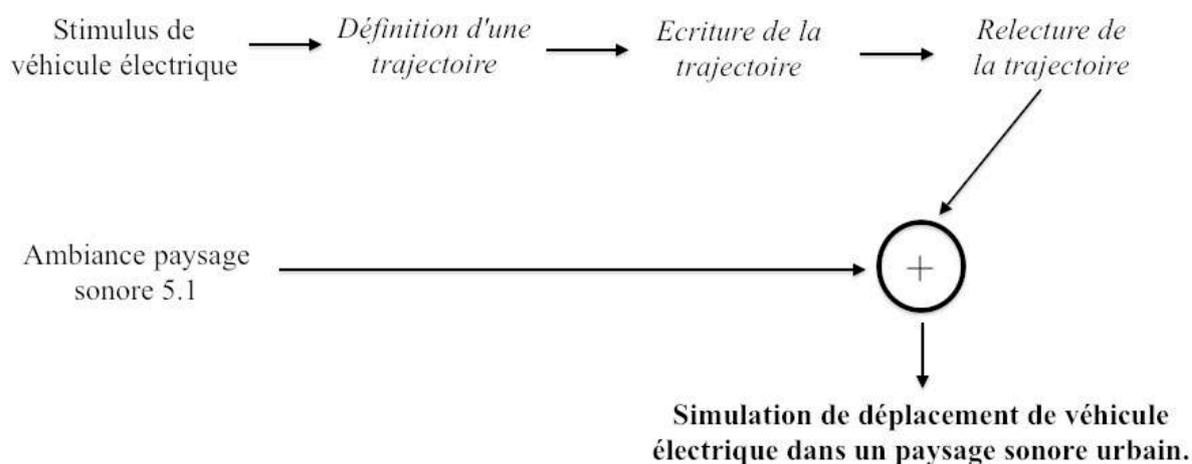


Figure 59 : Résumé de la manière dont une trajectoire de véhicule électrique est définie.

3.5 Les conclusions de cet outil de simulation.

Les simulations créées posent de nombreuses questions quant à la sonification d'un véhicule électrique.

En effet, les trajectoires étant les plus réalistes possibles, il est aisé de pouvoir tirer des conclusions sur la manière dont est exploitée la sonification de la Renault Zoé. Bien entendu, il sera nécessaire de passer par des séries de tests perceptifs, mais nous pouvons déjà émettre des propositions.

La plus grosse interrogation résultant de cette simulation est la manière dont le niveau sonore évolue à l'extérieur du véhicule. En effet, nous avons vu qu'en fonction des modes, les niveaux sonores ne sont pas les mêmes, ainsi que les dynamiques respectives des modes Basic, Glam et Sport.

Il est certain qu'en fonction du lieu dans lesquels nous faisons passer ces véhicules, nous n'appréhenderons pas de la même manière l'arrivée du véhicule. Cependant, nous avons rapidement pu voir les limites de la sonification. En effet, lorsque nous nous plaçons dans une ambiance sonore telle que La Chapelle ou encore Barbès-Rochechouart, il nous est impossible d'entendre passer la Renault Zoé à quelque vitesse que ce soit. Les niveaux moyens de ces lieux étant d'environ 76dB(A), un véhicule émettant un son à 72dB(A) au maximum ne percera pas.

A l'inverse, dans une ambiance donnée, telle que la rue Maspéro, dont le niveau sonore moyen est d'environ 49dB(A), on se demande si le niveau sonore du véhicule électrique n'est pas trop élevé.

Un système de rétroaction pourrait être une solution pour palier à ce problème d'adaptation du niveau sonore. En effet, il pourrait exister un capteur de pression acoustique à l'extérieur du véhicule, qui permettrait d'obtenir une estimation du niveau environnant, et grâce à quoi le niveau sonore du véhicule électrique s'adapterait automatiquement.

D'autres questions peuvent voir le jour à l'issue de ces simulations telles que la nature du stimuli. En effet, nous avons pour la Renault Zoé des sons composés de textures complexes et des nappes de sons comprenant de nombreuses harmoniques.

En effet, pourquoi préférer ce type de son plutôt qu'un bourdonnement, un bruit blanc ou un sifflement ? Quels sont les enjeux commerciaux ? Quels sont les aspects de sécurité à prendre en compte ?

Certains chercheurs préconisent de créer des sons continus le tout en essayant d'atténuer la linéarité de ces derniers de manière à ce qu'ils se rapprochent le plus possible des sons de moteurs thermiques, de manière à ne pas déshabituer les usagers de la route.

De même, cet outil ne sera pas valide indéfiniment. En effet, si le véhicule électrique s'impose comme le nouveau moyen de locomotion, le paysage sonore va changer, et de nouvelles campagnes d'enregistrement seront nécessaires.

Autant de questions qui ne trouvent pas une seule réponse, du fait du développement de ces technologies qui est amené à évoluer de jour en jour, alors que ce domaine est en pleine expansion.

En définitive, les questions résultant de cet outil de simulation sont relativement les mêmes que se posent déjà les scientifiques, tels que sont présentés les articles en 1.2.1. Cependant, cet outil nous permettra de tester de nombreuses propositions quant à la nature des stimuli, au niveau sonore de ces derniers et à leur asservissement en vitesse. En effet, nous pouvons évoluer dans un environnement connu et contrôlé, qu'est ce patch de simulation de déplacement de véhicule électrique.

Cet outil de simulation nous rapproche de ce qui peut être fait au cinéma. En effet, lors de la post-production sonore, nous nous situons dans un environnement connu, et avons la possibilité de créer le son de toute pièce. Lorsque le véhicule électrique aura pris sa place dans la vie quotidienne, elles s'imposeront aussi dans les films, ce qui pose la question de la représentation de la vitesse et du mouvement au cinéma, par le biais de ce type de véhicules.

4. Le véhicule électrique au cinéma : qu'en est-il de l'aspect spectaculaire ?

Le véhicule au cinéma illustre dans la majorité des cas un déplacement. De ce fait, le son se doit lui aussi être un indice du mouvement. Ainsi, le rapprochement du son et du mouvement est à mettre en exergue pour comprendre le mécanisme de la sonification du véhicule à l'image.

L'une des qualités cinématographiques du son est qu'il permet de signifier rapidement le mouvement. C'est ce qui en fait un élément qui peut s'avérer central dans ce qu'il transcrit de la présence d'un véhicule à l'image. En effet, sonifier un véhicule à l'image revient à lui apporter des preuves de mouvements supplémentaires par un certain nombre d'évènements sonores ainsi que par son évolution dans le temps. Un son d'accélération de voiture et les multiples évènements sonores l'accompagnant nous donneront une impression de déplacement bien plus marquée qu'un son de moteur à régime constant donnant plutôt l'impression d'un véhicule stationnaire.

Ainsi pour signifier le déplacement d'un véhicule, le son doit être « accidenté ». Cela constitue une source de difficultés durant l'étape du montage son puisqu'il y a nécessité d'avoir une matière sonore dynamique, au sens où celle-ci doit être empreinte d'évènements, de variations pour évoquer le mouvement du véhicule.

4.1 Sur le tournage

4.1.1 Le son synchrone.

Les plans mettant en scène des véhicules sont toujours problématiques d'un point de vue sonore. En effet, nous privilégions au maximum les dialogues lors de la prise de son pour des critères évidents de compréhension. De plus, procéder de la sorte laisse une plus grande latitude au montage son, pour ce qui est de l'ajout des effets.

Ainsi, lorsque des véhicules thermiques sont mis en jeu, le son émis par le moteur devient une contrainte. Le véhicule électrique serait donc une solution idéale pour l'ingénieur du son de plateau.

Deux cas se présentent donc à nous :

- le premier cas où le véhicule électrique est sonifié. Si le stimulus choisi est un sifflement continu, il peut être facile de s'en débarrasser en post-production, grâce à des outils de transformation spectrale;

- Si le véhicule n'est pas sonifié, il n'y a donc pas de problèmes pour privilégier le dialogue. Les seules sources pouvant nuire sont les bruits de contacts entre les pneus et la route, ainsi que les bruits d'aérodynamismes, que l'on peut considérer comme négligeables par rapport au signal de la voix, au vu des vitesses peu importantes engagées lors du tournage d'une scène.

4.1.2 Les sons seuls.

La question de la nécessité des sons seuls se pose alors. Le son d'un moteur thermique est du aux matériaux utilisés et l'acoustique provient plutôt des occurrences issues de la mécanique du véhicule que des sons de synthèses. Sur un véhicule électrique au contraire, les sons entendus jusqu'à présents ne sont que des sons synthétiques.

Si tel est le cas, on peut considérer qu'il est simple de créer le son d'un véhicule électrique en post-production, plutôt que de l'enregistrer sur le plateau. Ainsi, on pourra donner une couleur précise au véhicule.

En définitive, le fait de pouvoir créer le son du véhicule lui confère un aspect qui n'est pas forcément le reflet de la réalité, chose que l'on cherche souvent au cinéma afin de donner un côté spectaculaire à l'action.

4.2 Au montage son

Le son du véhicule a la capacité d'influer sur la matérialisation de ce dernier et ce, grâce à un travail sur les **indices sonores matérialisants**.

Les **indices sonores matérialisants**, notion apportée par Michel Chion dans son ouvrage « *Un art sonore le cinéma* » [21], sont ce qui, dans un son, renvoie au caractère concret de la source c'est-à-dire tout indice de la résistance du réel.

La manière dont ils sont dosés permet à ceux-ci de jouer un rôle important dans le rendu esthétique et dramatique du film. Les deux extrêmes étant : les sons sont totalement éliminés d'un côté, ce qui donne lieu à des sonorités abstraites et désincarnées. De l'autre côté, les sons accentués mettent en exergue les matières et les corps.

La sonification des véhicules doit s'inscrire dans une volonté de matérialisation ou de dématérialisation des véhicules à l'image allant dans le sens du rôle joué par le véhicule dans le film. Ces sons-indices seraient donc bien représentés par les cliquetis, vibrations diverses et bruits d'aérodynamismes sur l'habitacle d'un véhicule, témoignant de la vie et des mouvements de cet objet.

Il est nécessaire en post-production son de pouvoir travailler sur ces indices en les atténuant ou au contraire en les mettant en évidence.

L'une des problématiques induite par la sonification de véhicules à l'image réside dans le respect de la continuité ou non du son. En effet, lors d'une séquence de dialogue filmée en champ/contrechamp dans un véhicule en mouvement, le son du véhicule doit garantir la continuité d'espace et de temps. Or, les conditions de tournage le son du véhicule n'est pas forcément le même durant ces deux prises. Cela peut être dû notamment à une variation du régime moteur du véhicule.

Pour assurer la continuité, le monteur son doit donc avoir recours à une matière sonore nouvelle présentant des caractéristiques similaires à celles du son sur l'un des deux plans. Ceci implique également un travail pour «raccorder» les deux sons afin d'obtenir une matière sonore continue donnant l'impression d'unité de lieu et de temps.

De plus, une autre difficulté majeure pour le montage du son de véhicules est que ceux-ci ne roulent jamais exactement à la même vitesse et donc avec le même régime moteur d'un plan à l'autre. Ainsi, il se peut que là où la continuité temporelle semble assurée d'un plan à l'autre par l'image, elle ne l'est pas au son. Cette difficulté induit un travail non négligeable lors de la sonification pour reconstituer la continuité sonore manquante. Ces difficultés ne seront donc pas forcément présentes dans le cinéma mettant en scène des véhicules électriques du fait de l'absence de régime moteur et de la linéarité dont ils sont dotés.

4.3 Intégration du véhicule dans le mixage.

Mixer un véhicule électrique au sein d'un montage son aura aussi son lot de modifications. En effet, il est acquis qu'un véhicule thermique émet à une fréquence maximale de 300Hz en intérieur, et à fréquence variable en extérieur, le tout étant corrélé au régime moteur. De même, les basses fréquences occupent une part importante du son. Le véhicule électrique ne possède quant à lui pas ces basses fréquences, du fait des sons de synthèses qui le composent, et de l'absence des contributions matérielles. Ainsi, essayer de faire émerger le véhicule électrique dans tout le spectre fréquentiel sera plus difficile à réaliser que pour le véhicule thermique, qui naturellement remplit une grosse partie du spectre.

De même, il est facile de faire ressortir certaines composantes d'un véhicule thermique dans un mixage, du fait de l'irrégularité existant au sein du véhicule. Des sons continus synthétiques de véhicules électriques devront être plus compressés afin d'être mieux

timbrés, ce qui leur permettra de ne pas être masqués par les autres sources présentes dans le montage.

Enfin, en ce qui concerne l'alternance des plans, il est nécessaire de garder ces transitions « cut » pour conserver le dynamisme de la scène sonore. Sur un véhicule thermique, il est facile de trouver du dynamisme, du fait de la nature des sons accidentés qui composent le son du véhicule. Sur un véhicule électrique, qui ne possède pas de régime moteur, et donc la linéarité est une des principale caractéristique, trouver du dynamisme dans la scène reviendra à jouer principalement avec les niveaux.

Bien entendu, il n'est pas possible de définir une méthode de mixage de véhicules électriques au sein d'un film, bien qu'il doit acquis que la source doit être mixée plus fort pour intégrer de manière cohérente le mixage.

Enfin, si le véhicule électrique en vient à s'imposer au cinéma – ce qui sera forcément le cas d'ici quelques années, du fait de l'intégration du véhicule électrique dans la vie de tous les jours – la nécessité de filmer différemment se fera ressentir, et la succession de plan serrés et de plans larges aidera fortement le son.

4.4 L'aller-retour avec le cinéma.

Il n'est pas facile de s'imaginer une course poursuite entre véhicules électriques. En effet, des véhicules déboulant sur un boulevard, avec comme seuls indices de vitesse, des sifflements ou des bourdonnements continus, ne paraît pas très cohérent dans l'esprit d'un spectateur naïf. Il existe pourtant de nombreux aller-retours entre les industries automobile et cinématographique.

D'un point de vue des véhicules thermiques, le cinéma utilise des sons concrets produits par les véhicules eux-mêmes, de part les sons seuls effectués sur le véhicule. Nous avons vu dans les parties précédentes que la sonification d'un véhicule thermique au cinéma se fait de manière relativement aisée du fait de la matière importante déjà existante.

A l'inverse, en ce qui concerne les véhicules électriques, le cinéma a une longueur d'avance sur l'industrie automobile. En effet, le véhicule électrique étant relativement nouveau, les industriels ne s'étaient pas encore réellement penchés sur les problématiques telles que le son que doit émettre un véhicule électrique. C'est dans les films de science-fiction que nous bénéficions d'un nombre important d'échantillons de sonification de véhicules. Aussi bien dans *Minority Report* [22], *Bienvenue à Gattaca* [23] ou encore *Blade Runner* [24], le sound design crée autour des véhicules, certes

prototypiques, se retrouve au centre des attentions des industriels. Les professionnels chargés de créer le son des véhicules électriques actuels se basent donc sur des sons déjà connus des potentiels acheteurs, en les adaptant à l'industrie pour les rendre cohérents avec l'utilisation que nous pouvons en faire.

4.5 L'évolution de la course poursuite.

Dans le cinéma classique, mettant en scène des véhicules thermiques, nous avons vu qu'il existe de nombreux codes de montage son permettant la représentation de la vitesse ainsi que le développement de l'aspect spectaculaire d'une course poursuite. En effet, les crissements de pneus, les changements de rapports, le sur-régime ainsi que les nombreuses phases d'accélération ou de décélération indiquent au spectateur que le véhicule est lancé à pleine vitesse. Le chaos ambiant qui y règne traduit le dynamisme de la scène.

En revanche, la technologie du véhicule électrique fait qu'il est très difficile de rendre compte du dynamisme de la scène. Les codes de représentation de la vitesse du cinéma tels que nous les connaissons ne peuvent pas être appliqués (nous prendrons comme référence cette fameuse scène de course poursuite dans le film Bullitt [25], dans lequel Steve McQueen au volant de sa Ford Mustang déboule à toute allure dans les rues de San Francisco, le moteur rugissant). Il est acquis que sur un véhicule électrique, il n'existe aucun indicateur de la vitesse du véhicule, ni changements de rapports, ni sons mécaniques. Par conséquent, le son global du véhicule électrique est relativement monocorde et continu. Le but est alors de trouver des alternatives pour traduire un chaos sonore qui permettra à la scène de s'enrichir au niveau de la dynamique et de traduire la vitesse.

Dans les films de science fiction, l'utilisation de nouvelles sources sonores permet au spectateur d'y trouver son compte, comme par exemple l'utilisation de whooshes plus importants afin de combler le manque de sources sonores induisant la vitesse.

C'est là qu'une question importante entre en jeu : les courses poursuites dans les films de science fiction sont globalement plus pauvres en son que dans les films classiques et pourtant, le spectateur ressent tout de même une sensation de vitesse. Aura-t-on la même impression de vitesse dans un film « classique » que dans un film de science fiction si le même montage son est appliqué ?



Figure 60 : Véhicule futuriste dans Minority Report vs Ford Mustang dans Bullitt.

Toute l'atmosphère fantastique créée autour du véhicule, permettant d'engendrer un monde dans lequel la signature sonore est différente du monde actuel, permet au véhicule d'acquiescer cette notion de vitesse. Enfin, du fait de l'aller retour permanent entre l'industrie cinématographique et l'industrie automobile, tant que le son des véhicules électriques ne sera pas ancré dans l'esprit des spectateurs, la représentation de la vitesse dans les véhicules électriques ne fonctionnera que dans les films de science fiction, car le référentiel du spectateur n'est pas le même. Jusqu'à présent, c'est dans les films de science fiction que la personne naïve aura le plus entendu de sonification de véhicule électrique.

En définitive, le principal enjeu est d'adapter le sound design des véhicules de films de science fiction aux films actuels, afin de standardiser ces véhicules dans les films se passant à notre époque.

Conclusion

Nous sommes arrivés au terme de notre étude sur l'inscription du véhicule électrique dans un paysage sonore urbain.

De nombreuses questions se sont posées, et nous n'avons évidemment pas apporté de réponses définitives, ces problématiques étant encore récentes et ce domaine très ouvert, mais par contre nous avons envisagé des propositions.

D'une part, nous avons constaté qu'il est impératif de se concentrer sur les éléments constitutifs du paysage sonore urbain. En effet, en ne s'intéressant qu'au son émis par le véhicule électrique, nous éludons la plupart des problèmes liés à sa sonification. Nous avons mis en place une classification des paysages sonores urbains, qui intègre la plupart des environnements existant au sein de la ville de Paris intra muros.

Pour ce qui est de l'outil de simulation de déplacement d'un véhicule électrique dans un paysage sonore urbain, nous avons pu statuer sur la pertinence de ce dernier. La restitution en 5.1 est adaptée, dans le sens où, nous l'avons vu, le sujet retrouve une sensation d'enveloppement comparable à celle qu'il peut ressentir en étant en situation réelle. De même, les Renault Zoé ont suivi des trajectoires similaires à celles effectuées dans la réalité. On ne peut pas actuellement attribuer de réelle valeur scientifique à ces constatations car une phase de test reste nécessaire pour valider le protocole dans son ensemble.

Cet outil nous permet donc dans un premier temps de tirer certaines conclusions en ce qui concerne la sonification des véhicules électriques :

- Le niveau sonore ne peut pas être fixe. En fonction de l'environnement du véhicule, il sera soit masqué par le niveau sonore ambiant, soit au contraire trop présent par rapport au calme ambiant ;
- Un travail fréquentiel doit être effectué de manière à optimiser au mieux la saillance du véhicule. En effet, nous avons constaté que, à paysage sonore équivalent, avec des trajectoires équivalentes, certains véhicules électriques ressortent plus que d'autres ;

Enfin et bien évidemment, si le véhicule électrique vient à s'imposer comme le nouveau moyen de locomotion, ces conclusions seront à revoir ; en effet le paysage sonore aura lui aussi été considérablement transformé. C'est pour toutes ces raisons qu'il est

difficile, à l'heure actuelle, de définir précisément de quelle manière créer le son d'un véhicule électrique, tant ce domaine est en pleine expansion.

Bien évidemment, cet outil aboutira à des tests perceptifs, notamment portant sur le seuil d'audibilité du véhicule, sur son niveau sonore idéal ou encore la nature du stimulus, du fait de l'interactivité et du dynamisme que possède cet outil.

Les questions restent très ouvertes et il est important de tester de multiples solutions, de manière à adapter au mieux le véhicule électrique au milieu dans lequel il évolue, et faire évoluer le paysage sonore en conséquence ; ceci jusqu'à ce que la combinaison véhicule électrique – paysage sonore se stabilise d'ici quelques années.

D'autre part, la question de la sonification du véhicule électrique au cinéma est tout autre. Il s'agit de trouver de nouveaux codes de montage son et de mixage, ainsi que des solutions annexes à celles déjà existantes pour traduire la vitesse et l'aspect spectaculaire. En effet, le son du véhicule électrique est trop linéaire pour transmettre la sensation de vitesse. Seuls les films de science-fiction jouant avec l'imaginaire du spectateurs sont capables d'engendrer cette impression. Par conséquent, de nouvelles sources apparaîtront au fur et à mesure dans les montages sons, et il faudra apprendre à mixer ces dernières dans des décors sonores qui ne changeront pas nécessairement aussi fortement.

Enfin, une autre question, que nous ne nous sommes pas posés dans ce travail, mais qui mérite d'être posée est celle de la modification de l'urbanisme. En effet, la conception de signaux de véhicules électriques est aussi influencée par la manière dont évolue le paysage sonore. Nous pouvons imaginer que d'ici quelques années, alors que le paysage urbain aura évolué, les signaux aujourd'hui conçus pour les véhicules électriques deviendront désuets. Un exemple fut le développement du pôle Polytechnicum Descartes de Marne la Vallée, au cours duquel de nombreuses questions se sont posées en matière d'urbanisme, notamment dans la conception des bâtiments en fonction du rayonnement acoustiques des différentes sources. Ainsi, cette œuvre qui compte aujourd'hui quinze années de fonctionnement pourrait devenir obsolète avec l'apparition de nouvelles sources sonores.

En définitive, le véhicule électrique introduit de nombreux bouleversements dans l'industrie automobile bien sûr mais aussi dans l'industrie cinématographique et ses techniques. Nous pouvons dire que le présent rattrape le futur...

Bibliographie indicative :

- **Partie 1 :**

[1] : Schafer, R. M. (1979). *Le paysage sonore* (p. 41). J.-C. Lattès.

[2] : Mersenne, M. 1627. *Traité de l'harmonie universelle*.

[3] : Aumond, P., Berengier, M., Gauvreau, B., Lac, C., & Masson, V. (2011). *Modélisation numérique pour l'acoustique environnementale: simulation de champs météorologiques et intégration dans un modèle de propagation* (Doctoral dissertation, Université du Maine).

Aballea, F., Priour, M., Defrance, J., & Premat, E. (2003). Une approche hybride pour la propagation du son en milieu extérieur complexe. *Mécanique & industries*, 4(4), 411-414.

Maffiolo, V. (1999). De la caractérisation sémantique et acoustique de la qualité sonore de l'environnement urbain. *Semantic and acoustic characterization of urban environmental sound quality*) Ph. D. dissertation, Université du Maine, France.

Niessen, M., Cance, C., & Dubois, D. (2010, June). Categories for soundscape: toward a hybrid classification. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2010, No. 5, pp. 5816-5829). Institute of Noise Control Engineering.

[4] : Menzel, D., Yamauchi, K., Völk, F., & Fastl, H. (2011). Psychoacoustic experiments on feasible sound levels of possible warning signals for quiet vehicles. *environment*, 75, 80.

[5] : Wogalter, M. S., Ornan, R. N., Lim, R. W., & Chipley, M. R. (2001, October). On the risk of quiet vehicles to pedestrians and drivers. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 45, No. 23, pp. 1685-1688). SAGE Publications.

Misdariis, N., Cera, A., Levallois, E., & Locqueteau, C. (2012). Do electric cars have to make noise? An emblematic opportunity for designing sounds and soundscapes. *Acoustics 2012 Nantes*.

[6] : Sandberg, U., Goubert, L., & Mioduszewski, P. (2010, August). Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. In *20th International Congress on Acoustics*.

[7] : « *Le Bruit à Paris* » - Rapport de la Police Nationale (2007)

[8] : « *L'acoustique de l'habitable* » – Renault (2009)

[9] : Eisele, G., Wolff, K., Alt, N., & Hüser, M. (2005, May). Application of vehicle interior noise simulation (VINS) for NVH analysis of a passenger car. In *Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, Noise and Vibration Conference and Exhibition*.

[10] : Govindswamy, K., Wellmann, T., & Eisele, G. (2009). Aspects of NVH Integration in Hybrid Vehicles. *SAE Paper*, 01-2085.

Genuit, K. The Change of Vehicle Drive Concepts and their Vibro-Acoustical Implications. In *Symposium on International Automotive Technology, Jan* (pp. 19-22).

[11] : Eisele, G., Genender, P., Wolff, K., & Schurmann, G. (2010, November). Electric vehicle sound design - just wishful thinking. In *Proceedings of Aachen acoustics colloquium, Aachen (D)* (pp. 22-24).

- **Partie 2 :**

[12] : Polack, J. D., Beaumont, J., Arras, C., Zekri, M., & Robin, B. (2008). Perceptive relevance of soundscape descriptors: a morpho-typological approach. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3810.

[13] : Guastavino, C. (2003). Etude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain. *Semantic and acoustic study of lowfrequency noises perception in urban sound environment*", Ph. D. dissertation, Université Paris, 6.

[14] : Kang, J., & Zhang, M. (2010). Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces. *Building and environment*, 45(1), 150-157.

[15] : Guastavino, C. (2006). The ideal urban soundscape: Investigating the sound quality of French cities. *Acta Acustica United with Acustica*, 92(6), 945-951.

[16] : Vogel, C. (1999). Etude sémiotique et acoustique de l'identification des signaux sonores d'avertissement en contexte urbain. *Doctorat, Acoustique, (Université Paris VI, 1999)*.

- **Partie 3 :**

[17] : Davies, W. J., Adams, M. D., Bruce, N. S., Marselle, M., Cain, R., Jennings, P. & Plack, C. J. (2009). The positive soundscape project: A synthesis of results from many disciplines. - *Acta Acustica United with Acustica*, 100 :285–292 (2014)

[18] : Guastavino, C., Katz, B. F., Polack, J. D., Levitin, D. J., & Dubois, D. (2005). Ecological validity of soundscape reproduction. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2), 333-341.

[19] : Misdariis N., Cera A., Levallois E., Locqueteau C., « Do Electric cars have to make noise ? An emblematic opportunity for designing sounds and soundscapes », CFA – Congrès Français d’Acoustique, Nantes, 2012.

[20] : <https://soundcloud.com/renaultze> - Lien vers les trois sonorités de la Renault Zoé (Basic, Glam & Sport).

- **Partie 4 :**

[21] : Chion, M. (2003). Un art sonore, le cinéma. *Histoire, esthétique, poétique*, 389.

[22] : « *Minority Report* » - S. Spielberg (2002)

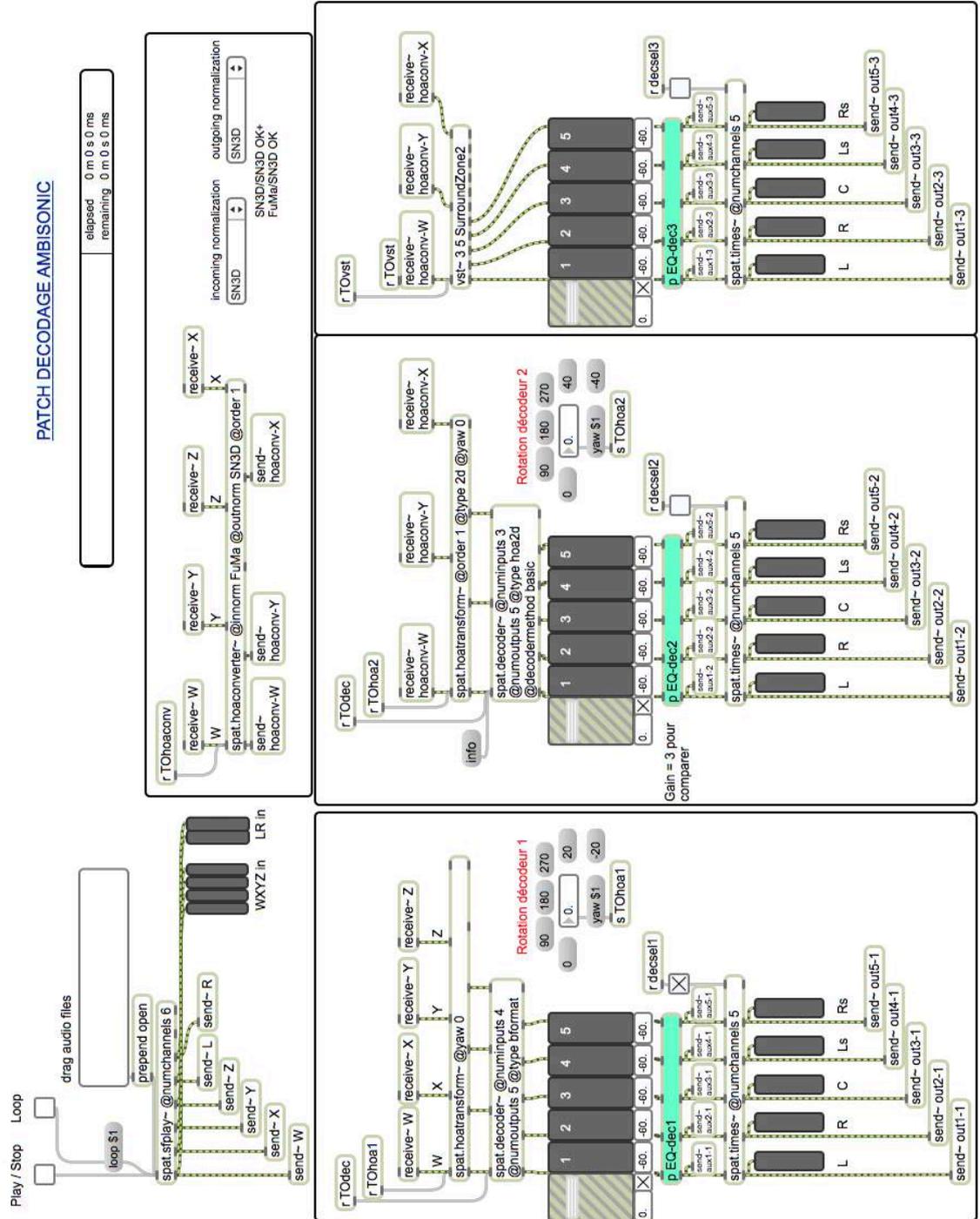
[23] : « *Bienvenue à Gattaca* » – Andrew Niccol (1997)

[24] : « *Blade Runner* » - Ridley Scott (1982)

[25] : « *Bullit* » - P. Yates (1968)

Annexes :

Annexe 1 : Patch MaxMSP – Choix des différents décodeurs d’ambisonic vers 5.1



Annexe 3 : Patch MaxMSP : Ecriture de différents scenarii pour la scène rue Norvins (Montmartre)

