



Projet de fin d  tudes (PFE)

Spécialité : Transport automobile et ferroviaire

Année scolaire : 2011-2012

Etude de la détectabilité du Véhicule Electrique en milieu urbain

NON-CONFIDENTIEL

Auteur : Anaïs GRUSON

Promotion : 2012

**Tuteur ENSTA ParisTech :
Benjamin COTTE**

**Tuteur IRCAM/Equipe PdS :
Nicolas MISDARIIS
Patrick SUSINI**

Stage effectué du 12/03/2012 au 10/08/2012

Organisme d  accueil : IRCAM

Adresse : 1 Place Igor Stravinsky, 75004 PARIS

Attestation de non confidentialité

Par la présente, je soussigné *Monsieur SUSINI Patrick*

Employé en tant que : Responsable de l'Equipe Perception et Design Sonores

Dans la société : IRCAM

ADRESSE de l'établissement : 1 Place Igor Stravinsky, 75004 PARIS

Atteste sur l'honneur que les données contenues dans le rapport de
Mademoiselle Gruson Anaïs

ne sont pas confidentielles. Par conséquent, le contenu peut être communiqué et diffusé à l'extérieur sous format papier et/ou électronique.

Si l'organisme d'accueil ne souhaite pas que le document soit diffusé en ligne, le stipuler.

A Marseille

Le 27/08/12



Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier ma famille ainsi que mes proches pour leur aide et leur soutien. J'aimerais remercier mon tuteur principal Nicolas Misdariis et mon second tuteur Patrick Susini pour leur soutien et leur pédagogie, et surtout pour m'avoir permis de réaliser ce stage. J'ai particulièrement apprécié la qualité des connaissances qu'ils m'ont apportées, ainsi que leur intérêt pour mon projet tout au long du stage. Je remercie également l'IRCAM pour m'avoir permis de travailler dans de si bonnes conditions, mettant à ma disposition du matériel performant et me donnant la possibilité de rencontrer des personnalités du monde acoustique. J'aimerais enfin remercier Mr Benjamin Cotté pour avoir accepté d'être mon tuteur, pour sa disponibilité et pour l'intérêt qu'il a pu porter à mon sujet de stage. Enfin, je remercie l'ENSTA Paris Tech pour m'avoir permis de réaliser un stage dans un domaine qui me tient à cœur.

Résumé

Le véhicule électrique séduit aujourd'hui de plus en plus le consommateur. Cependant il suscite beaucoup de débat quant à son absence de signature sonore, à l'origine d'insécurité et d'accidents avec les piétons et les cyclistes à basse vitesse. Un corpus de onze sons a été étudié dans le cadre de ce projet pour tenter de mettre en évidence les propriétés favorisant la détection d'un signal en milieu urbain, et de fournir des pistes dans le choix d'une signature sonore artificielle pour le véhicule électrique. Les onze signaux ont été caractérisés en temps et en fréquence. Trois environnements urbains représentatifs des conditions d'utilisation du véhicule ont été enregistrés. Des séquences ont ainsi été montées pour simuler l'approche d'une source portant ces signaux dans chacun des milieux urbains, et les temps de détection pour chaque signal dans chaque environnement ont été mesurés. L'analyse des résultats a alors montré une influence significative du type de son, du milieu urbain, mais a également révélé un effet d'apprentissage. Quelques propriétés favorisant ou défavorisant la détection ont pu être suggérées, mais une recherche plus poussée et précise est nécessaire pour conclure avec certitude. Le choix d'une signature sonore devra inclure l'opinion des auditeurs, et trouvera certainement sa solution dans le choix d'un système adaptatif interagissant avec son environnement.

Mot-clés : véhicule électrique, signature sonore, piéton, vitesse, propriétés, urbain, environnement, apprentissage, détectabilité, choix.

Abstract

Electric vehicle is today more and more attractive, but tends to run quieter than other vehicles, which can negatively affect pedestrians safety because of reduced sound cues at low speed. This project was carried on to find some sound properties that could facilitate the detection of a sound in an urban environment, in order to make the choice of a warning signal for the electric vehicle easier. The time and frequency of eleven sounds were characterized, and three urban environments were recorded. Sequences were designed then, to simulate an approaching source carrying these sounds in each of the three environments. The perception times were recorded. The analysis of the results showed up a significant impact of the types of sound and background. It also revealed a learning effect. Some properties improving or degrading the detection were suggested, but a further research is needed to conclude with certainty and accuracy. The choice of a warning signal requires the opinion of pedestrians, and will be probably solved by the design of an adaptive system that will interact with its environment.

Keywords: electrical vehicle, warning signal, pedestrian, speed, properties, urban, background, learning, detectability, choice.

Table des matières

Remerciements.....	4
Résumé.....	5
Introduction.....	8

Chapitre 1 : Définition du problème et état de l'art

I. Le véhicule électrique en ville	13
II. Une signature sonore	16
II.1. Le choix des signaux.....	16
II.1.a. Enquêtes d'opinion et études d'acceptabilité.....	16
II.1.b. Corpus des signaux retenus.....	17
II.2. Caractérisation	18
II.2.a. Caractérisation fréquentielle	18
II.2.b. Caractérisation temporelle	22
II.2.c. Analyse.....	23
III. Les environnements sonores	28
III.1. Cadre d'étude	28
III.2. Le choix des environnements	29
III.3. Matériel utilisé	29
III.3. Enregistrement.....	32
III.3.a. La zone résidentielle.....	32
III.3.b. La rue fréquentée	33
III.3.c. La zone commerçante	33
III.3.d. Remarques	33

Chapitre 2: Méthodes et expériences

I. Etape 1 : Seuil d'audibilité du son de référence.....	36
I.1. Le choix du son de référence	36
I.2. Le seuil d'audibilité	36
I.3. Analyse ANOVA et remarques	39
II. Etape 2 : Egalisation en sonie	41
II.1. D'un signal juste audible à un signal clairement audible.....	41
II.2. L'égalisation en sonie.....	41
II.2.a. La sonie	41
II.2.b. L'expérience d'égalisation.....	42

III. Etape 3 : La mesure du temps de réaction.....	43
III .1. L'approche d'une source.....	43
III.2. Les signaux dans les environnements sonores.....	44
III .2.a. Effet de masquage.....	44
III.2.b. Un compromis	45
III.3. L'expérience de mesure de temps de réaction	48

Chapitre 3: Résultats

I. Présentation des effets et résultats d'enquête.....	49
I.1. Le type de son	50
I.2. Le bruit de fond	51
I.3. Un effet d'apprentissage	51
I.4. Enquête d'opinion	56
II. Discussion	59
II.1. Distance critique et temps de réaction.....	59
II.2. Analyse des résultats.....	60

Conclusion.....	64
------------------------	-----------

Bibliographie.....	65
---------------------------	-----------

Annexes

Annexe 1.....	67
Annexe 2.....	68
Annexe 3.....	69

Table des figures

Figure 1: Immatriculations de voitures électriques en France par mois sur 2011	10
Figure 2 : Immatriculations de voitures électriques en France par mois sur 2012.....	11
Figure 3: Vue en coupe de l'IRCAM.	12
Figure 4 : Niveau en dBA pour le véhicule diesel.....	13
Figure 5 : Niveau en dBA pour le véhicule électrique.....	13
Figure 6: Niveaux de bruit extérieur pour un véhicules à moteur thermique et un véhicule électrique	14
Figure 7: Analyse FFT du bourdonnement électrique et de la sirène..	19
Figure 8 : Calcul du coefficient d'inharmonicité	20
Figure 9 : Valeurs du coefficient de planéité spectrale pour différents types de spectres.	21
Figure 10 : Une impulsion et un bruit produisent tous les deux un spectre continu.	21
Figure 11: Enveloppe spectrale d'un signal modulé au cours du temps.....	22
Figure 12: Enveloppe spectrale d'un signal continu au cours du temps	22
Figure 13: Enveloppe spectrale d'un train d'impulsion au cours du temps	22
Figure 14 : Résultats obtenus à l'aide des descripteurs d'inharmonicité et de bruyance.	24
Figure 15 : FFT du sifflement.....	24
Figure 16 : FFT de la sirène	24
Figure 17 : Résultats du descripteur de planéité spectrale et du facteur de crête spectral.....	25
Figure 18 : répartition des sons retenus dans l'espace temps/fréquence choisi.....	27
Figure 19: médianes intergroupes et leur intervalle interquartile respectif pour le niveau sonore ajusté.....	28
Figure 20 : Handy Recorder H4n (Zoom)	29
Figure 21 : Différence entre placement en V et placement en X/Y.....	30
Figure 22 : H4n muni de sa bonnette coupe-vent.....	30
Figure 23 : Le H4n sur tripode positionné pour l'enregistrement.....	31
Figure 24 : Sonomètre intégrateur 2238 Médiateur (Bruel et Kjaer).....	31
Figure 25 : Points d'enregistrement des ambiances sonores urbaines	32
Figure 26 : Rue de la Reynie	32
Figure 27 : Boulevard Sébastopol.....	33
Figure 28 : Rue de la Ferronnerie.....	33
Figure 29 : Spectrogramme d'un extrait de l'enregistrement effectué en rue fréquentée.....	34
Figure 30 : Spectrogramme du même extrait de l'enregistrement en rue fréquentée après traitement sous Audiosculpt 3.0	34
Figure 31 : Interface générée par Psiexp.....	37
Figure 32: Protocole expérimental.....	37
Figure 33: Valeurs des coefficients linéaires moyens obtenus et leurs écart-types respectifs pour les différents bruits de fond.....	38
Figure 34 : Organigramme de l'expérience d'audibilité.....	39
Figure 35 : Schéma du processus de passage à un son de référence juste audible dans les différents environnements à un son clairement audible dans ces mêmes environnements.	41
Figure 36 : Schéma d'expérience pour l'égalisation en sonie	42
Figure 37 : Allure de l'évolution du niveau en dB d'un véhicule en fonction de sa position.....	43
Figure 38 : Courbes d'isosonie de l'oreille humaine	45
Figure 39: Profil du gain appliqué aux différents signaux.....	46
Figure 40: Le bruit de moteur n'a pas été conservé.....	47
Figure 41: Schéma de construction des séquences.....	47
Figure 42: Résultats de l'ANOVA menée sur la totalité des temps de réaction obtenus	49
Figure 43: Temps moyens de réaction et écart-types correspondant des différents signaux en zone résidentielle	50

Figure 44: Temps moyens de réaction et écart-types correspondant des différents signaux en zone commerçante	50
Figure 45 : Temps moyens de réaction et écart-types correspondants des différents signaux en rue fréquentée	50
Figure 46 : Evolution au fil des passages du pourcentage de non-détections.....	52
Figure 47: Répartition en % des non détections au fil des passages.....	52
Figure 48: Evolution au fil des passages du pourcentage de non-détections du bourdonnement modulé.....	52
Figure 49: Répartition en % des non détections au fil des passages.....	52
Figure 50: Evolution des moyennes des temps de réaction en zone résidentielle.....	53
Figure 51: Evolution des moyennes des temps de réaction en zone commerçante	53
Figure 52: Evolution des moyennes des temps de réaction en rue fréquentée	53
Figure 53: Diagramme de répartition de la significativité de l'effet d'apprentissage.....	54
Figure 54: Comparaison des moyennes de temps de réaction du cliquetis en zone commerçante.....	54
Figure 55: Comparaison des moyennes de temps de réaction du bruit blanc modulé en zone commerçante.	54
Figure 56: Comparaison des moyennes de temps de réaction du klaxon en zone commerçante.....	54
Figure 57 : Résultats de comparaison des moyennes	55
Figure 58 : Résultats de la question 3 du questionnaire.	56
Figure 59 : Résultats de la question 4 du questionnaire.	56
Figure 60 : Résultats de la question 5 du questionnaire.	57
Figure 61 : Résultat de la question 6 du questionnaire.....	57
Figure 62 : Résultats obtenus pour la question 7.....	58
Figure 63 : Résultats obtenus pour la question 8.....	58
Figure 64 : Exemple en zone commerçante	60
Figure 65 : Espace temps/fréquence	61
Figure 66 : Zones regroupant les trois premiers signaux détectés par bruit de fond	62

Table des tableaux

Tableau 1 : Répartition des ventes de voitures électriques par modèle en France sur 2011.....	10
Tableau 2 : Répartition des ventes de voitures électriques par modèle en France sur 2012.....	11
Tableau 3 : Suggestions de bruit à ajouter au véhicule électrique.....	16
Tableau 4 : Classement des 6 catégories de son évaluées par 24 participants.	17
Tableau 5 : Résultats des premiers choix de signaux possibles pour le véhicule électrique	17
Tableau 6 : Matrice de caractérisation des signaux.....	18
Tableau 7 : Résultats de la caractérisation fréquentielle des signaux.....	26
Tableau 8 : Résultats de la caractérisation temporelle.	26
Tableau 9 : Répartition des onze sons choisis dans la matrice de caractérisation.....	27
Tableau 10 : Niveau en dB(A) des différents enregistrements effectués à Paris.	34
Tableau 11 : Récapitulatif des valeurs des coefficients obtenues pour les différents bruits de fond..	38
Tableau 12: Synthèse d'ANOVA effectuée suite à l'expérience de seuil d'audibilité.....	40
Tableau 13: Classement des sons pour les différents bruits de fond	60
Tableau 14: Matrice des signaux	61

Introduction

Les véhicules électriques et hybrides deviennent aujourd'hui de plus en plus populaires et fréquents. Cela concerne les voitures, mais aussi des véhicules légers comme les vélos, et les véhicules lourds comme les camions et les bus utilisés en milieu urbain. Ulrik Grape, président du fabricant de piles et d'accumulateurs électriques Ener1 en Europe, a prédit que d'ici les 20 à 30 prochaines années, tous les véhicules seraient électrifiés d'une manière ou d'une autre [1]. Par ailleurs, le gouvernement japonais a annoncé en 2009 son objectif pour 2020 : 50% des voitures seront électriques [2]. En France, l'évolution des ventes et immatriculations des véhicules électriques depuis 2011 témoigne de la notoriété croissante de ceux-ci [3]. La figure 1 et le tableau 1 ci-dessous présente l'évolution des ventes de voitures électriques par modèle sur l'ensemble de l'année 2011. La figure 2 et le tableau 2 récapitulent les ventes par modèle sur les mois de janvier et février 2012.

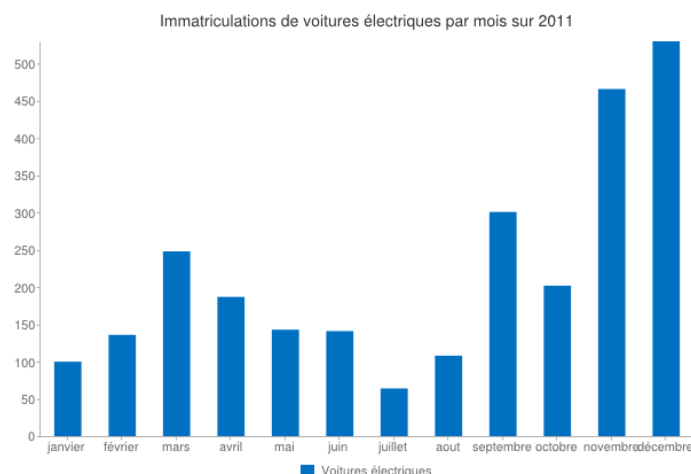


Figure 1: Immatriculations de voitures électriques en France par mois sur 2011

Modèle	Volume
Citroën C-Zero	645 voitures
Peugeot iOn	639 voitures
Bolloré BlueCar	399 voitures
Renault Fluence	396 voitures
Mia	249 voitures
Think City	110 voitures
Nissan LEAF	83 voitures
Smart Fortwo Electric Drive	52 voitures
Mitsubishi i-MiEV	42 voitures
Tesla Roadster	9 voitures
Volvo C30 E	6 voitures
TOTAL	2630 voitures

Tableau 1 : répartition des ventes de voitures électriques par modèle en France sur 2011

Immatriculations de voitures électriques par mois sur 2012

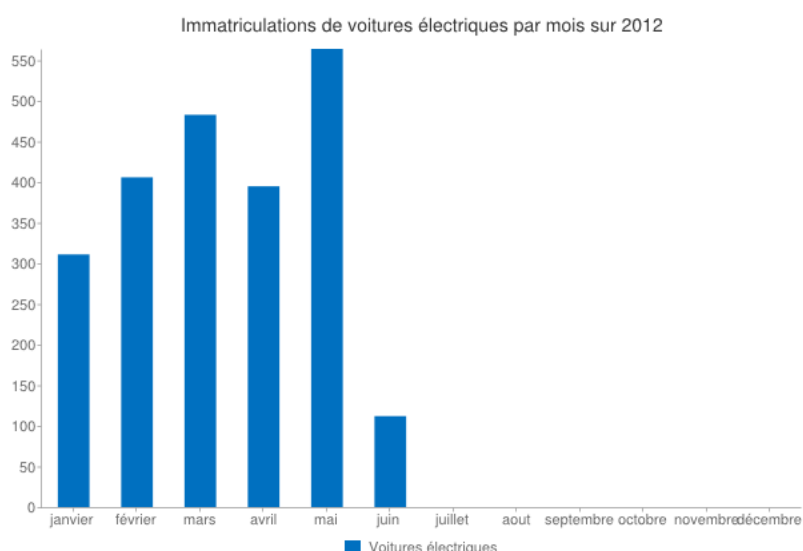


Figure 2 : Immatriculations de voitures électriques en France par mois sur 2012

Modèle	Volume
Bolloré BlueCar	1383 voitures
Nissan LEAF	239 voitures
Mia	237 voitures
Peugeot iOn	144 voitures
Renault Fluence	121 voitures
Citroën C-Zero	115 voitures
Volkswagen Golf	15 voitures
Mitsubishi i-MiEV	8 voitures
Tesla Roadster	5 voitures
Renault ZOE	4 voitures
TOTAL	2271 voitures

Tableau 2 : répartition des ventes de voitures électriques par modèle en France sur 2012

La voiture électrique séduit, et devient de plus en plus compétitive. Au-delà de ses avantages en ce qui concerne le respect de l'environnement, elle présente des avantages pour le consommateur. En effet, elle n'est pas soumise à la taxe carbone. Si son niveau est actuellement bas, la taxe carbone constituera une variable établie pour ajuster la compétitivité de la voiture électrique et réorienter les ventes vers celle-ci. Par ailleurs, ses coûts d'entretiens sont réduits : les vidanges régulières ne sont plus nécessaires. Les coûts d'entretien sont ainsi réduits de 30 à 40%, avantage non négligeable encourageant le consommateur à se tourner vers le véhicule électrique [4].

Enfin, la voiture électrique est beaucoup moins bruyante, contribuant ainsi à réduire le bruit en ville. Mais n'est-elle pas trop silencieuse ? Le New York Times l'a décrite en 2010 comme une « sorte de requin dans l'eau », car les piétons et cyclistes ne remarquaient pas sa présence tant qu'ils ne l'avaient pas vue, et se voyaient donc exposés au risque d'avoir un accident. La Fédération Nationale des Aveugles ainsi que l'Union Mondiale des Aveugles font part de leurs inquiétudes vis-à-vis de l'essor du véhicule électrique, jugé trop silen-

cieux, et mettant à mal la sécurité des non-voyants. En effet, de nombreux aveugles se sont vus surpris lorsqu'ils ont entendu juste derrière eux le son du klaxon d'un véhicule électrique : ils n'avaient pas remarqué sa présence, et étaient sur le chemin de celui-ci [5]. Le silence serait alors une nuisance au même titre que le bruit. Dans les situations à risque, les signaux sonores sont primordiaux car le danger peut provenir de n'importe quelle direction et doit être perçu tôt par les personnes concernées, sans que ces dernières aient forcément à se retourner pour interpréter visuellement le danger, c'est-à-dire le véhicule en approche. Comment s'inscrit alors le véhicule électrique, dépourvu de signature sonore, dans le milieu urbain ? Quelle serait la pertinence et l'intérêt de l'ajout d'un son à ce véhicule ? Quelles devraient être ses propriétés acoustiques pour faciliter sa détectabilité ?

Ce projet a pour objectif d'étudier la question de la détectabilité du Véhicule Electrique en milieu urbain et s'inscrit au sein du travail mené par l'équipe Perception et Design sonore de l'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique), créé en 1974 par Pierre Boulez sous l'impulsion directe de Georges Pompidou (figure 3) Cet institut est un des plus importants en Europe pour la musique et le son, et dont l'originalité est d'héberger la création musicale et les recherches musicologiques, scientifiques et techniques qui s'y rapportent



Figure 3 : (à gauche) Vue en coupe de l'IRCAM. Une grande partie de l'Institut se situe en sous-sol, sous la place Igor Stravinsky. (à droite) L'IRCAM, depuis la place Igor Stravinsky

L'équipe Perception et design sonore, intégrée à l'IRCAM depuis 1999, présente trois thématiques : les sources sonores, les sons de signalétique et les interactions sonores dynamiques [6]. L'équipe travaille depuis 2009 sur la question de la signature sonore sur les véhicules électriques, et leur détectabilité, dans le cadre d'une collaboration industrielle avec le constructeur automobile Renault pour tenter d'apporter des réponses adaptées à l'ensemble des véhicules programmés de sa gamme VE [7]. Dans la lignée de ce travail, et sur la base de l'expérience déjà acquise, le projet actuel a pour objectif d'instruire de manière plus précise la question de la détectabilité du Véhicule Electrique en milieu urbain, en effectuant d'abord l'inventaire et la caractérisation des conditions sonores urbaines représentatives de l'usage d'un VE (notamment en termes de risque accidentologique), ainsi que des sons possibles à ajouter au véhicule ; puis en croisant et analysant l'ensemble de ces données, dans le but d'émettre des hypothèses sur les facteurs les plus probables de détectabilité du VE en milieu urbain.

Chapitre 1 : Définition du problème et état de l'art

Les véhicules électriques ont l'avantage d'être plus respectueux de l'environnement et plus silencieux que les véhicules à moteur à combustion interne. Qu'en est-il de l'état de l'art concernant cette absence de signature sonore et du danger qu'elle peut provoquer ? Dans ce chapitre, l'intérêt de l'ajout d'un son au véhicule électrique est mis en évidence. Un corpus de sons est constitué et caractérisé, de façon à pouvoir déterminer par la suite les propriétés physiques des signatures sonores les plus adaptées en termes de détectabilité, en fonction du contexte urbain dans lequel le véhicule peut évoluer. Les ambiances urbaines auxquelles le véhicule peut être confronté ont été inventoriées puis enregistrées.

I. Le véhicule électrique en ville

Le Nindre et Guyader, acousticiens de Renault, ont étudié le cas d'un véhicule à moteur diesel démarrant sur un parking, et celui d'un véhicule électrique de taille similaire, dans les mêmes conditions [8]. Ils souhaitaient mettre en évidence les différences d'informations sonores délivrées aux piétons par les 2 véhicules. Le scénario se décompose en 3 phases : le démarrage, la marche au ralenti et l'accélération. Les deux véhicules ne se mettent en mouvement que dans la dernière phase. Les niveaux en dB(A) au cours du temps obtenus pour les deux véhicules sont présentés en figures 4 et 5.

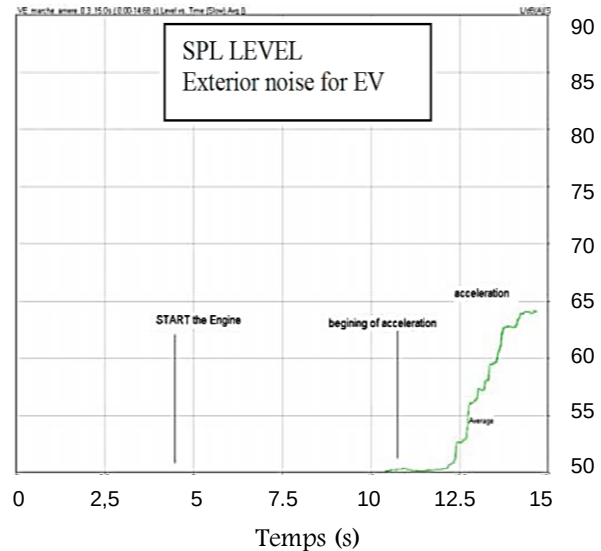
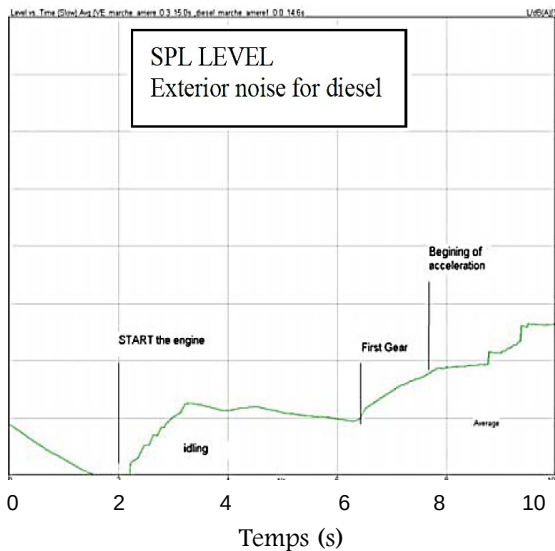


Figure 4 : (à gauche) Niveau en dBA pour le véhicule diesel
Figure 5 : (à droite) Niveau en dBA pour le véhicule électrique

Le véhicule à moteur diesel offre beaucoup plus d'indices au piéton pour le prévenir de son départ imminent. Les variations du régime moteur vont modifier le son émis par le véhicule, et informer le piéton que la voiture est en mouvement (cela reste valable pour une boîte de vitesse automatique, avec des niveaux différents). La situation avec le véhicule

électrique est totalement différente. Le piéton ne dispose pas d'information tant que le véhicule n'est pas en mouvement (le niveau du son qu'il émet est trop inférieur à celui du bruit de fond). Seule l'accélération apporte une information suffisante. Les piétons se voient alors exposés au danger, car ils peuvent être surpris par le déplacement du véhicule.

Wogalter [9] a réalisé en 2001 une enquête sur 380 individus en divers endroits de Caroline du Nord et a obtenu les résultats suivants : 70% des participants considèrent que le manque de bruit sur les véhicules électriques est un danger pour les piétons. 73% admettent utiliser le son pour détecter un véhicule en approche lorsqu'ils sont sur le point de traverser. 86% affirment que le son émis par un véhicule en mouvement les rendait mieux conscients de la position du véhicule et de sa direction. Rosenblum [10] affirme qu'en l'absence de bruit de fond, en-dessous de 30 km/h, un véhicule électrique doit être 40% plus proche du piéton pour que celui-ci puisse établir correctement sa trajectoire. Sur un parking, en présence d'un bruit de fond généré par 2 véhicules à moteur thermique marchant au ralenti, le véhicule électrique doit être 74% plus proche du piéton pour que celui-ci puisse savoir d'où la voiture vient. Au-delà de 30 km/h, les différents véhicules émettent les mêmes niveaux de bruit.

Ces constatations sont confirmées par Le Nindre et Guyader, qui précisent que si une modification doit être apportée aux véhicules électriques, ce ne sera nécessaire que pour des vitesses inférieures à 25km/h. En effet, comme le montre la figure 6, on observe entre le véhicule à moteur thermique et le véhicule électrique une différence de niveau de 10 dBA à 5km/h, et 6.5 dBA à 10km/h. Le véhicule électrique sera alors beaucoup moins audible qu'un véhicule à moteur thermique aux basses vitesses. Il peut ainsi représenter un danger pour les piétons, les cyclistes, mais surtout les aveugles, pour qui les indices sonores sont capitaux pour détecter un véhicule en approche.

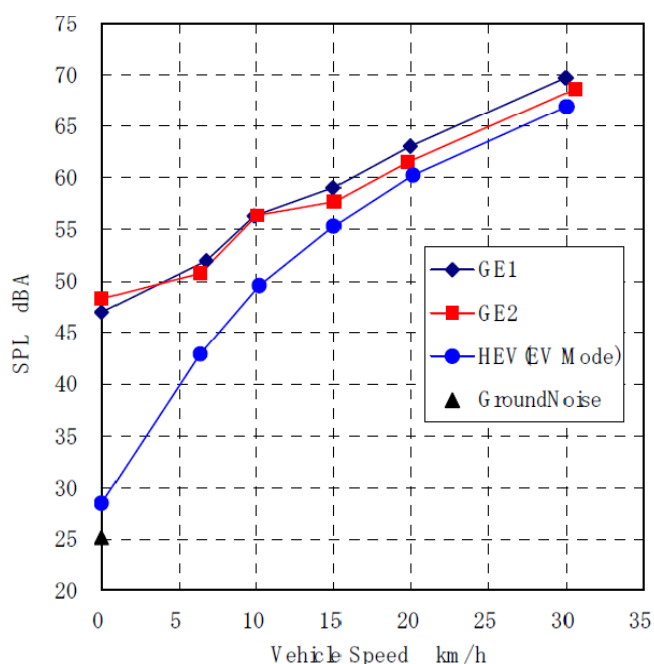


Figure 6 : Niveaux de bruit extérieur pour des véhicules à moteur thermique et un véhicule électrique

L'association Prévention Routière en 2010 fait état des accidents piétons en France métropolitaine [11] : 94% des piétons victimes d'accident le sont en ville. Les accidents surviennent surtout lors des traversées de chaussée, et plus particulièrement sur les passages piétons (ou près des intersections lorsqu'il n'y a pas de signalisation). Le nombre d'accidents mortels sur les passages piétons représente plus d'un tiers des tués en ville. Sachant que la vitesse moyenne d'approche d'un passage piéton en agglomération est de 15 à 20 km/h [12], un piéton voulant traverser la route sera plus exposé au danger dans le cas de l'approche d'un véhicule électrique : l'émergence de celui-ci est faible à ces vitesses, le rendant plus difficilement détectable.

La question de la détectabilité des véhicules électriques à basse vitesse en ville est devenue inévitable, et plus particulièrement dans les communautés d'aveugles, plus exposés au danger puisqu'ils ne disposent pas d'indices visuels pour détecter les véhicules électriques. Les informations qu'ils utilisent pour appréhender le trafic aux abords des intersections proviennent seulement du bruit émis par les véhicules et d'aucune autre source [13]. Une solution viable a été proposée pour remédier à ce manque de bruit, et au danger qu'il représente pour les aveugles, mais aussi les autres piétons et les cyclistes : ajouter un son artificiel sur le véhicule électrique, pour qu'il soit aussi détectable qu'un véhicule à moteur à combustion interne, lorsqu'il roule à des vitesses inférieures à 30 km/h [14].

Mais alors quel type de son utiliser ? Quel est l'impact du type d'environnement sonore sur la détectabilité du véhicule électrique ? Quelles propriétés doit posséder la signature sonore du véhicule pour permettre aux piétons et cyclistes de l'anticiper et ainsi assurer leur sécurité, sans pour autant contribuer à l'augmentation de la pollution sonore environnante ?

II. Une signature sonore

II.1. Le choix des signaux

II.1.a. Enquêtes d'opinion et études d'acceptabilité

Quel signal sonore ajouter au véhicule électrique ? Doit-on se cantonner au bruit de moteur, ou faut-il envisager d'autres signaux, peut-être plus facilement détectables dans les différentes ambiances urbaines? Wogalter a interrogé en 2001 285 personnes (âgées en moyenne de 26 ans) en divers endroits en Caroline du Nord au sujet du type de son à ajouter aux véhicules électriques [15]. Les différentes suggestions faites par les participants sont répertoriées dans le tableau 3.

Son	Nombre d'occurrences	%
Bruit de moteur	109	43%
Bourdonnement	109	43%
Musique	14	5,5%
Sifflement	8	3,5%
Bips	5	2%
Klaxon	5	2%
Cliquetis	2	1%
Bruit d'échappement	2	1%

Tableau 3 : Suggestions de bruit à ajouter au véhicule électrique. Un participant peut donner plusieurs suggestions.

Une seconde étude de Wogalter consistait à demander aux participants d'évaluer le degré d'acceptabilité de 14 types de sons différents listés sur un questionnaire ; pour répondre, les participants ne disposaient que des noms des sons, et n'avaient pas la possibilité d'en écouter. Cette étude a validé les résultats de la première étude, mais a de plus montré que le bruit blanc était aussi considéré comme acceptable pour les véhicules électriques. Nyeste et Wogalter ont poursuivi cette étude en 2008, en reprenant certaines catégories de sons mentionnées dans les deux études précédentes, et en demandant aux auditeurs de les écouter et d'évaluer leur niveau d'acceptabilité. Ils ont retenu 6 catégories de son : le bruit de moteur, le klaxon, le bourdonnement, la sirène, le sifflement et le bruit blanc. Les sons étaient issus de la base de données sonores sur internet The Freesound Project (<http://freesound.iua.upf.edu/>). 24 personnes (d'âge moyen 19,4 ans) ont alors écouté et évalué ces sons en termes d'acceptabilité. Les résultats obtenus pour les six catégories de son sont récapitulés dans le tableau 4.

Catégorie de son	Son le plus apprécié : nombre d'occurrences	Son le moins apprécié : nombre d'occurrences
Bruit de moteur	22 (46%)	2 (4%)
Bruit blanc	9 (19%)	3 (6%)
Bourdonnement	8 (17%)	3 (6%)
Sifflement	3 (6%)	4 (8%)
Klaxon	5 (10%)	20 (42%)
Sirène	1 (2%)	16 (34%)

Tableau 4 : Classement des 6 catégories de son évaluées par 24 participants. Les catégories sont données de la plus acceptable à la moins acceptable.

Les habitudes et familiarités ont pu jouer un rôle dans l'évaluation ; en effet le bruit de moteur, le bourdonnement et le bruit blanc sont depuis longtemps associés aux véhicules à moteur thermique, contrairement aux trois autres sons dont les caractéristiques telles que la discontinuité tendent à déplaire [16].

II.1.b. Corpus des signaux retenus

Pour ce projet, les six catégories de sons retenues par Nyeste et Wogalter en 2008 ont été reprises. Cependant, le cliquetis, suggéré par l'étude de Wogalter en 2001, a été également choisi. En effet, même si cette catégorie n'a pas été souvent suggérée, elle reste différente des six autres –le bruit d'échappement demeure très proche du bruit de moteur, et le bip du sifflement. Il est alors pertinent d'étudier sa détectabilité en milieu urbain, pour pouvoir déterminer par la suite si cette catégorie est envisageable pour la signature sonore du véhicule électrique. Les signaux ont été extraits de deux bases de données sonores à disposition à l'IRCAM : Hollywood Edge et Blue Box, et ont été choisis de façon à ce que leur contenu sémantique ne soit pas trop important : c'est-à-dire qu'ils ne sont pas trop fortement associés à une source familière, ce qui pourrait biaiser les résultats par la suite. Cela était en particulier valable en ce qui concerne la sirène, facilement associée aux services d'intervention médicale et policière, et à l'urgence, à connotation négative. Dix-huit sons ont d'abord été retenus, comme présenté dans le tableau 5.

Catégorie	Nombre de signaux différents
Bruit de moteur	3
Bourdonnement	2
Sifflement	3
Klaxon	3
Cliquetis	3
Sirène	3
Bruit blanc	1

Tableau 5 : Résultats des premiers choix de signaux possibles pour le véhicule électrique. 18 sons différents ont été choisis.

II.2. Caractérisation

Quel type de signal est le plus susceptible d'être rapidement perçu dans les différents environnements sonores urbains? Il est nécessaire de définir les propriétés acoustiques des signaux choisis pour pouvoir mettre en évidence les caractéristiques améliorant la détectabilité du signal dans les environnements sonores urbains, dans le but de déterminer le type de son le plus pertinent à ajouter au véhicule électrique. Les signaux choisis à l'étape précédente ont été caractérisés en temps et en fréquence. Cette caractérisation permettra de discriminer les signaux, et également d'affiner le choix des signaux, dans le but de remplir de façon homogène la matrice suivante (tableau 6).

Temps \ Fréquence	Continu	Modulé	Train d'impulsion
Harmonique			
Inharmonique			
Bruit			

Tableau 6 : Matrice de caractérisation des signaux: la dimension temporelle se décline en 3 catégories (les signaux continus, modulés et les trains d'impulsion), tout comme la dimension fréquentielle (les signaux harmoniques, inharmoniques, et les bruits).

Cette caractérisation a été effectuée à l'aide d'un ensemble de descripteurs de sons appelé Ircamdescriptors¹, fonctionnant sous Matlab. Il permet une classification automatique des sons, à condition d'utiliser judicieusement les descripteurs proposés : certains descripteurs ne s'appliquent qu'à certaines classes de sons ; il n'est par exemple pas utile d'utiliser un descripteur d'inharmonicité n'est pas utile pour différencier des signaux purement harmoniques. Plusieurs descripteurs ont été testés pour chacune de ces dimensions –temps et fréquence- dans le but de trouver la meilleure discrimination des signaux possible, et de pouvoir obtenir une représentation de la matrice ci-dessus en termes de descripteurs (un seul descripteur par dimension).

II.2.a. Caractérisation fréquentielle

La caractérisation en fréquence a d'abord été effectuée à l'aide d'une analyse FFT (figure 7). Cette première étape permet de se donner une idée du caractère harmonique, inharmonique, ou « bruité » du signal, et de mieux interpréter les résultats apportés par les descripteurs d'Ircamdescriptors.

¹ G. Peeters, B. Giordano, P. Susini, N. Misdarris, S. McAdams « The Timbre Toolbox: Audio descriptors of musical signals », JASA, vol. 5, n° 130, Novembre, 2011

² Bogaards, N. « Sound Editing on the Sonogram », ICAD, Paris, 2008

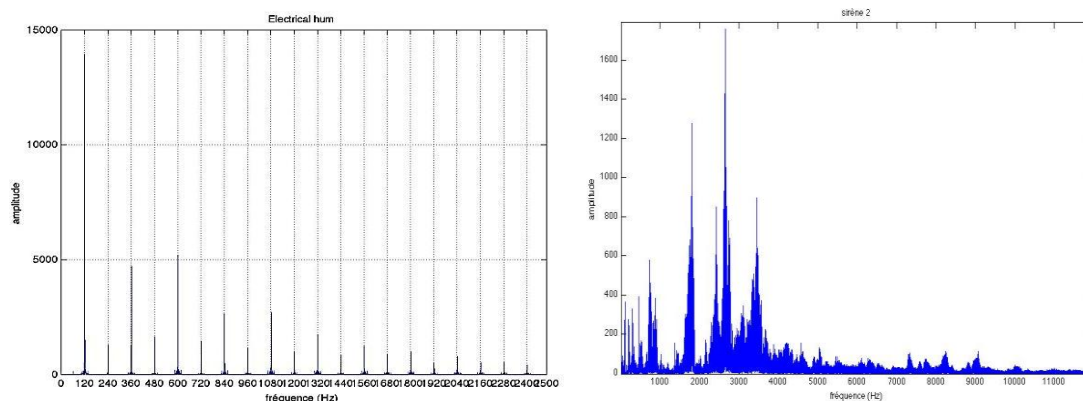


Figure 7 : Analyse FFT du bourdonnement électrique (à gauche) et de la sirène (à droite). Déjà à cette étape on peut constater que le bourdonnement est harmonique, tandis que la sirène est très inharmonique, sans pour autant être un bruit.

Trois descripteurs harmoniques et deux autres descripteurs spectraux d'Ircamdescriptors ont été employés.

- **Descripteurs harmoniques**

- **La fréquence fondamentale**

Elle n'est utilisée que pour les signaux harmoniques, ou peu inharmoniques. Ce descripteur ne peut pas être utilisé pour un signal présentant une FFT semblable à celle de la sirène présentée en figure 9. Pour un signal harmonique, la fréquence fondamentale, exprimée en Hertz, est la fréquence dont les multiples entiers traduisent au mieux le contenu spectral du signal.

- **La bruyance (noisiness)**

Il s'agit du rapport entre l'énergie du bruit, c'est-à-dire la composante non harmonique du spectre, et l'énergie totale (équation 1). Sans dimension, elle tend vers 0 pour les signaux purement harmoniques et vers 1 pour les bruits purs.

$$\text{caractère bruyant} = \frac{\text{énergie du bruit}}{\text{énergie totale}} \quad (1)$$

- **L'inharmonicité**

L'inharmonicité représente la divergence des composantes spectrales purement harmoniques par rapport à un signal purement harmonique (équation 2 et figure 9). Ce descripteur est sans dimension, et tend vers 0 pour un signal purement harmonique, et vers 1 pour un signal purement inharmonique.

$$\text{inharmonicité} = \frac{2}{f_0} \frac{\sum_i |f(i) - i \cdot f_0| \times a^2(i)}{\sum_i a^2(i)} \quad (2)$$

f_0 : fréquence fondamentale du signal

$f(i)$: fréquence de la ième composante du spectre du signal

$a(i)$: amplitude de la ième composante du spectre du signal

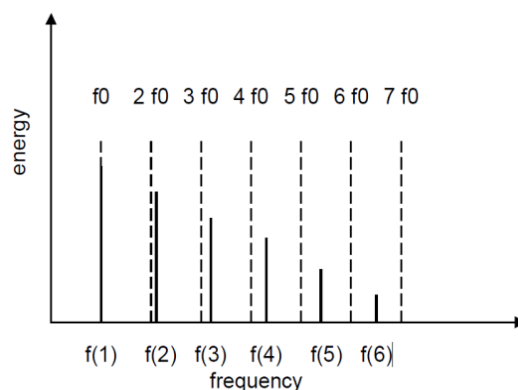


Figure 8 : Calcul du coefficient d'inharmonicité.
Les lignes en pointillées représentent les harmoniques, les lignes continues représentent les composantes observées.

Ce descripteur n'est pas pertinent pour les signaux très bruités. En effet, si l'on considère le spectre de la sirène présenté en figure 8, on constate qu'il n'existe pas de réelle fréquence fondamentale : le coefficient d'inharmonicité risque d'être incohérent. Ce descripteur sera donc employé avec précaution, et nécessitera la comparaison avec d'autres descripteurs spectraux pour valider ou réfuter les résultats qu'il apporte.

• Descripteurs spectraux

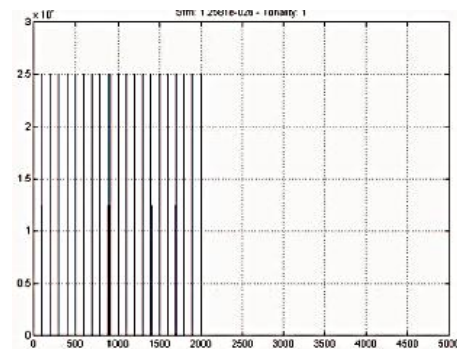
• Le coefficient de planéité spectrale (spectral flatness)

Encore appelé coefficient de tonalité, ce descripteur permet de caractériser la tonalité et la nature bruitée du spectre d'un signal. Il s'agit du rapport entre la moyenne géométrique et la moyenne arithmétique des valeurs du spectre d'énergie ( quation 3).

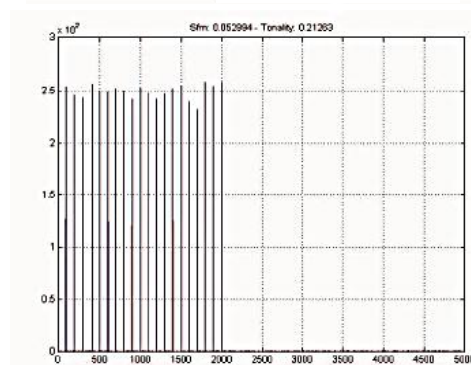
$$SFM(bande_{num}) = \frac{(\prod_{k \in bande_{num}} a(k))^{\frac{1}{K}}}{\frac{1}{K} \sum_{k \in bande_{num}} a(k)} \quad (3)$$

$bande_{num}$: bande de fréquence sur laquelle la planéité spectrale est calculée. Cette bande est divisée en K bandes plus petites. Il existe quatre bandes de fréquences sur lesquelles le calcul est effectué :

- 250   500 Hz
- 500   1000 Hz



SFM=0



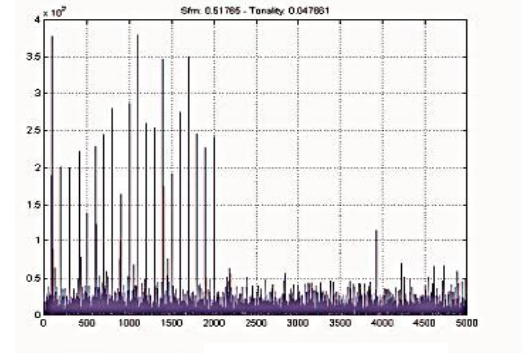
SFM=0.05

- 1000 à 2000 Hz
- 2000 à 4000 Hz

La SFM est ensuite moyennée sur l'ensemble des quatre bandes.

$a(k)$: amplitude moyenne dans la bande de fréquence numéro k . $k \in \llbracket 1:K \rrbracket$.

Un bruit blanc pur, présentant un spectre plat sans composante nulle, aura un coefficient tendant vers 1, tandis qu'un signal parfaitement tonal, présentant quelques pics restreints à un petit nombre de bandes spectrales, aura un coefficient avoisinant 0 (figure 9). Ce coefficient est sans dimension.



SFM=0.51

Figure 9 : Valeurs du coefficient de planéité spectrale pour différents types de spectres.

• Le facteur de crête spectral (spectral crest factor)

Il s'agit d'un second descripteur de planéité. Il se calcule par le rapport entre la valeur maximale du spectre d'énergie dans une bande de fréquence et la moyenne arithmétique des valeurs du spectre dans cette même bande (équation 4).

$$SCM(bande_{num}) = \frac{\max(a(k \in bande_{num}))}{\frac{1}{K} \sum_{k \in bande_{num}} a(k)} \quad (4)$$

Il tend vers 1 pour les bruits. Pour les autres signaux, il est supérieur à 1. Tout comme le coefficient de planéité spectrale, le facteur de crête spectral est sans dimension. Ce descripteur est surtout employé pour vérifier et assurer la fiabilité des résultats obtenus avec le descripteur précédent.

L'utilisation de ces descripteurs a permis d'effectuer un choix plus fin des signaux : il n'était pas nécessaire de conserver deux sons qui présentaient des valeurs similaires sur tous les descripteurs. Le but était d'obtenir une répartition assez homogène des signaux. Cependant, le choix ne pouvait pas se faire sans tenir compte de la dimension temporelle. En effet, la caractérisation spectrale ne rend pas compte du caractère impulsionnel d'un signal : un bruit et un signal impulsionnel produisent tous les deux un spectre continu [17] comme présenté sur la figure 10.

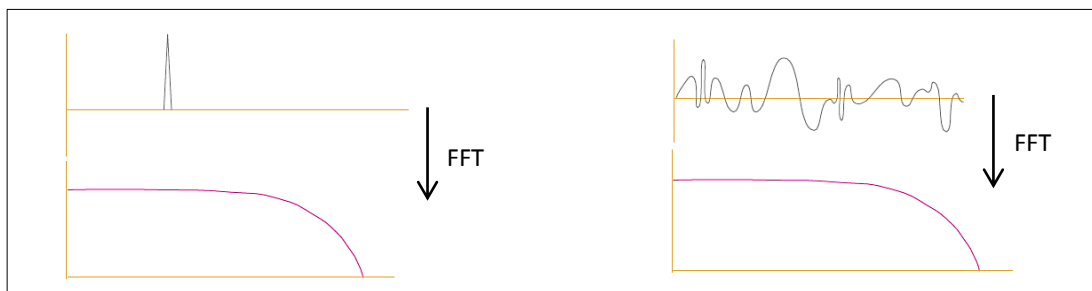
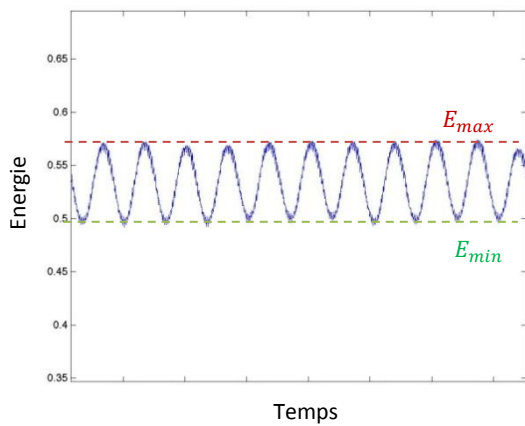


Figure 10 : Une impulsion et un bruit produisent tous les deux un spectre continu. La caractérisation temporelle ne peut pas être écartée dans l'étude des signaux.

II.2.b. Caractérisation temporelle

Il est aisé de distinguer à l'oreille un son continu d'un train d'impulsions. Cependant, l'oreille ne suffit pas pour caractériser des sons modulés. Pour cela, le taux de modulation de chaque signal ainsi que sa fréquence de modulation ont été calculés à partir de son enveloppe énergétique, fournie par Ircamdescriptors. Le taux de modulation se calcule selon la formule (5). Il est sans dimension.

$$m = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (5)$$



E_{max} : moyenne des maxima d'énergie

E_{min} : moyenne des minima d'énergie

Figure 11: Enveloppe spectrale d'un signal modulé au cours du temps

L'enveloppe énergétique permet de déterminer quasi-immédiatement si un son est modulé ou non, comme le montrent les figures 11, 12 et 13.

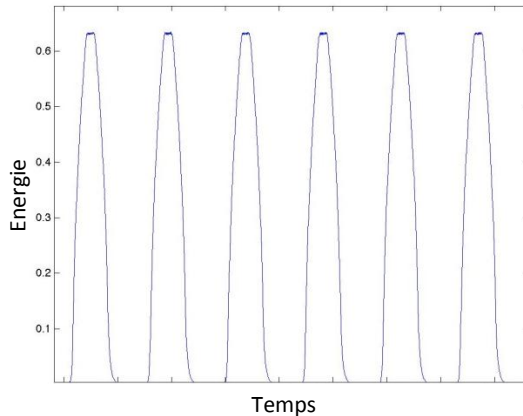
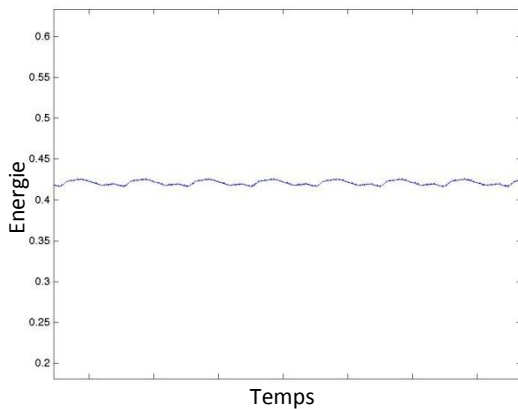


Figure 12: (à gauche) Enveloppe spectrale d'un signal continu au cours du temps

Figure 13 : (à droite) Enveloppe spectrale d'un train d'impulsion au cours du temps

II.2.c. Analyse

Le processus de travail a été le suivant : partant de la matrice présentant neuf groupes de signaux, se répartissant sur les dimensions temporelles et spectrales, les descripteurs pour chacune de ces dimensions permettant de discriminer au mieux les signaux sont recherchés. Ainsi pour chaque dimension, un descripteur est retenu, de façon à obtenir une caractérisation temps/fréquence en termes de descripteurs, correspondant à la matrice de départ, et permettant de remplir correctement celle-ci.

A l'issue des deux études en temps et en fréquence, un choix définitif des signaux à conserver a pu être effectué, fondé sur la similitude entre signaux, sur leur contenu sémantique (notamment pour les sirènes et sifflets), et la place des différents signaux dans la matrice de caractérisation. Une attention particulière a été portée aux problèmes de sur-représentativité et sous-représentativité de la matrice : certaines cases contenaient beaucoup de signaux, d'autres étaient vides. Pour résoudre le problème de sur-représentativité, les choix de signaux ont suivi les règles suivantes : toutes les catégories doivent être représentées, on ne garde qu'un son par catégorie (sauf si cela vide une case), on évite tant que possible de garder pas dans une même case des sons aux valeurs descriptives trop proches. Cet affinement du choix a permis dans un premier temps de ne garder que sept sons, correspondant aux sept catégories devant être représentées, sur les dix-huit sélectionnés au départ : un bruit de moteur, un sifflement, un klaxon, un bruit blanc, un bourdonnement, un cliquetis et une sirène.

Cependant la matrice à remplir contient 9 cases, et trois restaient vides : bruit modulé, train d'impulsion de bruits, et harmonique modulé. Aucun des 18 signaux présélectionnés n'appartenaient à ces cases : ils ne remplissaient que six cases de la matrice. La situation est restée identique avec les sept sons finalement retenus. Il s'agit de sous-représentativité. Des signaux ont alors été rajoutés : le bruit blanc modulé, le train d'impulsions de bruit blanc, et la modulation harmonique. La modulation harmonique est issue de la base de données Blue Box, tandis que le bruit blanc modulé et le train d'impulsions de bruit blanc ont été créés sous Matlab à partir du bruit blanc continu initialement sélectionné. Il est important de préciser que la sur-représentativité doit être le plus possible limitée. En effet les signaux seront par la suite employés pour mener des expériences ; trop de signaux les rendraient alors lourdes et très coûteuses en temps. Les paragraphes ci-dessous ne concernent que les dix signaux retenus.

- **Caractérisation fréquentielle**

La FFT a d'abord permis une première caractérisation grossière des signaux et a mis en évidence les problèmes de sous-représentativité dans la matrice. Les résultats obtenus à l'aide des descripteurs d'inharmonicité et de bruyance sont présentés sur la figure 14. Comme énoncé précédemment, le descripteur d'inharmonicité n'est pas pertinent pour les sons très inharmoniques et les bruits. En effet, le bruit est proche, sur l'axe d'inharmonicité, des sons harmoniques tels que le klaxon, et le bourdonnement électrique. Ce descripteur est donc à utiliser avec précaution, et demande une vérification à l'aide des FFT respectives des signaux. Ce descripteur n'offre qu'une idée de la catégorie fréquentielle à laquelle appartiennent les signaux.

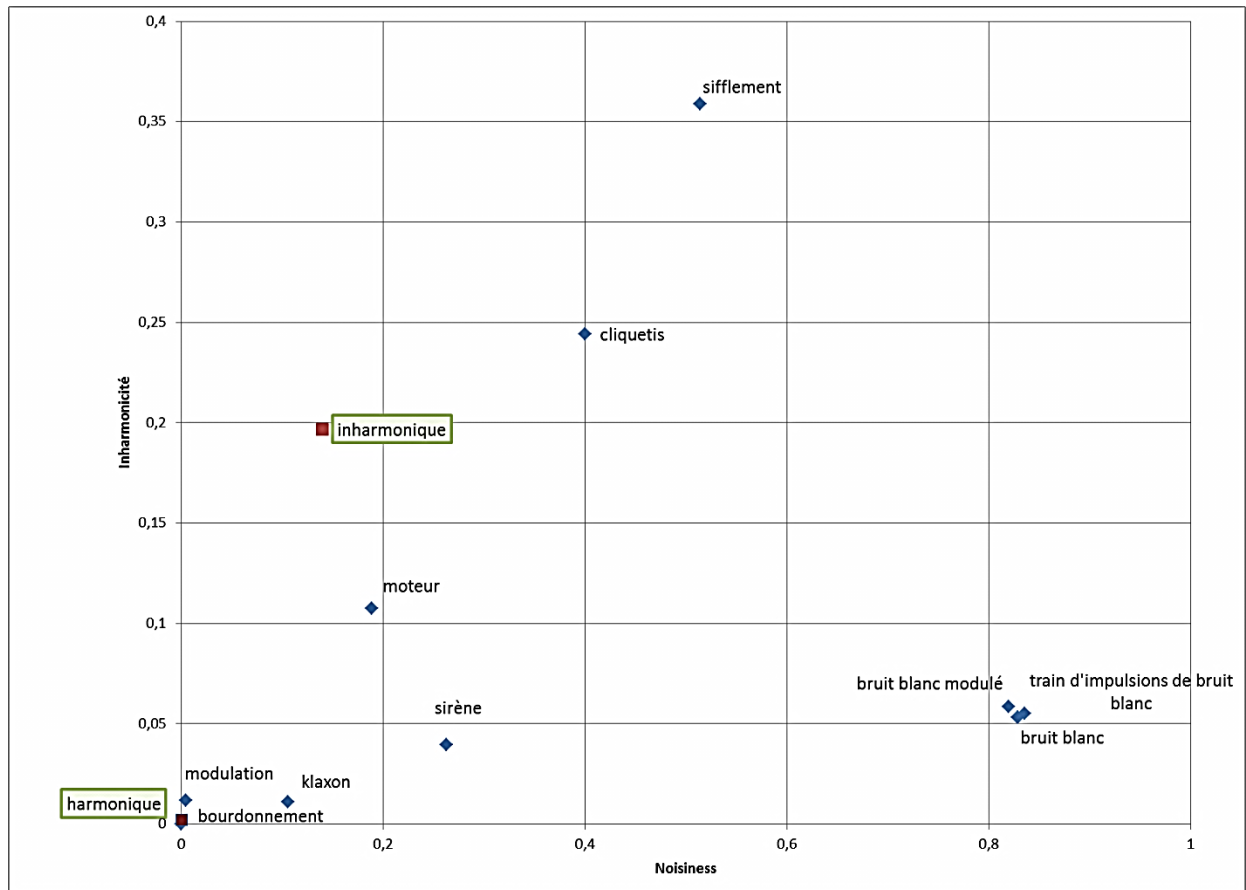


Figure 14 : Résultats obtenus à l'aide des descripteurs d'inharmonicité et de bruyance. On constate effectivement que le coefficient d'inharmonicité ne peut pas être employé pour les sons très bruités : la position du bruit blanc sur l'axe d'inharmonicité est aberrante. La place des sons harmonique (une fondamentale et 10 de ses harmoniques) et inharmonique (une fondamentale et 10 harmoniques non multiples) servent de référence.

Tout comme le descripteur d'inharmonicité, le descripteur du caractère bruité des signaux est également à prendre avec précautions. En effet, si l'on étudie les résultats obtenus pour le sifflement et la sirène avec leur FFT, les informations fournies sont différentes (figures 15 et 16). En effet, le descripteur donne un caractère bruité plus important pour le sifflement que pour la sirène. Pourtant, si l'on regarde leurs spectres respectifs, celui du sifflement semble moins bruité. Le sifflement présente des pics visiblement harmoniques autour desquels se concentre un bruit d'énergie moindre mais comparable, ce qui explique son la valeur de sa bruyance obtenue. La sirène présente de grandes émergences contrastées avec des zones de moindre énergie très réparties. Pour un tel spectre, il est difficile de parler d'une fréquence fondamentale. En fonction de la fréquence fondamentale déterminée par le

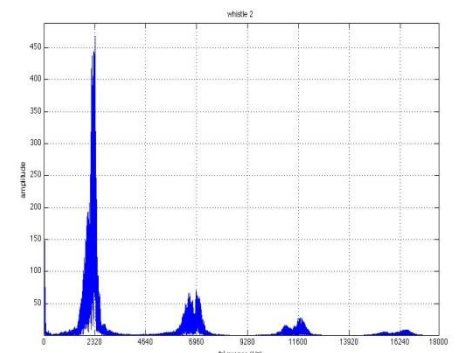
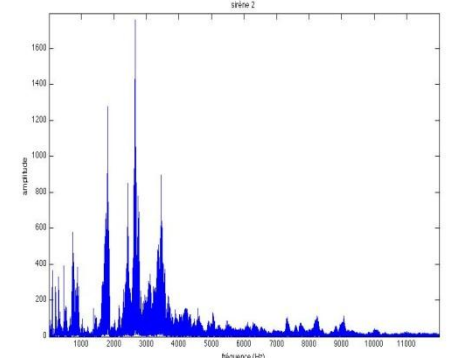


Figure 16 : (ci-dessus) FFT du sifflement
Figure 15 : (ci-dessous) FFT de la sirène



descripteur (qui lui permettra de distinguer le bruit des composantes harmoniques), le coefficient peut varier. Le descripteur a défini pour la sirène une fondamentale de 685 Hz comme fréquence fondamentale. Les multiples de cette fréquence correspondent à certains des pics visibles sur le spectre. Par conséquent, l'énergie du bruit calculée est plus faible que l'énergie totale de la sirène et la bruyance déterminée est inférieure à celle du sifflement, malgré le spectre plus bruyé et plus désordonné de la sirène. Ce descripteur n'offre qu'un aperçu de la catégorie fréquentielle des signaux, et nécessite des comparaisons avec les différentes FFT des signaux ainsi qu'avec les valeurs des signaux de référence, appelés « harmonique » et « inharmonique » sur la figure 14.

Le descripteur de planéité spectrale et le facteur de crête ont apporté une classification fiable et définitive des différents signaux, à la lumière du bilan précédent. Les résultats sont présentés sur la figure 17. Les deux descripteurs étant similaires, l'allure du graphe est cohérente. De plus, l'ordonnancement des signaux est satisfaisant au vu de leurs FFT. Les sons de référence harmonique et inharmonique confirment la cohérence des résultats.

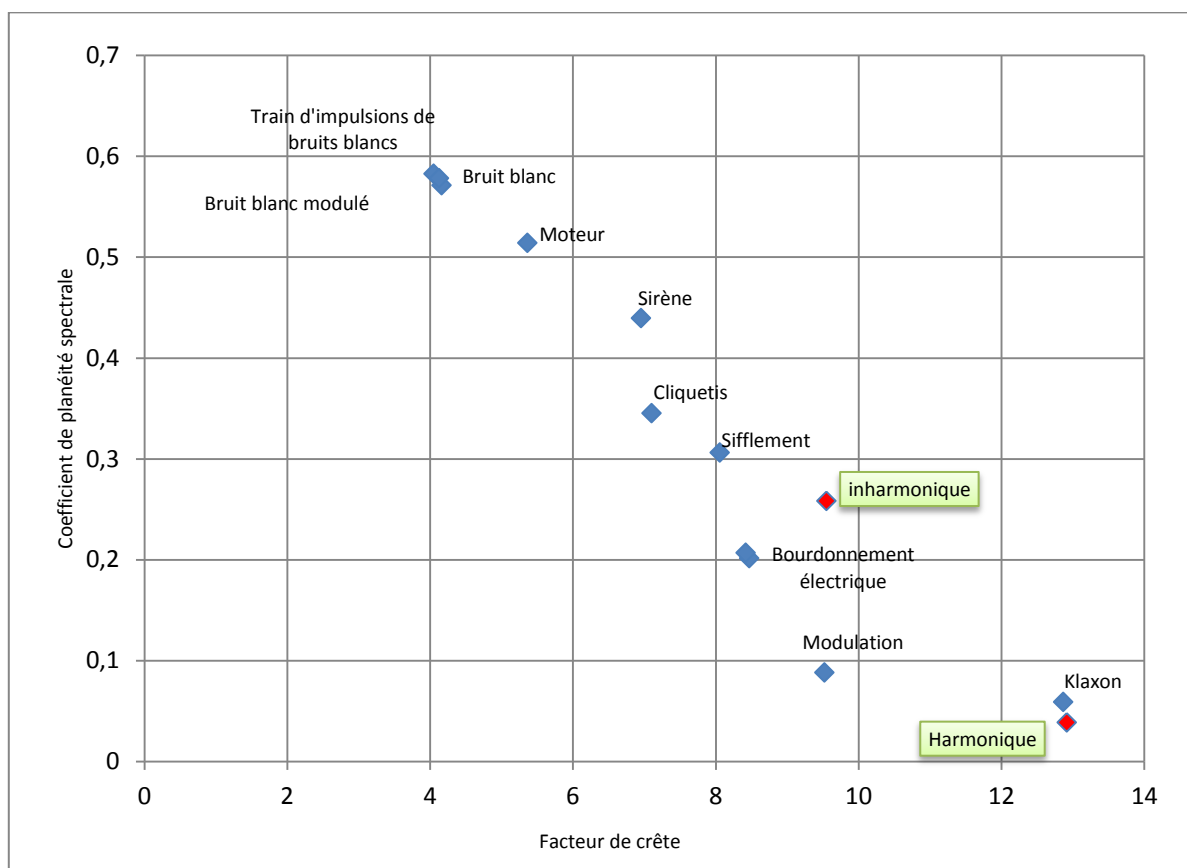


Figure 17 : Résultats du descripteur de planéité spectrale et du facteur de crête spectral. La planéité spectrale du bruit blanc n'est pas égale à 1, ce qui est normal. Le niveau de précision choisi est le même pour tous les signaux. Cela a permis une répartition cohérente des signaux en accord avec leur FFT, sans nécessiter un choix arbitraire qui pourrait conduire à des erreurs.

Ces résultats ont permis de classer fréquemment les signaux, et de relever les fréquences fondamentales des sons pour lesquels la notion était pertinente. Le bilan est résumé dans le tableau 7.

Catégorie fréquentielle	Sons	Fréquence fondamentale (Hz)
Harmonique	Klaxon	360
	Modulation	119
	Bourdonnement électrique	120
Inharmonique	Sifflement Cliquetis Sirène Moteur	
Bruit	Bruit blanc Bruit blanc modulé Train d'impulsion de bruits blancs	

Tableau 7: résultats de la caractérisation fréquentielle des signaux.

- Caractérisation temporelle

Pour chaque signal, le taux de modulation ainsi que la fréquence de modulation correspondante ont été calculés. Pour les signaux continus, le taux de modulation a été placé à zéro, et à un pour les trains d'impulsion. Les résultats sont présentés dans le tableau 8. Malgré sa fréquence de modulation élevée, et son taux de modulation faible, le sifflement a été intégré dans la catégorie des signaux modulés, car sa modulation était clairement audible.

signal	Taux de modulation	Fréquence de modulation (Hz)
Bruit blanc	0	~
Train d'impulsion de bruits blancs	1	~
Bruit blanc modulé	0.4	0.8
Moteur	0	~
Sirène	0.62	1.04
Cliquetis	1	~
Sifflement	0.074	12.77
Bourdonnement électrique	0	~
Modulation	0.19	1.47
Klaxon	1	~

Tableau 8: Résultats de la caractérisation temporelle.

Le taux de modulation et le coefficient de planéité spectrale ont été les deux descripteurs finaux employés pour caractériser les signaux. En effet le coefficient de planéité spectrale est fiable, et présente une bonne répartition des différents sons sur son axe, facilitant leur classification. Le taux de modulation est également plus clair que la fréquence de modulation pour représenter temporellement la répartition des différents sons. Les résultats sont présentés sur la figure 18.

Cette représentation a mis en évidence la présence d'un « trou » au milieu du graphe. Un son manquait pour assurer une répartition homogène des sons sur l'espace de représentation temps/fréquence choisi, c'est pourquoi un son supplémentaire a été synthétisé : un bourdonnement électrique modulé. Il s'agit du bourdonnement électrique initial auquel a été appliquée une modulation de taux égal à 0.6. Ce choix de taux de modulation assure de combler le « trou » dans l'espace de représentation des signaux. La fréquence de modulation choisie est de 2 Hz.

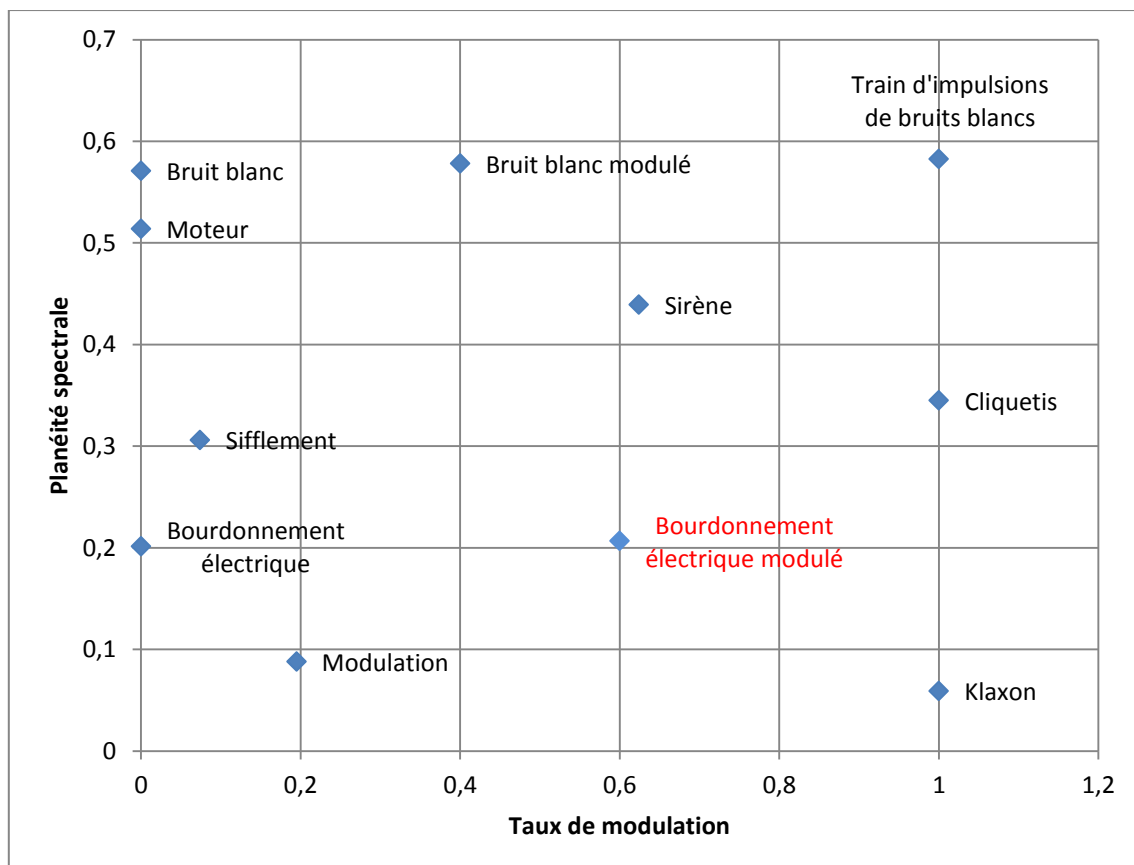


Figure 18 : Répartition des sons retenus dans l'espace temps (taux de modulation)/fréquence (planéité spectrale) choisi. Le bourdonnement électrique modulé (en rouge) a été synthétisé par la suite.

Onze sons répartis de façon homogène dans l'espace temps/fréquence ont ainsi été retenus à la fin de la caractérisation. Ces onze sons permettent alors de remplir la matrice initiale, présentée dans le tableau 9 ci-dessous.

Temps \ Fréquence	Continu	Modulé	Train d'impulsions
Harmonique	Bourdonnement électrique	Modulation, Bourdonnement électrique modulé	Klaxon
Inharmonique	Bruit de moteur	Sirène, Sifflement	Cliquetis
Bruit	Bruit blanc	Bruit blanc modulé	Train d'impulsions de bruits blancs

Tableau 9 : Répartition des onze sons choisis dans la matrice de caractérisation.

Il est à présent possible d'étudier la détectabilité de ces onze sons en milieu urbain, en fonction de leurs propriétés fréquentielles et temporelles. Mais quelles sont les ambiances urbaines dans lesquelles le véhicule électrique risque d'évoluer ?

III. Les environnements sonores

III.1. Cadre d'étude

Dans quelles ambiances sonores le véhicule électrique est-il le plus susceptible d'évoluer lorsqu'il se déplace en ville ? Il s'agit ici d'établir les conditions sonores urbaines représentatives de l'usage d'un VE, et pertinentes en matière de risque pour le piéton. Les différentes ambiances choisies doivent donc être l'illustration de lieux accessibles au piéton, où celui-ci est susceptible de traverser la route, et où le véhicule pourrait rouler à de faibles vitesses (inférieures à 30 km/h).

Menzel a étudié trois sons dans quatre fonds sonores urbains différents [18], enregistrés à Fukuoka au Japon : une rue à deux voies très fréquentée, une rue à deux voies en zone résidentielle, une route à 6 voies très fréquentée et enfin une rue étroite en zone commerçante. Les trois sons choisis, et potentiellement applicables à un véhicule électrique, étaient un bruit klaxon, un bruit de moteur à essence marchant au ralenti et enfin des salves de bruit blanc. Quinze personnes ont participé à l'expérience. Isolé dans une cabine audiométrique, chaque participant réglait le niveau du son de façon à ce qu'il soit clairement audible dans chacun des fonds sonores. Pour deux des quatre fonds sonores (la route à six voies, et la rue à deux voies en zone commerçante) le participant devait effectuer une tâche supplémentaire : régler le son de façon à ce qu'il soit tout juste audible. Aucune échelle n'était disponible. Les résultats obtenus sont présentés en figure 19.

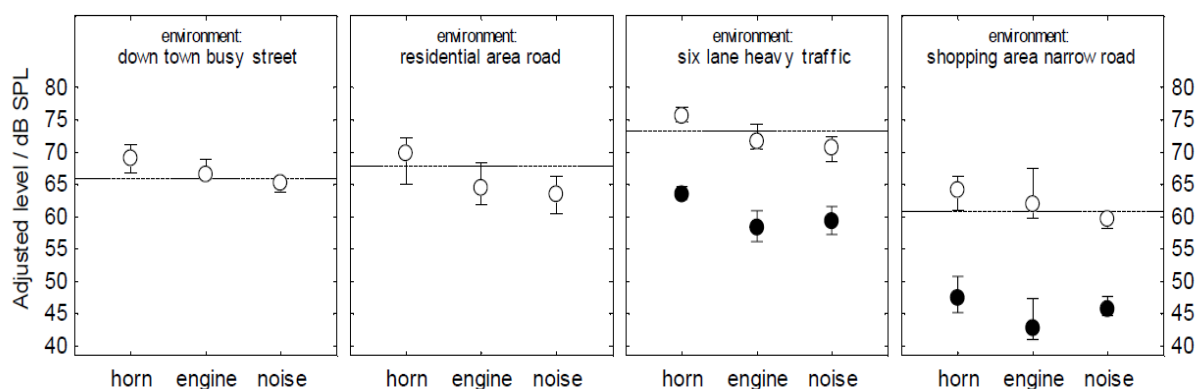


Figure 19 : Médianes intergroupes et leur intervalle interquartile respectif pour le niveau sonore ajusté. Les symboles blancs correspondent aux niveaux auxquels les sons sont clairement audibles pour les différents fonds sonores. Les symboles noirs correspondent aux niveaux auxquels les sons sont juste audibles.

Ces résultats montrent que le type de fond sonore est important, mais aussi que le type de son a une influence sur son audibilité, et sa détectabilité. Cette étude montre que si un son est clairement audible à un certain niveau sonore dans un environnement sonore, il ne le sera pas forcément dans un autre : le fond sonore a donc un impact important sur l'audibilité et la détectabilité des signaux.

III.2. Le choix des environnements

L'étude actuelle a pour objectif de mettre en évidence les propriétés sonores facilitant la détectabilité du son d'un véhicule à l'approche en ville, en fonction des différentes ambiances sonores qu'il pourra rencontrer. Il est alors nécessaire d'inventorier ces ambiances urbaines puis, tout comme Menzel, de les enregistrer. Les types d'environnements sonores mentionnés par Menzel ont été en partie retenus. Si les ambiances telles que celle de la rue étroite en zone commerçante, la rue en zone résidentielle et la route à deux voies très fréquentée ont été gardées, celle de la route à 6 voies très fréquentée a été rejetée. En effet, il est très peu probable qu'une telle route présente un accès aux piétons ; d'autre part, les routes à six voies ne sont généralement pas empruntées à des vitesses inférieures à 30 km/h. L'étude d'un tel cas n'a donc pas été faite. Les ambiances gardées représentaient un corpus exhaustif des milieux urbains accessibles aux véhicules et aux piétons, il n'a donc pas été jugé nécessaire d'en rajouter.

Kerber affirme en 2008 que dans le cadre d'une étude de perception d'un véhicule dans un environnement urbain, le dit environnement ne doit contenir aucun bruit de véhicule pour pouvoir être évalué [19]. Cette affirmation a été respectée dans le cadre de la zone commerciale et la zone résidentielle. Les voitures y passent peu, ou du moins une par une. Le véhicule électrique s'y déplacera alors généralement seul. L'étude de sa détectabilité se fera donc dans un bruit de fond dépourvu de bruit de véhicule proche. Cependant, en ce qui concerne la rue très fréquentée, les véhicules font partie de l'environnement sonore : le véhicule électrique évoluera dans une rue très empruntée par les véhicules. L'enregistrement de ce type d'ambiance ne peut donc pas se faire sans passage de véhicule.

III.3. Matériel utilisé

Les enregistrements ont été effectués à l'aide de l'enregistreur numérique Handy Recorder H4n de Zoom (figure 20), muni d'un microphone stéréo en configuration X/Y à condensateur, et d'un enregistreur sur carte SD (1GB). Il présente un filtre passe-haut de fréquence de coupure 80 Hz.



Figure 20 : Handy Recorder H4n (Zoom)

Le système stéréo XY du H4n place les deux unités de microphone en "X" (figure 21). En pointant les microphones avec croisement d'angle, le H4n peut couvrir une zone plus large et en même temps capturer les sources sonores situées au centre avec clarté et une bonne définition, à la différence du placement en « V » usuellement utilisé, qui consiste à faire pointer les micros vers l'extérieur mais cause des problèmes de perception de profondeur. De plus, il n'existe pas de différence de topologie entre les canaux droit et gauche en configuration X/Y.

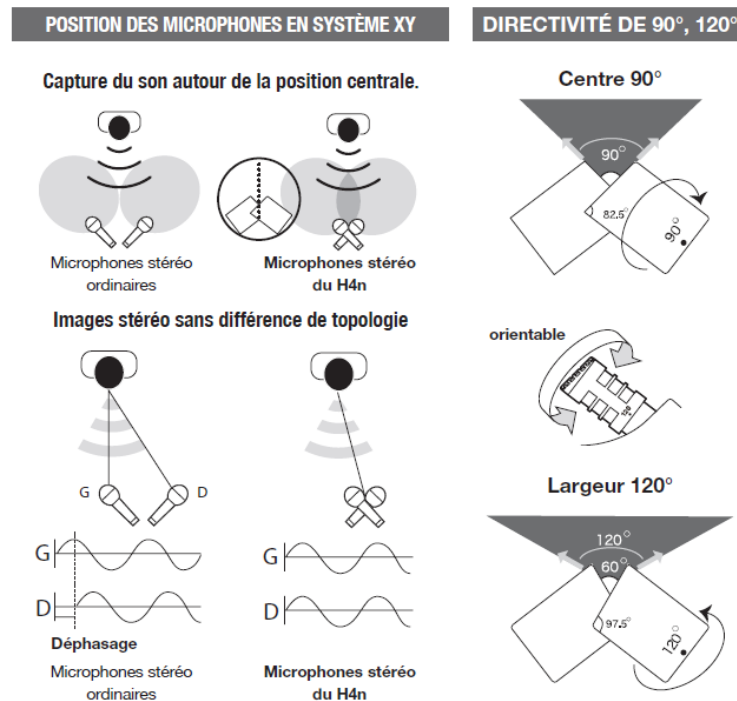


Figure 21 : Différence entre placement en V et placement en X/Y. En V, pointer les microphones vers l'extérieur donne une séparation stéréo, par contre la réponse de la zone située directement en face du microphone sera faible, d'où problèmes de perception de profondeur. La directivité du H4n peut être fixée à 90 ou à 120°.

La fréquence d'échantillonnage était de 44 100 Hz, la résolution de 16 bits, et la directivité de 120°. Le H4n était de plus muni d'une bonnette coupe-vent au cours des différents enregistrements (figure 22).



Figure 22 : H4n muni de sa bonnette coupe-vent

L'enregistreur était posé sur un tripode, à 1 mètre du sol (figure 23). Pour simuler la position d'un piéton sur le point de traverser, il était placé à 40 centimètres du bord de la chaussée, près d'un passage piéton ou d'une zone de traversée courante.



Figure 23 : Le H4n sur tripode positionné pour l'enregistrement, près d'un passage piéton, lieu privilégié des accidents

Le niveau sonore équivalent en pondération A ($L_{A,eq}$) a été mesuré simultanément, à l'aide d'un sonomètre intégrateur 2238 Médiateur de Bruel et Kjaer avec logiciel pour mesures sonométriques BZ7126 (figure 24). Il était tenu du bout du bras à l'aide d'une poignée pendant les enregistrements.



Figure 24: Sonomètre intégrateur 2238 Médiateur (Bruel et Kjaer)

III.3.b. La rue fréquentée

- Le boulevard Sébastopol (zone d'enregistrements n°2)

Ce boulevard (figure 27) est très emprunté, aussi bien par les véhicules que par les piétons. Les enregistrements effectués contiennent des passages de voitures, qui dominent au sein de l'ambiance. Le micro a été placé près d'un passage piéton, à côté d'une voie non empruntée par les véhicules. Cette voie était libre du fait du stationnement d'un véhicule à environ 40 mètres du passage piéton.



Figure 27 : Boulevard Sébastopol

III.3.c. La zone commerçante

- La rue de la Ferronnerie (zone d'enregistrement n°3)

Cette rue commerciale (figure 28) est marquée par un passage permanent de nombreux piétons, et une présence très modérée de véhicules. L'ambiance est dominée par le bruit des passants, leurs discussions, et les sons provenant des magasins.



Figure 28: Rue de la Ferronnerie

III.3.d. Remarques

Les exigences concernant l'enregistrement d'un environnement sonore urbain précisées par Maffiolo [20] ont été respectées : l'extrait doit être suffisamment amorphe, c'est-à-dire ne pas contenir trop d'émergences, et ne pas contenir de variations importantes de niveau, pour prévenir des effets de masquage.

Certaines émergences (les bruits de frein principalement) ont été retirées à l'aide du logiciel Audiosculpt 3.0² qui fournissait le spectrogramme des différents enregistrements. Ces retouches ont été effectuées lorsque la fréquence du son émergent était suffisamment distincte du reste du contenu fréquentiel du bruit de fond (figures 29 et 30).

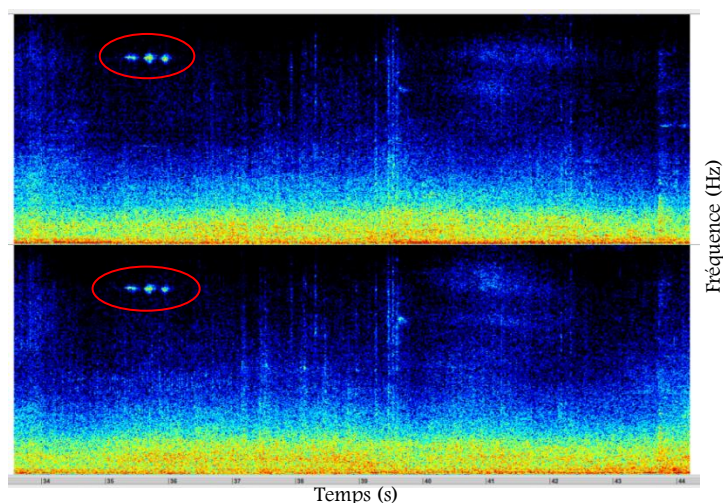


Figure 29 : Spectrogramme d'un extrait de l'enregistrement effectué dans une rue fréquentée. Le bruit de frein est un son indésirable, et son contenu fréquentiel (entouré en rouge) se détache suffisamment du reste du spectre pour qu'il puisse être retiré sans trop altérer l'enregistrement.

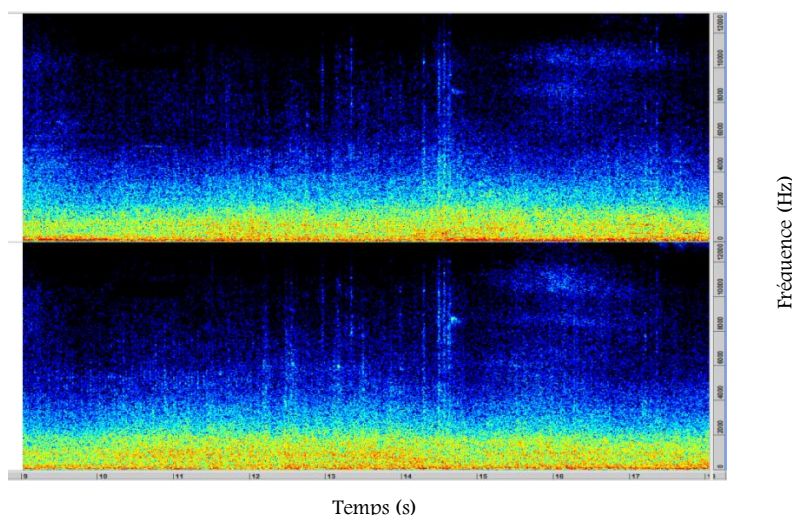


Figure 30 : Spectrogramme du même extrait de l'enregistrement en rue fréquentée après traitement sous Audiosculpt 3.0

Les niveaux en dB(A) des trois enregistrements choisis sont récapitulés dans le tableau 10 ci-dessous.

Environnement	Niveau (dB(A))
Zone résidentielle	65,1 dB(A)
Zone commerçante	56,1 dB(A)
Rue fréquentée	71,4 dB(A)

Tableau 10 : Niveau en dB(A) des différents enregistrements effectués à Paris.

Ces niveaux sont comparables à ceux obtenus par Menzel lors de ses propres enregistrements effectués au Japon.

² Bogaards, N., « Sound Editing on the Sonogram », ICAD, Paris, 2008

Chapitre 2 : Méthodes et expériences

Les signaux ayant été caractérisés à l'aide des descripteurs appropriés, et les bruits de fond ayant été enregistrés et analysés, il est alors possible d'étudier la détectabilité des signaux dans les trois différentes ambiances urbaines choisies.

L'étude de détectabilité des différents signaux s'est effectuée en trois étapes. La première est une étape de seuil d'audibilité : elle consiste à choisir un son de référence dans le corpus des onze signaux à étudier ; le seuil d'audibilité de ce son dans chacun des trois bruits de fond, c'est-à-dire le niveau pour lequel le son commence à être perçu dans le bruit de fond, sera alors déterminé.

La deuxième étape est une étape d'égalisation en sonie. Elle consiste tout d'abord à monter le niveau des seuils obtenus à l'étape 1 pour amener le son de référence à un niveau clairement audible dans chacun des trois bruits de fond, sachant que Yamauchi et Menzel ont déterminé, au cours de l'étude sur les sons possibles pour le VE évoquée au chapitre 1 paragraphe II.2., que le niveau d'un son clairement audible dans un bruit de fond donné est entre 10 et 20 dB plus élevé que son niveau juste audible dans le même bruit de fond. Les dix autres signaux restants sont ensuite égalisés en sonie avec ce son de référence clairement audible pour chaque bruit de fond, c'est-à-dire qu'ils sont réglés par rapport au son de référence de façon à présenter la même intensité perçue. Il n'était pas possible d'occulter la première étape pour directement commencer la deuxième. En effet, la notion de claires audibilité varie d'un individu à l'autre, et ne présente pas de définition précise, alors que la notion de seuil d'audibilité n'est pas sujette à controverse.

La troisième et dernière étape est une étape de mesure de temps de réaction. Elle consiste à simuler l'approche d'une source sonore à 20km/h pour chacun des signaux au sein des différents bruits de fond. Des auditeurs doivent alors détecter ces signaux dans les environnements sonores, et leurs temps de réaction sont mesurés. L'expression « temps de réaction » est à prendre ici dans le sens de « temps de première détection du signal ». Cette dernière étape permettra de conclure sur la détectabilité des différents sons, et de déterminer, à l'aide de la matrice temps/fréquence et des caractérisations précédentes, les propriétés sonores susceptibles d'améliorer la détectabilité d'un son dans les différentes ambiances urbaines.

I. Etape 1 : Seuil d'audibilité du son de référence

I.1. Le choix du son de référence

Le son de référence a été choisi parmi les signaux continus du corpus. En effet, les signaux continus sont les plus aisés à évaluer à l'oreille en termes d'intensité perçue, et offrent une référence stable et simple pour l'auditeur. Dans le corpus des onze signaux, seuls trois étaient continus : le bruit blanc, le bourdonnement, et le bruit de moteur. Le choix a été effectué à l'aide des bruits de fond.

Chacun des trois signaux a été placé dans le bruit de fond le plus fort, c'est-à-dire celui de la rue fréquentée, et a été approximativement placé à un niveau de juste audibilité. Puis le bruit de fond a été retiré et les trois signaux ont été comparés. Bien qu'ils soient tous au seuil d'audibilité dans le même bruit de fond, ils ne présentaient pas du tout la même intensité perçue lorsqu'ils étaient écoutés sans ce bruit de fond. Le bruit de moteur et le bourdonnement présentaient un niveau bien plus élevé que le bruit blanc. Choisir le bourdonnement ou le bruit de moteur comme référence risquait d'être problématique pour la suite des étapes. En effet, si l'on montait le bourdonnement ou le bruit de moteur d'une dizaine de dB de façon à ce qu'il soit clairement audible dans le bruit de fond, puis qu'ensuite on ajustait approximativement quelques sons de façon à ce qu'ils aient la même intensité perçue, on observait des saturations, en particulier pour le cliquetis ou la modulation. Ce qui ne s'observait pas avec le bruit blanc, de niveau plus faible. Le bruit blanc continu a donc été retenu comme signal de référence.

I.2. Le seuil d'audibilité

Onze personnes (trois femmes et huit hommes) ont participé à cette étape effectuée en cabine audiométrique. Il leur était demandé d'ajuster le niveau du signal de référence de façon à ce qu'il soit placé au seuil d'audibilité, dans chacun des trois bruits de fond.

Cette expérience a été menée à l'aide de Psiexp³, programme développé pour la constitution et la réalisation d'expériences en psychoacoustique, au langage similaire au langage C. Ce logiciel est interfacé avec Max/MSP, logiciel musical développé par l'IRCAM dans les années 1980 et permettant de réaliser, entre autres, du traitement et de la synthèse sonore en temps réel. Chaque participant disposait d'un curseur (figure 31) dépourvu d'échelle, qu'il pouvait déplacer pour faire varier le niveau du bruit blanc dans le bruit de fond, et le placer au seuil d'audibilité.

³ Smith, B. K. (1995). PsiExp: an environment for psychoacoustic experimentation using the IRCAM musical workstation. In Society for music perception and cognition conference'95. Univ. of Berkeley, CA.



Figure 31 : Interface générée par Psiexp. L'auditeur déplace le curseur jaune de gauche à droite ou de droite à gauche pour ajuster le niveau du bruit blanc, plongé dans le bruit de fond, et le placer au seuil d'audibilité.

La position du curseur correspond à un coefficient linéaire compris entre 0 et 1 appliqué en temps réel au signal. Lorsque le curseur est placé à l'extrême droite, le coefficient est égal à 1, et lorsqu'il est placé à l'extrême gauche, le coefficient est égal à 0.

L'expérience était constituée de deux boucles. Chaque boucle comptait six séquences (figure 32). Trois séquences, appelées séquences montantes, se rapportant aux trois bruits de fond, démarraient avec une position initiale du curseur correspondant à un coefficient linéaire de 0.2, pour lequel le bruit blanc n'était audible dans aucun des bruits de fond. Les trois séquences restantes, appelées séquences descendantes, démarraient avec une position initiale du curseur correspondant à un coefficient linéaire de 0.8, pour lequel le bruit blanc était audible dans tous les bruits de fond.

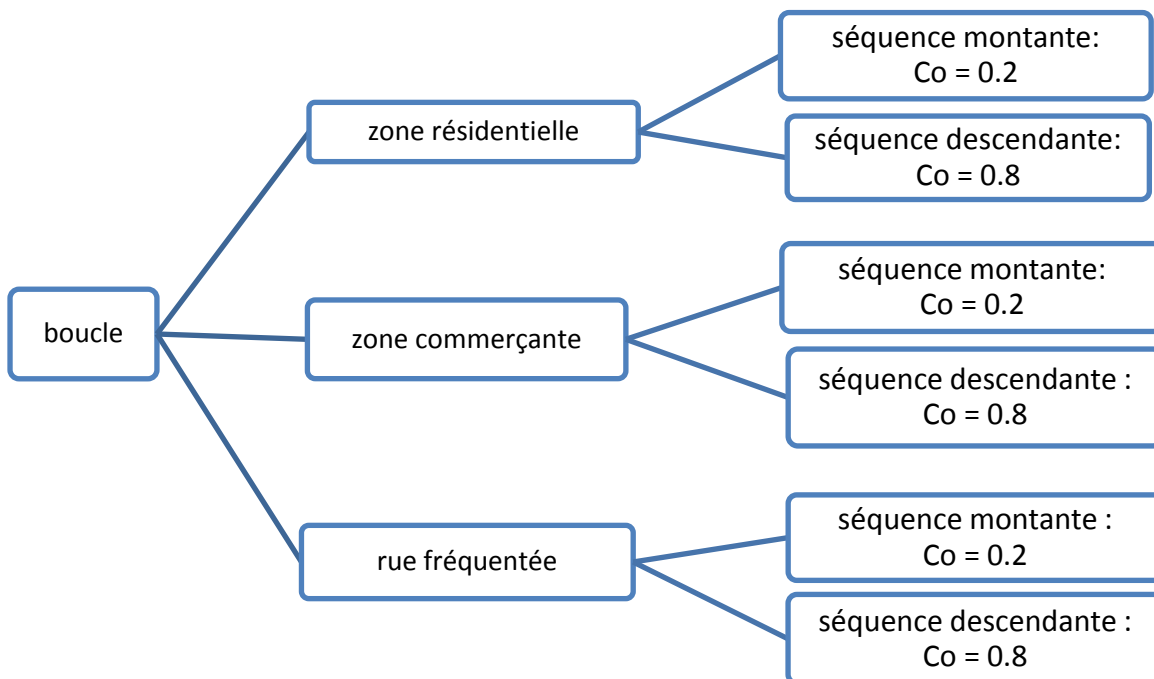


Figure 32: Protocole expérimental. Chaque boucle compte 6 séquences diffusées de façon aléatoire. A chaque bruit de fond correspondent 2 séquences: une séquence montante et une séquence descendante. L'expérience compte deux boucles.

Ainsi, pour chaque sujet, douze résultats étaient obtenus : quatre résultats d'ajustement par bruit de fond. Les résultats ont été moyennés, et sont récapitulés dans le tableau 11 et sur la figure 33.

Bruit de fond	Zone résidentielle	Zone commerçante	Rue fréquentée
Coefficient linéaire	$C1 = 0.22770789$	$C2 = 0.2869801$	$C3 = 0.43316025$
Ecart-type (en linéaire)	$\sigma1 = 0.08597477$	$\sigma2 = 0.10328615$	$\sigma3 = 0.15070738$

Tableau 11 : Récapitulatif des valeurs des coefficients obtenues pour les différents bruits de fond. Les écart-type trouvés en linéaire correspondent à environ 3dB, ce qui est acceptable pour ce type d'expérience.

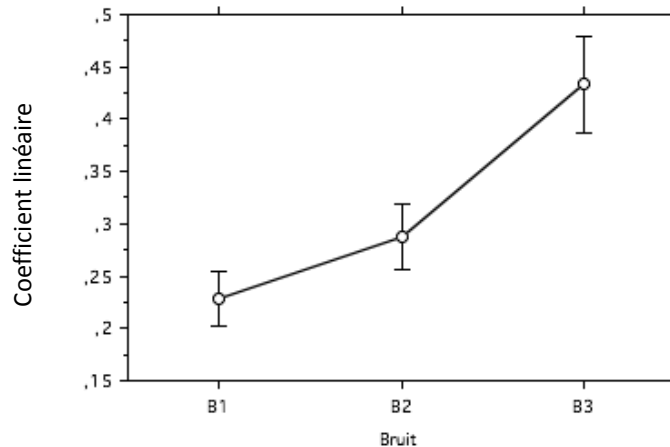


Figure 33: Valeurs des coefficients linéaires moyens obtenus et leurs écart-types respectifs pour les différents bruits de fond. B1: zone résidentielle, B2 : zone commerçante, B3 : rue fréquentée.

On constate que le seuil d'audibilité du signal de référence est plus élevé en zone commerciale qu'en zone résidentielle, bien que le niveau du bruit de fond en zone commerciale soit inférieur à celui en zone résidentielle. Cela est sans doute dû à un effet de masquage en fréquence : le bruit de fond en zone commerçante présente plus de composantes hautes fréquences que les autres bruits de fond, plus concentrés dans les basses fréquences. Le bruit blanc a donc un peu moins la possibilité de se distinguer par ses hautes fréquences. Ainsi la zone commerçante ne correspond pas au seuil d'audibilité le plus faible.

L'amplitude du bruit blanc initial a été multipliée par chacun des trois coefficients moyens obtenus : trois bruits blancs, associés aux seuils d'audibilité pour les trois bruits de fond, ont été ainsi obtenus (figure 34). Le traitement du bruit blanc initial a été effectué sous Matlab comme dans l'exemple ci-dessous pour le bruit blanc juste audible en zone résidentielle :

```

C1 = 0.22770789;
[y, Fe] = wavread('bruitblancreference.wav');
x = C1 * y;
wavwrite(x, Fe, 'bruitblanc_justeaudible_residence.wav');

```

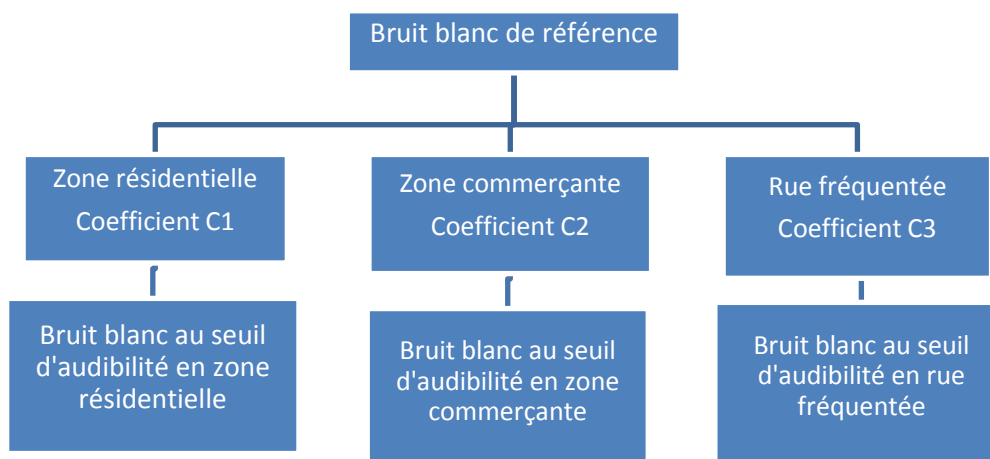


Figure 34 : Organigramme de l'expérience d'audibilité. Les auditeurs règlent le niveau du son de référence pour chaque environnement sonore. Trois coefficients moyens sont obtenus à la fin cette étape.

I.3. Analyse ANOVA et remarques

L'analyse de résultats expérimentaux est faite via un traitement statistique appelé ANOVA, qui consiste en une analyse de variance permettant d'estimer la consistance d'effets observés. L'ANOVA s'emploie lorsque l'on souhaite analyser l'influence d'un ou de plusieurs paramètres sur une variable mesurée.

La variable que l'on mesure est appelée variable dépendante. Il s'agit ici du coefficient linéaire correspondant au seuil d'audibilité. Les paramètres que l'on fait varier, et que donc on teste, sont appelés variables indépendantes. Il s'agit ici du type de bruit de fond, du sens (est-on parti d'un son audible ou inaudible ?), et de la répétition. Les deux dernières variables indépendantes ont seulement été testées à titre informatif. L'ANOVA a été appliquée avant tout pour mettre en évidence l'influence du bruit de fond sur le seuil d'audibilité. Les différentes valeurs que peut prendre une variable indépendante sont appelées les modalités. La variable « bruit de fond » compte 3 modalités : la zone commerçante, la zone résidentielle, la rue fréquentée.

L'ANOVA consiste à tester l'hypothèse nulle H_0 : « La variable indépendante testée n'a pas d'influence significative sur la variable dépendante mesurée ». Elle compare pour cela l'écart intergroupe à l'écart intragroupe pour la variable indépendante considérée (ou l'ensemble de variables indépendantes considérées dans le cas d'une étude d'interaction entre celles-ci). L'explication ci-après considère la variable indépendante « bruit de fond ».

- L'écart intergroupe correspond à l'écart relatif aux différences entre les moyennes C1, C2 et C3 obtenues. Le nombre de degré de libertés associé à la variabilité intergroupe est noté $df_{inter} = k - 1$, où k est le nombre de modalités de la variable indépendante testée. Ici, pour la variable « bruit de fond », $df_{inter} = 3 - 1 = 2$.
- L'écart intragroupe est causé par la répétition des évaluations pour chaque type de bruit de fond. Il correspond à l'erreur expérimentale. Le nombre de degré de libertés

associé à la variabilité intragroupe est noté $df_{intra} = (k - 1) \times (n - 1)$, où n est le nombre de sujets. Ici, $df_{intra} = (3 - 1) \times (11 - 1) = 20$.

L'ANOVA calcule alors le rapport $F_{obs} = \frac{\text{écart intergroupe}}{\text{écart intragroupe}}$ et le compare à la valeur critique $F_{\alpha}(df_{inter}, df_{intra})$ donnée par les tables de Fisher pour le seuil de significativité α . On choisit usuellement $\alpha = 0.05$.

- Si $F_{obs} < F_{\alpha}(df_{inter}, df_{intra})$ alors cela signifie que la probabilité p d'observer $F_{obs} > F_{\alpha}(df_{inter}, df_{intra})$ est inférieure au seuil de significativité α . On peut rejeter H_0 avec un niveau de confiance égal à $1 - \alpha$.
- Si $F_{obs} > F_{\alpha}(df_{inter}, df_{intra})$ alors cela signifie que $p > \alpha$. On ne peut pas rejeter H_0 mais on ne peut pas affirmer pour autant qu'elle est vraie.

L'ANOVA peut être effectuée sous Matlab ou à l'aide de logiciels de statistique tels que Statview. Les résultats sont présentés dans le tableau 12 :

Variable	Degré de liberté df	F	p
Bruit de fond	2	29.9	0.001
Répétition	1	1.255	0.2887
Sens	1	0.079	0.7844

Tableau 12: synthèse d'ANOVA effectuée suite à l'expérience de seuil d'audibilité.

L'analyse révèle un effet très significatif du facteur « bruit de fond ». En effet on obtient $F = 29.9 > F_{\alpha}(2, 20) = 3.493$, $p < 0.05$. On peut rejeter l'hypothèse H_0 « Il n'y a pas de différence significative entre les trois bruits de fond » avec un niveau de confiance de 95%.

Il n'y a d'effet significatif de la répétition ou du sens de variation. ($p > 0.05$)

Enfin, les seuils d'audibilité ont pu être légèrement sous-estimés du fait d'un biais d'expérience. En effet, chaque séquence était constituée d'un bruit de fond d'une durée de cinq secondes, mixé avec un bruit blanc d'une durée de trois secondes. Le bruit blanc n'a pas été rampé, ce qui rendait son attaque très audible. L'oreille étant très sensible à l'attaque d'un son, cette absence de rampe au début du son a pu légèrement biaiser l'évaluation du seuil : les auditeurs, en détectant l'attaque, ont pu alors estimer que le son était toujours audible, et ont donc un peu plus diminué le niveau du signal jusqu'à ne plus détecter son attaque, sous-estimant légèrement son seuil d'audibilité.

II. Etape 2 : Egalisation en sonie

II.1. D'un signal juste audible à un signal clairement audible

Le choix du coefficient d'amplification à appliquer aux seuils d'audibilité obtenus s'est fait à l'écoute du son de référence dans les différents bruits de fond. Yamauchi et Menzel [21] ont affirmé que le niveau d'un son clairement audible dans un bruit de fond donné est entre 10 et 20 dB plus élevé que le niveau juste audible de ce même son dans ce même bruit de fond. 20 dB ont été ajoutés aux trois seuils trouvés pour assurer une bonne audibilité du son de référence dans les trois bruits de fond (figure 35). Les dix autres sons restants ont pu alors être égalisés en sonie avec les bruits blancs clairement audibles dans les trois bruits de fond.

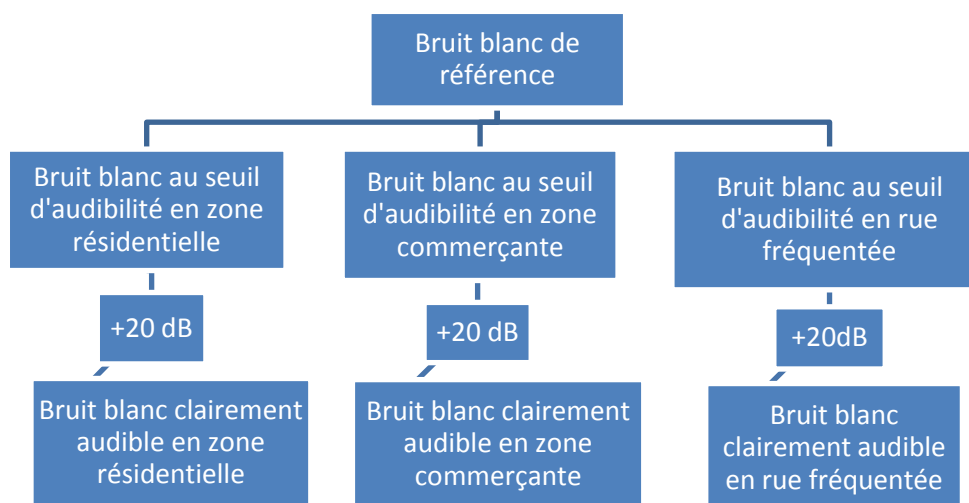


Figure 35 : Schéma du processus de passage à un son de référence juste audible dans les différents environnements à un son clairement audible dans ces mêmes environnements.

L'ajout des 20 dB a été effectué sous Matlab.

II.2. L'égalisation en sonie

II.2.a. La sonie

La sonie (ou loudness), est la grandeur de sensation reliée à la perception des intensités. Elle se réfère donc à l'évaluation et à la description subjective de l'intensité perçue par un auditeur. Le terme « subjective » est employé ici dans le sens où l'auditeur est un sujet humain ; il n'y a pas de réponse exacte ou universelle.

La sonie, intensité subjective, diffère de l'intensité objective. On considère que l'oreille humaine n'est sensible qu'à des sons dont la fréquence est comprise dans l'intervalle [20 Hz ; 20 000 Hz]. Une région de sensibilité maximum, associée à la résonance du canal

auditif, se situe autour de 3 500 Hz (domaine de la parole). Cette sensibilité diminue lentement vers les fréquences graves, et rapidement vers les fréquences aiguës. Ainsi, à intensités physiques égales, un son présentant des composantes fréquentielles concentrées dans les basses fréquences pourra paraître moins fort qu'un son aux composantes plus élevées en fréquences.

Il n'existe pas à ce jour de modèle scientifique validé pour calculer la sonie globale de n'importe quel type de son. En tant que grandeur subjective, elle est mesurée par des méthodes psychoacoustique, c'est-à-dire par expérimentation directe, comme effectué dans cette étape.

II.2.b. L'expérience d'égalisation

Dix personnes (quatre femmes et six hommes, moyenne d'âge 28 ans) ont participé à l'égalisation en sonie, réalisée en cabine audiométrique. Cette expérience permet d'ajuster à la même intensité perçue l'ensemble des onze sons du corpus pour chacun des bruits de fond. Les dix sons restants du corpus devaient être égalisés en sonie avec chacun des trois bruits blancs clairement audibles, comme indiqué sur la figure 36. Cette égalisation en sonie est effectuée en absence des bruits de fond.

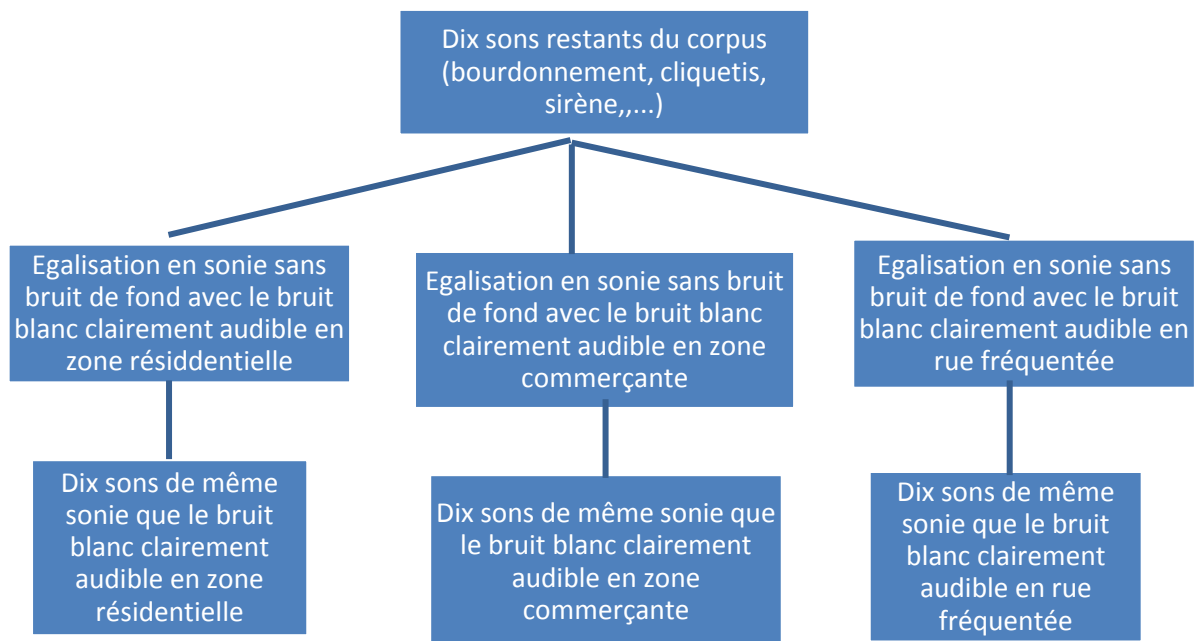


Figure 36 : Schéma d'expérience pour l'égalisation en sonie

Cette expérience a également été menée à l'aide de Psiexp et Max/MSP. Une consigne écrite, figurant en annexe 1, a d'abord été présentée à chacun des participants pour leur expliquer la tâche à effectuer. Trente paires de sons étaient présentées successivement au cours de l'expérience. Le premier son d'une paire était l'un des trois bruits blancs clairement audibles. Le second son, appartenant aux 10 sons restants du corpus, était le son à ajuster en sonie. Les paires étaient présentées de façon aléatoire, sans bouclage. Comme pour l'expérience d'audibilité, chaque participant disposait d'un curseur dépourvu

d'échelle, qu'il pouvait déplacer pour faire varier le niveau du second son de façon à ce qu'il ait la même intensité perçue que le premier. Chaque paire pouvait être rejouée autant de fois que désiré, jusqu'à ce que l'auditeur valide sa réponse. Une fois celle-ci validée, la paire suivante était jouée. Tout comme à l'étape 1, la position du curseur correspondait à un coefficient linéaire à appliquer au signal. L'ensemble des résultats a été moyenné pour chacun des dix signaux, puis un traitement sous Matlab similaire à l'exemple du paragraphe I.2. a été appliqué pour obtenir les signaux égalisés en sonie.

III. Etape 3 : La mesure du temps de réaction

III.1. L'approche d'une source

Pour simuler l'approche d'une source, l'allure de l'évolution du niveau d'un véhicule en fonction de sa position par rapport à une origine fixée, fournie par Kerber et Fastl, a été utilisée [22]. La figure 37 montre l'allure de cette évolution pour un véhicule de niveau 79 dB en 0.

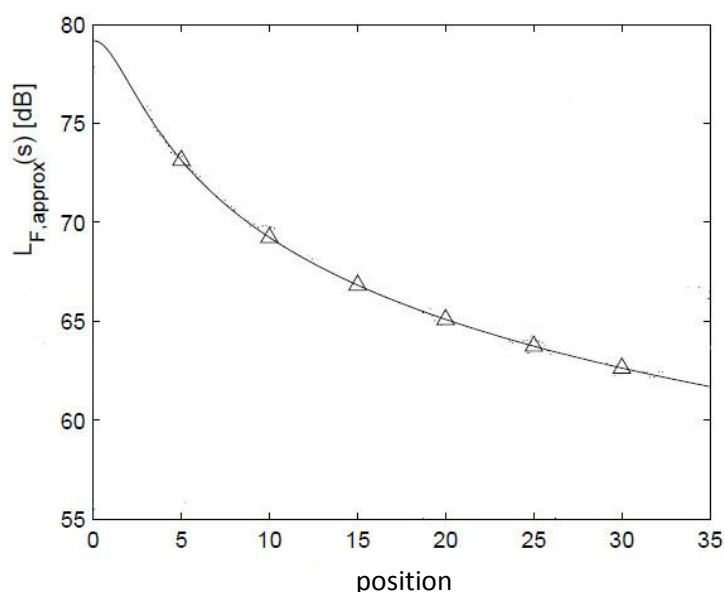


Figure 37 : Allure de l'évolution du niveau en dB d'un véhicule en fonction de sa position (en mètres) par rapport à une origine située en 0.

Cette approximation a été utilisée pour la suite, pour un véhicule approchant à 20km/h. A cette vitesse, l'effet doppler a été négligé. En effet, pour un récepteur immobile, la fréquence de réception s'exprime en fonction de la fréquence d'émission de la source approchant à la vitesse v , et de la vitesse c de propagation des ondes sonores :

$$f_{rec} = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \cdot f_{em} \quad (6)$$

Pour $v = 20$ km/h et $c = 341$ m/s, on obtient $f_{rec} = 1.016 f_{em}$. On peut convertir ce résultat en cents pour se donner une idée de l'importance de cet effet. Le cent est l'unité de mesure fine des intervalles musicaux. L'octave comprend 12 demi-tons, et un demi-ton est

égal à 100 cents. Un cent vaut donc $1/1200^e$ d'octave. Pour déterminer la valeur en cents de l'intervalle entre deux sons de fréquences f_1 et f_2 , on utilise la formule (7):

$$\Delta c = 1200 \log_2 \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \quad (7)$$

Ici, pour $f_1 = f_{rec}$ et $f_2 = f_{em}$ on obtient $\Delta c = 27,5$ cents. Cet écart, équivalent à $1/8$ de ton, peut donc être négligé.

III.2. Les signaux dans les environnements sonores

III .2.a. Effet de masquage

Le profil de Kerber décrit dans le paragraphe précédent a été appliqué à chacun des sons obtenus à l'étape 2. Ce profil a été appliqué de façon symétrique de façon à simuler l'approche puis l'éloignement de la source. La source parcourt ainsi 70m, répartis en 35m d'approche et 35m d'éloignement.

Cependant il a été constaté que quatre sons demeuraient quasiment inaudibles dans tous les bruits de fond : il s'agissait de la modulation, du bourdonnement, du bourdonnement modulé et du bruit de moteur. Ces quatre signaux ont des composantes fréquentielles basses fréquences uniquement. Les bruits de fond présentant beaucoup d'énergie en basse fréquence, un effet de masquage se produit : les signaux n'émergent pas tant qu'ils n'ont pas un niveau suffisamment élevé. Il était alors nécessaire de monter les niveaux. Deux solutions étaient possibles :

- Repartir de l'étape 1. Les seuils d'audibilité du bruit blanc sont plus bas que ceux des deux autres sons continus (le bourdonnement et le moteur) comme expliqué à l'étape 1. Le choix d'un autre son de référence, moins audible dans les bruits de fond, permettrait d'obtenir des seuils plus élevés. Les 20 dB ajoutés aux nouveaux seuils seraient alors dans ce cas suffisants pour que tous les sons soient audibles dans les bruits de fond suite à l'égalisation en sonie. Mais il n'était pas envisageable de choisir un nouveau son de référence et de recommencer l'étape 1, car les signaux continus restants ne convenaient pas. Ils engendrent la saturation de certains des autres signaux à l'étape 2. Choisir un son modulé ou un train d'impulsion n'était pas non plus un bon choix, car ils sont des références moins aisées pour l'oreille.
- Augmenter les niveaux obtenus en étape 2, sans forcément repasser par une égalisation en sonie. En effet, les signaux ont déjà été égalisés une première fois en sonie. Il est alors possible de monter les niveaux de tous les signaux tout en conservant l'égalité en sonie.

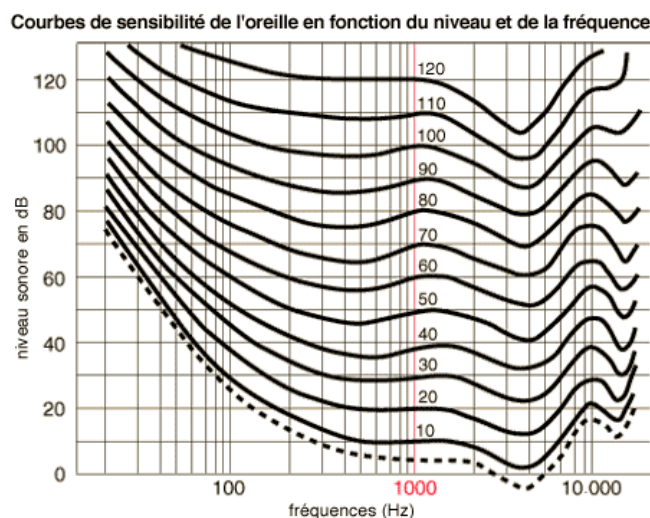


Figure 38 : Courbes d'isophonie de l'oreille humaine. Ce sont les courbes qui établissent une sensation de sonie égale en rapport avec la fréquence. Les nombres indiqués sur les courbes sont des références à 1000 Hz. Par exemple, des sons appartenant à la courbe 50 auraient une sonie identique à celle d'un son de 1000Hz à 50dB.

En effet, les signaux présentent des composantes fréquentielles comprises entre 100 et 5000 Hz (excepté pour le bruit blanc pour lequel le spectre est plus large. Etant donné que le niveau du bruit de fond le plus faible est de 56,1 dB(A) et celui du plus fort est 71.4 dB(A), on peut alors raisonnablement considérer pour les courbes d'isophonie (figure 38) situées au-delà de 50 dB et en-dessous de 100 dB pour poursuivre notre raisonnement. Pour chaque bruit de fond, les signaux égalisés sont tous placés sur une même courbe de sonie. On constate qu'entre 100 et 5000 Hz, les courbes au-delà de la courbe d'isophonie 50dB et en-dessous de la courbe 100dB sont quasiment parallèles ; il est donc aisé de passer d'une courbe à l'autre sans nécessairement passer à nouveau par une égalisation en sonie. Par exemple, ajouter 10 dB à la courbe d'isophonie 70 dB entre 100 et 5000 Hz offre une courbe très proche de la courbe d'isophonie 80 dB.

La deuxième solution a donc été retenue pour remédier à l'inaudibilité des quatre signaux problématiques. Les sons augmentés ont été réécoutés pour vérifier si l'égalité en sonie était bien conservée. Il fallait veiller cependant à ne pas trop monter le niveau des sons : les quatre signaux inaudibles devenaient clairement audibles, mais beaucoup de signaux devenaient trop audibles si le nombre de dB ajoutés devenait trop élevé. Ils devenaient détectables dès le départ de la source, c'est-à-dire dès 35m par rapport à l'origine, ce qui n'est pas acceptable pour mener une expérience de détectabilité par la suite. La comparaison des temps de réaction pour ces différents signaux ne serait pas valable.

III.2.b. Un compromis

Il a finalement été choisi de dissymétriser le profil de Kerber appliqué aux signaux : la source partirait de plus loin, ce qui allongerait la phase d'approche à 20 km/h, et la phase d'éloignement serait raccourcie. Faire partir la source de plus loin permettrait d'augmenter le niveau sonore de l'ensemble des signaux sans être trop vite confronté au problème des signaux trop audibles dès le départ de la source. La phase d'éloignement n'a pas besoin d'être aussi longue que la phase d'approche, car si le son n'est pas détecté quand la source s'approche et passe par l'origine, alors il ne sera pas détecté quand la source

s'éloigne. Cependant il est nécessaire de conserver un peu de temps après le passage de l'origine, car si, lors de l'expérience de détection, l'auditeur ne perçoit le son que lorsqu'il est au maximum (c'est-à-dire à l'origine), il a besoin d'un peu de temps ensuite pour pouvoir le signaler.

Les signaux ayant tous une durée de 14 secondes (ce qui correspond à une distance de 77,8m pour une source à 20 km/h), il a été choisi de répartir la distance parcourue en 70m de phase d'approche et le reste en éloignement. L'approximation d'une source ponctuelle en champ libre a été appliquée entre 70 et 35m comme indiqué sur la figure 39 ci-dessous : l'intensité acoustique décroît en $1/r^2$, où r est la distance par rapport à la source.

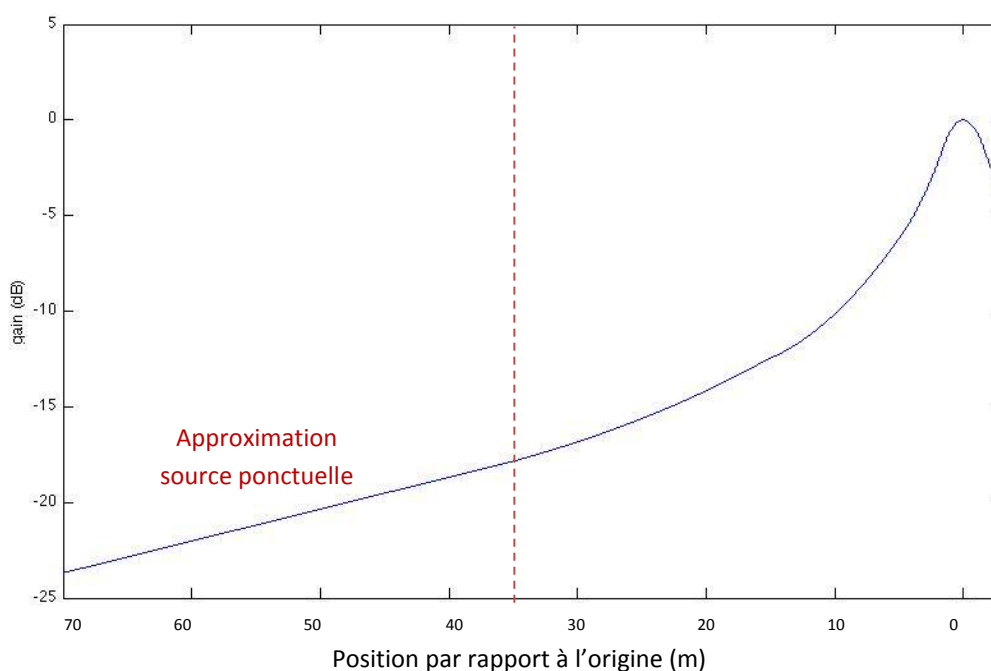


Figure 39: Profil du gain appliqué aux différents signaux pour simuler l'approche d'une source. Entre 70 et 35m, l'approximation d'une source ponctuelle a été appliquée.

Enfin, le coefficient d'amplification additionnel appliqué pour augmenter le niveau sonore de l'ensemble des signaux dépend du bruit de fond. La zone commerçante demandait seulement 3dB d'augmentation quand la zone résidentielle en demandait 7 et la rue fréquentée 14. Ces valeurs ont été choisies de façon à réaliser au mieux le compromis, et de perdre le minimum de signaux dans le corpus. Un signal n'a pas été conservé : le bruit de moteur. Il demandait pour être audible une augmentation des niveaux trop importante, rendant beaucoup de sons trop audibles, malgré le choix de faire partir la source de plus loin. De ce fait, le bruit de moteur n'a pas été gardé pour la suite de l'analyse. Pour ces nombres de dB à ajouter choisis, le bourdonnement, le bourdonnement modulé et la modulation jusqu'alors inaudibles étaient devenus audibles, voire juste audibles au moment de leur maximum de niveaux, et les signaux les plus facilement détectables n'étaient pas devenus trop audibles. Le compromis était donc satisfaisant.

Une première conclusion peut alors déjà être effectuée : le bruit de moteur, à sonie égale, est moins audible que l'ensemble des autres signaux dans les différents bruits de fond. Pour devenir audible, il nécessite une augmentation plus importante de son niveau que les autres signaux, ce qui n'est pas un bon résultat pour un signal à ajouter au véhicule

électrique : on souhaiterait pouvoir conserver son caractère « moins bruyant », par un choix de signature sonore facilement détectable à des niveaux moins élevés que celui d'un véhicule à moteur thermique. Ainsi, seuls 10 signaux ont été conservés à l'issue de ce compromis, sans pour autant trop déséquilibrer l'homogénéité de la répartition des sons dans l'espace temps/fréquence (figure 40).

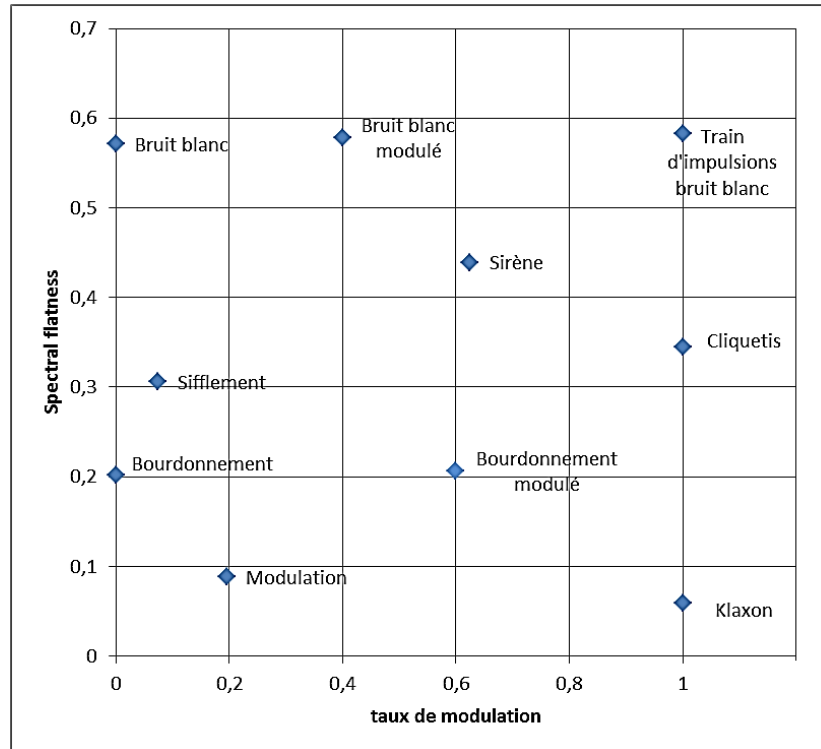


Figure 40: Le bruit de moteur n'a pas été conservé. L'homogénéité de la répartition des signaux dans l'espace temps/fréquence n'a pas été pour autant dégradée.

Les signaux restants ont été intégrés dans les bruits de fond : 30 séquences de 15 secondes ont ainsi été créées de la façon suivante (figure 41) :

- 1s de bruit de fond sans signal
- 14s du signal, auquel le profil de Kerber a été appliqué, intégré au bruit de fond

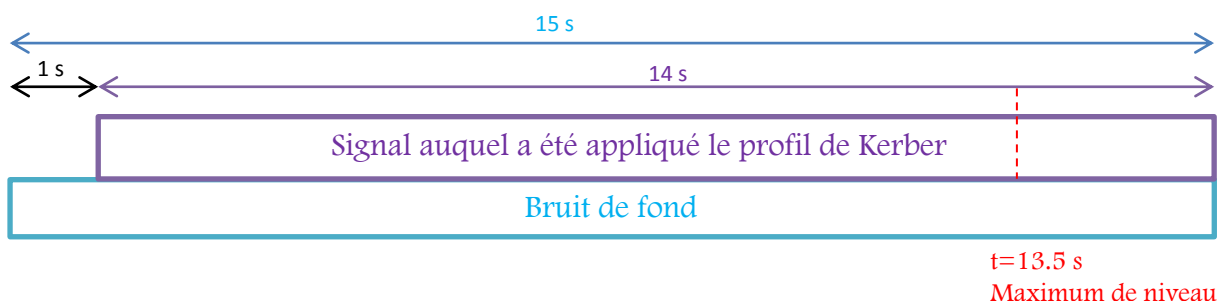


Figure 41: Schéma de construction des séquences

Le maximum de niveau du signal intégré se place à 13,5 secondes pour toutes les séquences.

III.3. L'expérience de mesure de temps de réaction

Six personnes (quatre hommes et deux femmes, moyenne d'âge 29 ans) ont participé à cette expérience en cabine audiométrique. Les sons ont été présentés à l'aide du logiciel de présentation de stimuli Superlab 4.0, édition pro⁴, utilisé pour la première fois à l'IRCAM.

Les participants ont tous réalisé quatre passages séparés, chacun durant une heure. Chaque passage se décomposait en 5 boucles ; chaque boucle diffusait les trente séquences de façon aléatoire. Pour chaque séquence, l'auditeur devait appuyer sur la touche espace du clavier dès qu'il détectait le signal au sein du bruit de fond. Les participants disposaient d'une consigne écrite, présentée en annexe 2, et pouvaient se familiariser avec le principe de l'expérience grâce à un tutoriel au début du premier passage. Ils pouvaient demander à avoir à nouveau le tutoriel aux passages suivants s'ils en éprouvaient le besoin. En fin de dernier passage, un questionnaire leur était posé au sujet de l'expérience et des différents signaux.

Le faible nombre de participants s'explique par le fait que les sons présentent des différences de temps de détection de l'ordre de la seconde. Les signaux ne demandent donc pas un grand nombre d'auditeurs pour pouvoir obtenir des résultats discriminants et fiables. D'autre part, pour chaque signal dans un bruit de fond donné, 120 résultats ont été obtenus, ce qui est suffisant pour procéder à une analyse.

⁴ Copyright 1990-2008 Cedrus Corporation

Chapitre 3 : Résultats

I. Présentation des effets et résultats d'enquête

L'expérience de mesure de temps de réaction a permis une discrimination des différents signaux en termes de détection, mais a également mis en évidence un effet d'apprentissage : au fur et à mesure des passages, les auditeurs se familiarisent avec les signaux, les reconnaissant et les détectant de plus en plus tôt. La significativité des différences de temps de détection des sons ainsi que celle de l'apprentissage ont été mises en évidence à l'aide d'une ANOVA, présentée ci-dessous en figure 42. Parmi les temps de réaction enregistrés, des valeurs nulles ont été répertoriées : il s'agit de non-détections ou d'oublis. Les valeurs nulles ne permettent pas une analyse ANOVA valable ; elles ont été remplacées par la valeur moyenne, sur l'ensemble des candidats, du temps de réaction pour le son considéré dans le bruit de fond et au passage concernés.

Analysis of Variance					
Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
son	2.00854e+10	9	2.23171e+09	370.31	0
bdf	5.34477e+08	2	2.67238e+08	44.34	0
repetition	1.45846e+09	3	4.86155e+08	80.67	0
son*bdf	2.58987e+09	18	1.43882e+08	23.87	0
son*repetition	3.68858e+08	27	1.36614e+07	2.27	0.0002
bdf*repetition	1.36812e+07	6	2.28019e+06	0.38	0.8932
son*bdf*repetition	2.56408e+08	54	4.7483e+06	0.79	0.8686
Error	2.09728e+10	3480	6.02665e+06		
Total	4.62799e+10	3599			

Constrained (Type III) sums of squares.

Figure 42: Résultats de l'ANOVA menée sur la totalité des temps de réaction obtenus. Le type de son, le type de bruit de fond et la répétition présentent un effet significatif. Des interactions présentent également un effet significatif.

On observe à travers cette analyse une influence significative du type de son, du type de bruit de fond ainsi que de la répétition ($p \ll 0.05$). L'ANOVA révèle également une influence significative des interactions {son ; bruit de fond} et {son ; répétition}. Une comparaison multiple a été employée pour définir à partir de quel passage des auditeurs l'effet d'apprentissage devient significatif. Enfin, le questionnaire posé aux participants a permis de compléter l'étude de Wogalter de 2001 et celle de Nyeste et Wogalter de 2008.

I.1. Le type de son

A sonie égale, les signaux montrent des temps moyens de détection bien différents, pour chaque bruit de fond, comme le montrent les figures 43, 44 et 45.

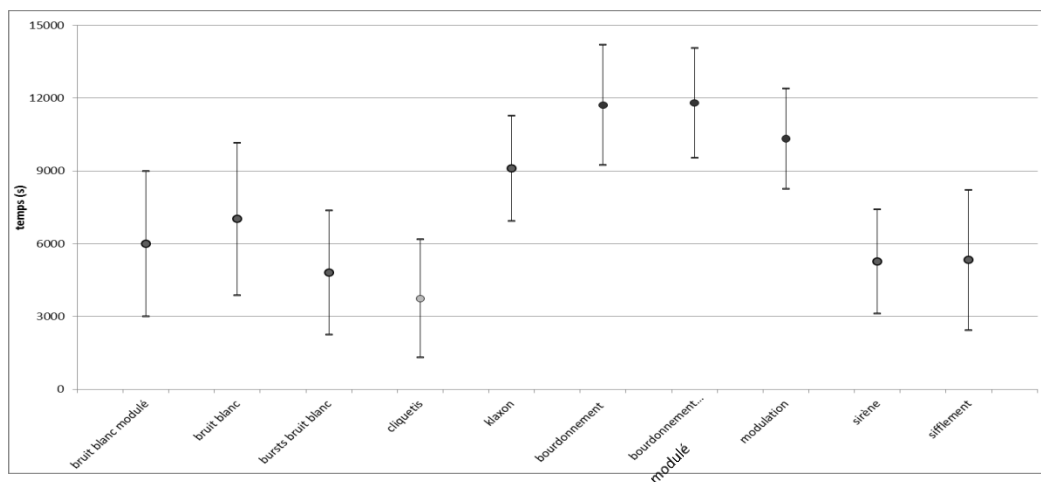


Figure 43: Temps moyens de réaction et écart-types correspondant des différents signaux en zone résidentielle

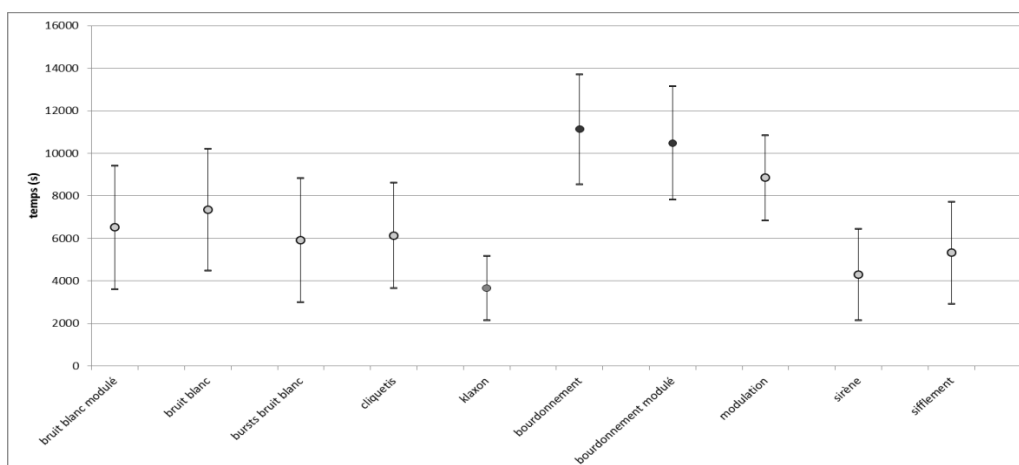


Figure 44: Temps moyens de réaction et écart-types correspondant des différents signaux en zone commerciale

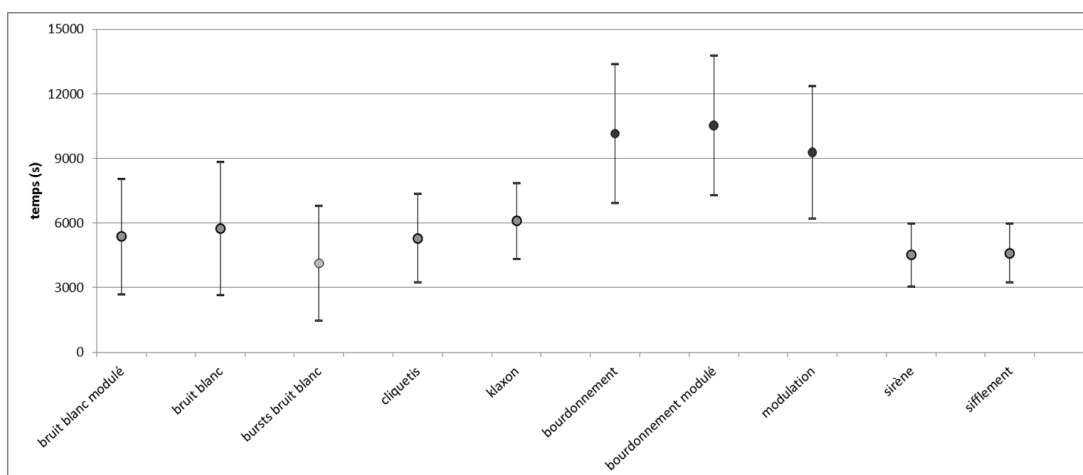


Figure 45 : Temps moyens de réaction et écart-types correspondant des différents signaux en rue fréquentée

Comme le montre l'ANOVA réalisée, le type de son a une influence très significative sur le temps de réaction des auditeurs. Ces résultats confirment ceux obtenus par Menzel lors de son étude de trois signaux dans quatre bruits de fond différents, évoquée au paragraphe III.1. du chapitre 2. Menzel avait en effet constaté que le type de son avait une influence sur sa détectabilité et son audibilité.

L'analyse statistique des résultats obtenus a permis de montrer que cette influence est significative pour chacun des bruits de fond, mais également tous bruits de fond confondus. Une discussion sera menée par la suite pour déterminer, en termes de détectabilité et de distance d'arrêt, quels signaux conviennent, et si un même signal peut convenir dans tous les bruits de fond, ou si un signal spécifique à chaque type de bruit de fond serait préférable pour garantir la sécurité des piétons et cyclistes.

I.2. Le bruit de fond

Si le type de son présente une influence significative, le type de bruit de fond aussi ($p < 0.05$). En effet on observe des différences de classement des signaux égalisés en sonie d'un bruit de fond à l'autre. Par exemple, le klaxon est le signal détecté en moyenne le plus tôt dans la zone commerçante, alors qu'il n'est que septième en zone résidentielle et en rue fréquentée. Ici encore, les observations de Menzel sont confirmées. En effet, Menzel a observé lors de son étude au Japon que le type de bruit de fond influence fortement la détectabilité et l'audibilité de certains signaux, autant en termes de niveaux qu'en termes d'effet de masquage. Cela correspond à l'interaction significative {son ; bruit de fond} : l'effet d'un son dépend du bruit de fond.

L'influence significative du bruit de fond en termes de niveaux a été mise en évidence lors de l'expérience d'audibilité évoquée au chapitre 2. L'expérience de temps de réaction réalisée ici met en évidence l'influence du bruit de fond en termes de masquage : les signaux sont égalisés en sonie avec un signal de référence clairement audible, et pourtant ils ne sont pas détectés au même moment et les classements varient d'un bruit de fond à l'autre. Ce résultat sera discuté par la suite, car il permettra d'apporter des réponses à la question de la signature sonore unique ou multiple du véhicule électrique.

I.3. Un effet d'apprentissage

L'effet d'apprentissage a dans un premier temps été mis en évidence par l'évolution des réponses manquantes pour la détection du bourdonnement et du bourdonnement modulé. En effet, ces deux signaux étaient difficiles à reconnaître et à entendre dès le premier passage des participants, car ils étaient peu audibles pour une oreille non exercée. Mais il a été observé que le nombre de non-détection diminuait rapidement avec les passages comme présenté dans les figures 46, 47, 48 et 49.

Il est fort probable que certaines des non-détections soient dues à des oublis de certains des sujets. En effet, dans le cas du bourdonnement, une non-détection est apparue lors de la cinquième boucle du deuxième passage d'un sujet, alors que celui-ci avait su détecter le signal dès le premier passage. Une autre non-détection est apparue lors de la deuxième boucle du troisième passage, alors que le sujet avait lui aussi su détecter le signal

dès le premier passage. On peut alors parler d'oublis : le signal étant faible, il est aisé de ne pas le détecter dès que la concentration diminue.

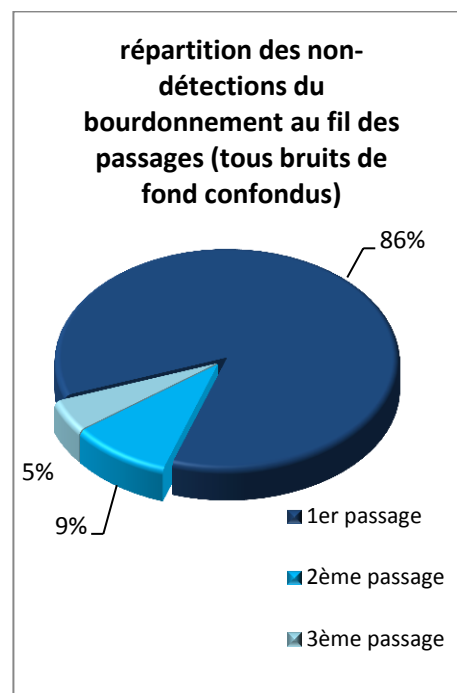
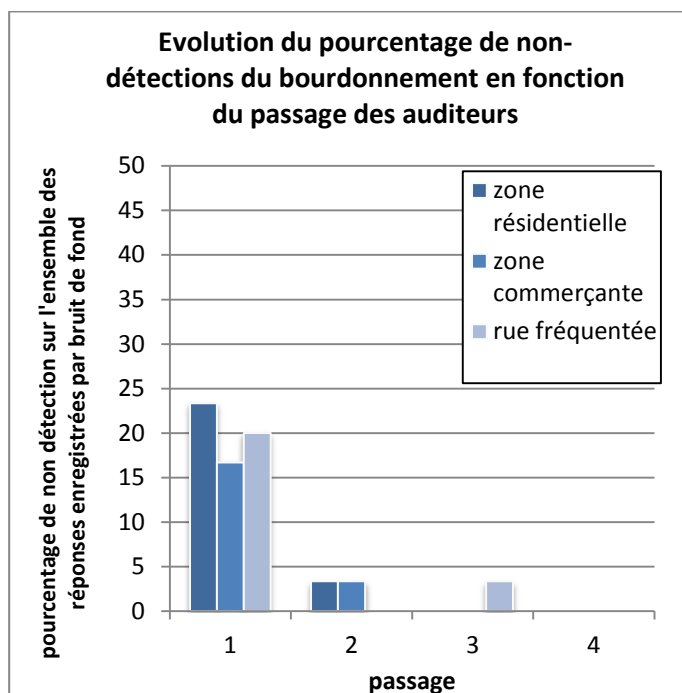


Figure 46: (à gauche) Evolution au fil des passages du pourcentage de non-détections du bourdonnement sur l'ensemble des réponses enregistrées pour ce signal par bruit de fond

Figure 47: (à droite) Répartition en % des non détections au fil des passages, tous bruits de fond confondus. On constate que la majorité des non-détections est concentrée sur le premier passage.

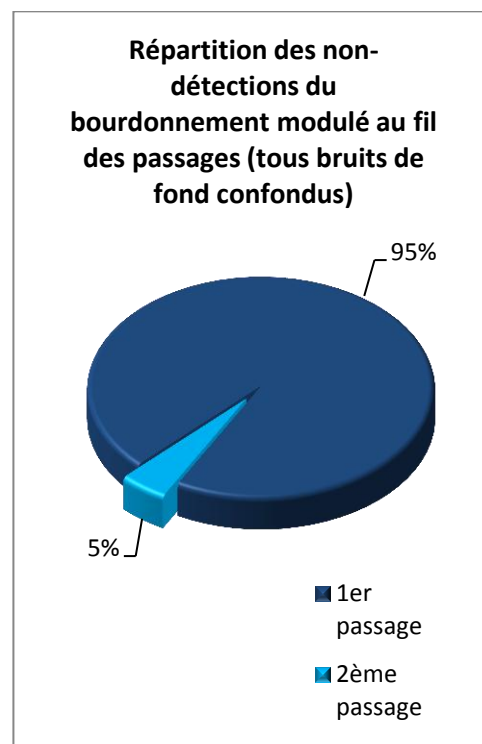
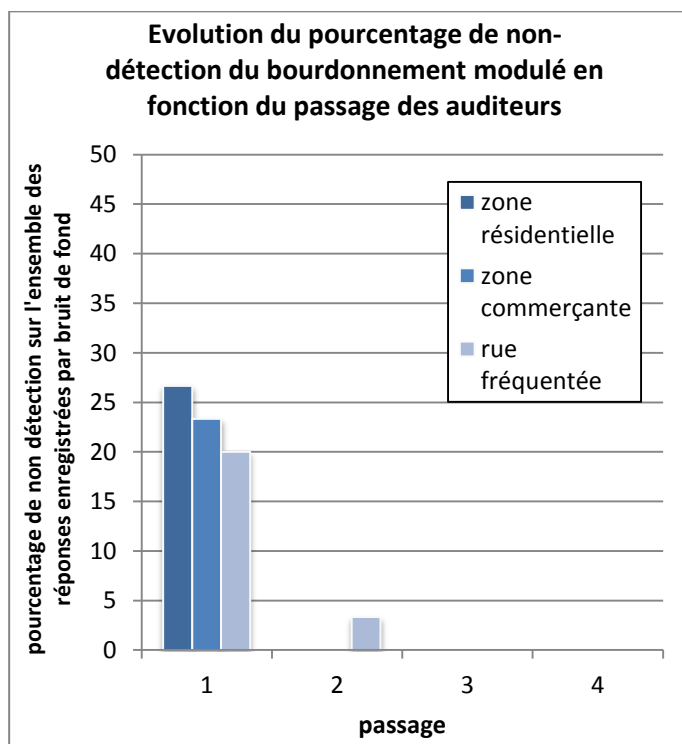


Figure 48: (à gauche) Evolution au fil des passages du pourcentage de non-détections du bourdonnement modulé sur l'ensemble des réponses enregistrées pour ce signal par bruit de fond

Figure 49: (à droite) Répartition en % des non détections au fil des passages, tous bruits de fond confondus. On constate que la majorité des non-détections est concentrée sur le premier passage.

L'apprentissage a un effet significatif ($p < 0.05$), et a été révélé par la diminution puis la disparition des non-détections au fil des passages. Mais il est également mis en évidence par la dérive des moyennes des temps de réaction au fil des passages des auditeurs pour chaque signal dans chaque bruit de fond, présentée en figure 50, 51 et 52.

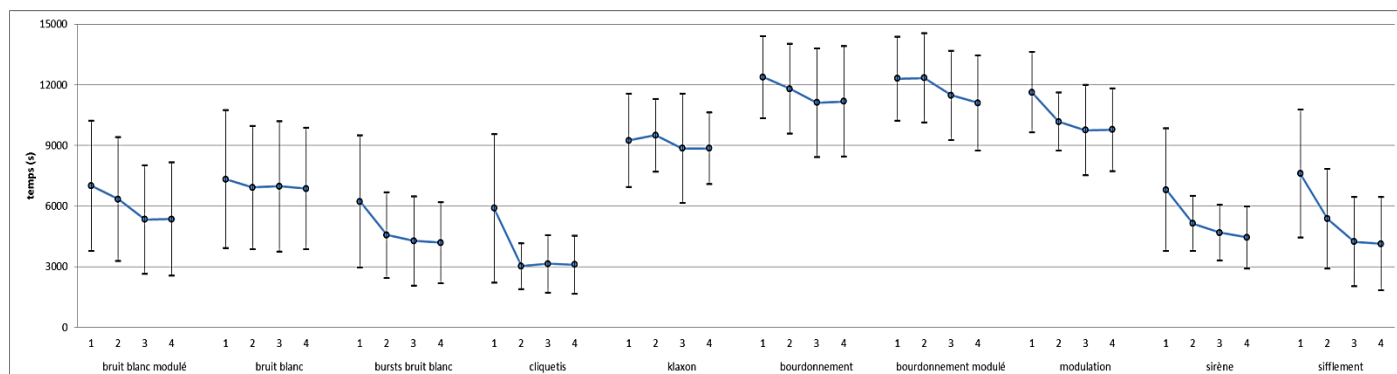


Figure 50: Evolution des moyennes des temps de réaction (et de leurs écart-types respectifs) au fil des passages des auditeurs pour chaque signal en zone résidentielle.

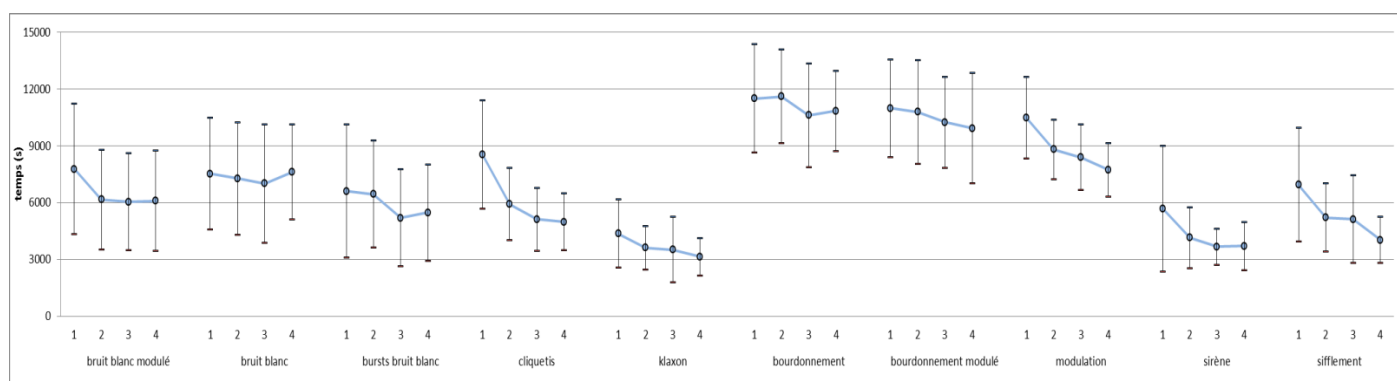


Figure 51: Evolution des moyennes des temps de réaction (et de leurs écart-types respectifs) au fil des passages des auditeurs pour chaque signal en zone commerçante

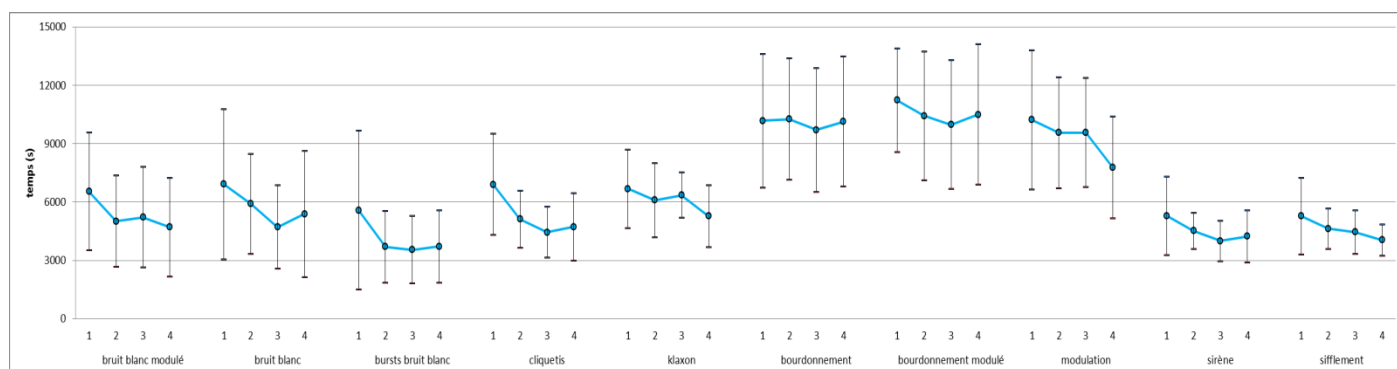


Figure 52: Evolution des moyennes des temps de réaction (et de leurs écart-types respectifs) au fil des passages des auditeurs pour chaque signal en rue fréquentée

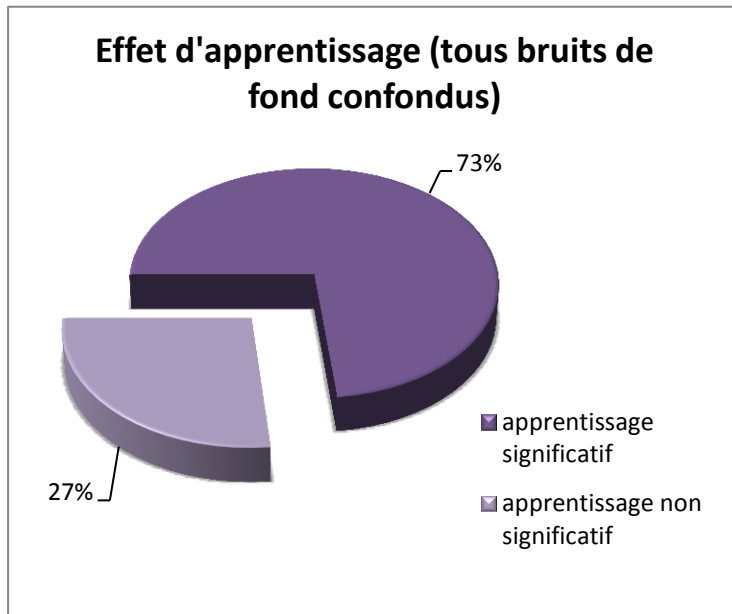


Figure 53 : Diagramme de répartition de la significativité de l'effet d'apprentissage, tous bruits de fond confondus. On constate que l'effet est significatif dans la majorité des cas.

On observe dans la majorité des cas une baisse de la moyenne de temps de réaction au fil des passages : les auditeurs se familiarisent avec les signaux qu'ils doivent détecter, et sont alors en mesure de les détecter de plus en plus tôt. Une analyse ANOVA a été effectuée pour chaque cas, c'est-à-dire pour chaque signal dans chaque bruit de fond. Comme le montre la figure 53, l'apprentissage s'avère significatif dans environ $\frac{3}{4}$ des cas. Chaque bruit de fond présente un diagramme similaire à celui de la figure 54 : l'apprentissage significatif représente environ $\frac{3}{4}$ des cas.

Chaque signal présente un effet d'apprentissage significatif dans au moins un des bruits de fond. Des signaux tels que le cliquetis, le sifflement, la modulation présentent un apprentissage significatif dans tous les bruits de fond, alors que des signaux tels que le bruit blanc et le bruit blanc modulé ne présentent un apprentissage significatif que dans un seul bruit de fond, et cet effet est léger : on a bien $p < 0.05$, mais $p = 0.0426$ pour le bruit blanc et $p = 0.0413$ pour le bruit blanc modulé, ce qui reste proche du seuil de significativité.

Si l'effet est significatif, quand apparaît-il ? Apparaît-il dès le deuxième passage des auditeurs, ou nécessite-t-il plus de temps ? L'analyse ANOVA compare les moyennes, donne des résultats de significativité, mais permet également de savoir quelles moyennes sont significativement différentes, comme illustré sur les figures 54, 55 et 56 : il est alors possible de déterminer à quel moment l'effet d'apprentissage significatif apparaît dans notre expérience.

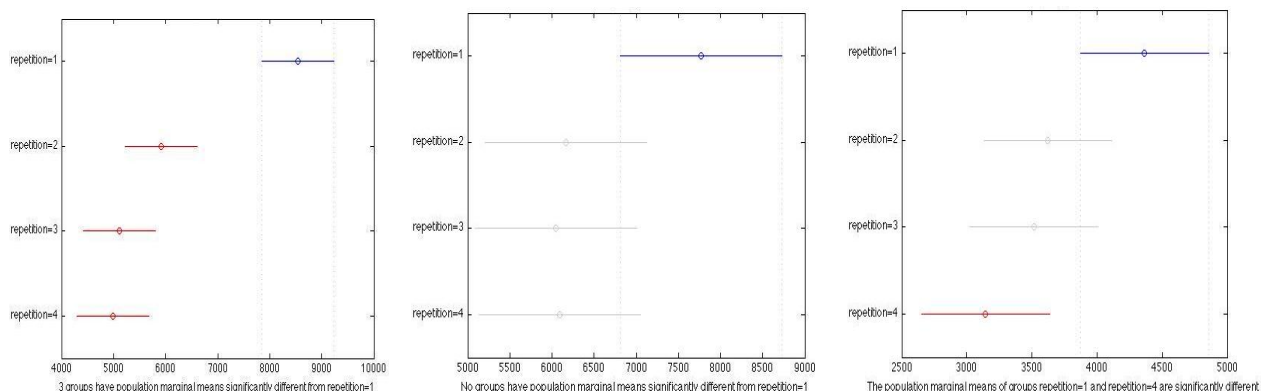


Figure 55: (au centre) Comparaison des moyennes et écart-types de temps de réaction du bruit blanc modulé en zone commerçante ($p = 0.0566 > 0.05$). L'apprentissage n'est pas significatif.

Figure 56: (à droite) Comparaison des moyennes et écart-types de temps de réaction du klaxon en zone commerçante ($p = 0.0146 < 0.05$). L'apprentissage devient significatif au quatrième passage.

La figure 57 récapitule les résultats obtenus pour l'apprentissage significatif : dans environ $\frac{2}{3}$ des cas, l'effet apparaît dès le deuxième passage. Les autres cas, où l'effet d'apprentissage est plus tardif, concernent surtout des signaux tels que le bruit blanc, le bruit blanc modulé et le klaxon.

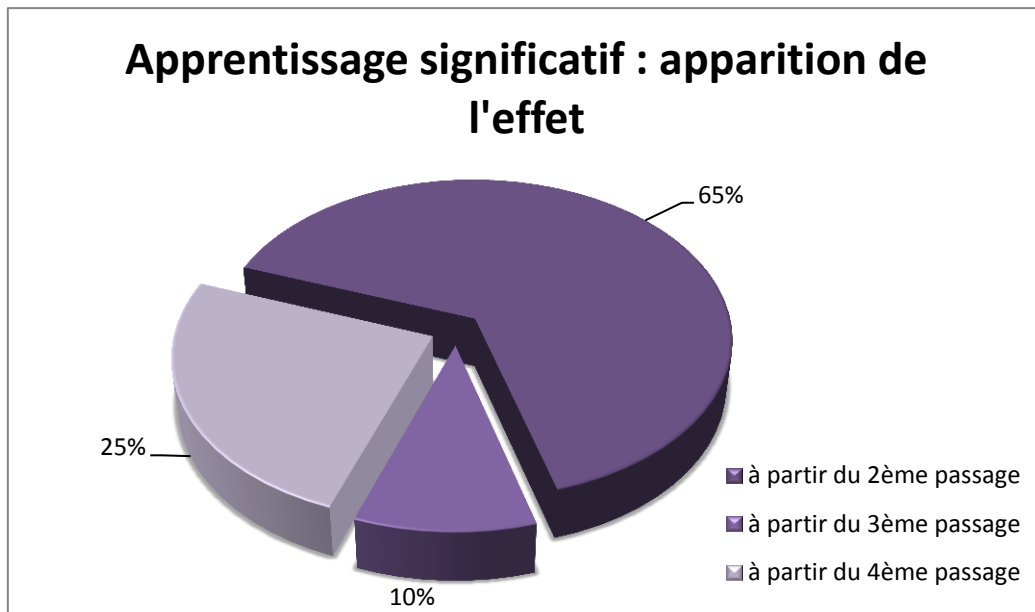


Figure 57 : Résultats de comparaison des moyennes. L'apprentissage s'avère significatif dès le deuxième passage dans $\frac{2}{3}$ des cas.

Ces résultats montrent que l'apprentissage est lié au contenu sémantique des signaux. Certains signaux sont proches de ce qu'ils représentent, et leur compréhension est quasi immédiate. Le bruit blanc et le bruit blanc modulés se rapprochent du bruit de moteur ; le klaxon est déjà associé à un concept de véhicule en mouvement, et fait partie du paysage urbain. Les auditeurs ne nécessitent pas alors un apprentissage rapide et important pour reconnaître et détecter correctement ces sons. D'autres signaux tels que le sifflement ou le cliquetis ne sont pas associés à une source en mouvement ; d'autres enfin tels que le train d'impulsions de bruit blanc ou la modulation, sont plus abstraits et n'ont pas de contenu sémantique particulier. Ces signaux nécessitent alors un apprentissage : ils sont éloignés de la notion de véhicule en déplacement, les auditeurs doivent donc apprendre à les reconnaître et les associer à un véhicule en approche avant de pouvoir les détecter correctement.

Enfin, l'étude des interactions faites par l'analyse ANOVA révèle que l'interaction {son ; répétition} est significative, tandis que l'interaction {bruit de fond ; répétition} ne l'est pas. Cela signifie que l'effet d'apprentissage est valable quel que soit le bruit de fond, mais pas quel que soit le signal.

Il est important de garder en tête cette notion d'apprentissage dans le choix d'un signal à ajouter au véhicule électrique : même si un signal semble abstrait, les auditeurs peuvent apprendre à l'associer à une notion de véhicule en mouvement, l'intégrer à leur paysage urbain et y devenir sensible pour assurer leur sécurité.

I.4. Enquête d'opinion

Un questionnaire a été soumis à chaque auditeur à la fin des quatre passages (annexe 3). En effet, les faits énoncés dans les paragraphes précédents et les analyses ANOVA apportent une vision objective des résultats, mais ne rendent pas compte des impressions des auditeurs : un signal peut paraître optimal d'un point de vue détectabilité, et pourtant ne pas du tout être apprécié ni envisagé pour un véhicule par les auditeurs.

Certains auditeurs ont rencontré quelques difficultés au départ avec les sons peu audibles tels que le bourdonnement et le bourdonnement modulé, mais affirment que cette complexité n'a été que de courtes durée : ces signaux ont fait l'objet d'un apprentissage et il devenait alors plus aisé pour les auditeurs de les détecter. Tous les auditeurs ont jugé l'expérience globalement aisée.

Les questions suivantes concernant les préférences des auditeurs semblent similaires, mais présentent des nuances. Dans un premier temps il était demandé aux auditeurs quel signal leur plaisait le plus/le moins. Il leur était demandé de répondre spontanément. Les résultats obtenus sont présentés en figures 58 et 59.

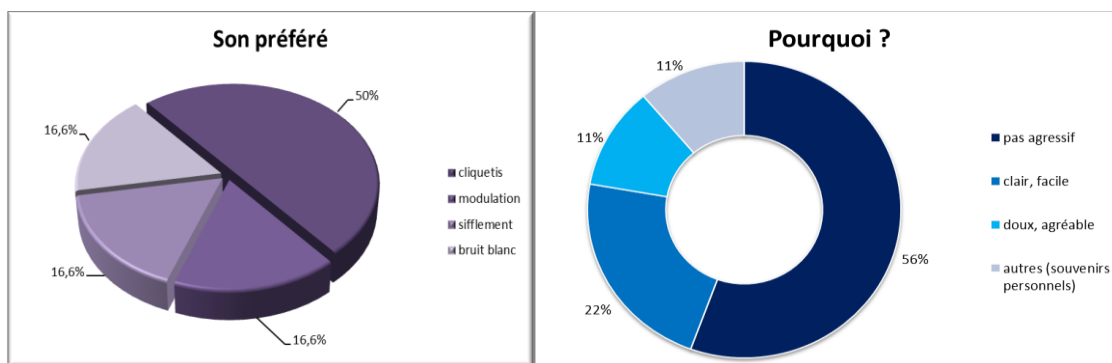


Figure 58 : Résultats de la question 3 du questionnaire.

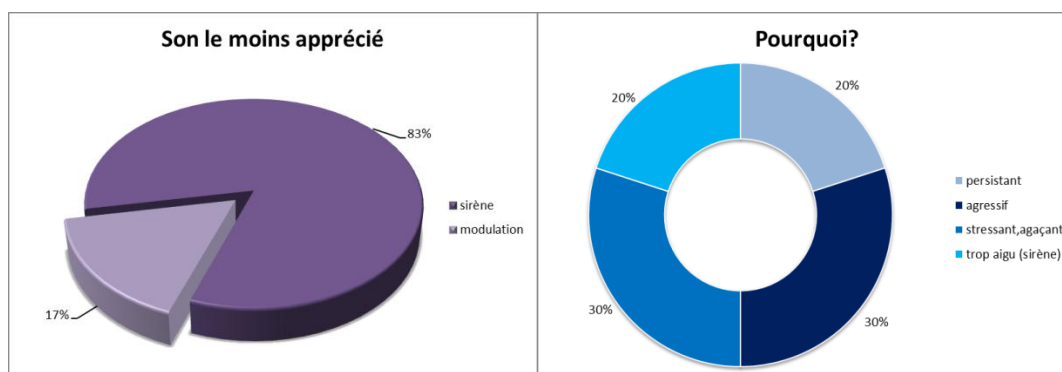


Figure 59: Résultats de la question 4 du questionnaire.

Ces premières questions ont été posées aux auditeurs sans que le cadre d'étude ne soit énoncé.

Le cadre de l'expérience a ensuite été expliqué aux auditeurs. Il leur a alors été demandé quel signal serait selon eux le plus/ le moins envisageable pour un véhicule indépendamment de tout contexte (urbain, rural...). Cette question fait écho à l'étude de

Nyeste et Wogalter évoquée en début de rapport (chapitre 1, paragraphe II.1.a.). Les résultats sont présentés en figures 60 et 61.

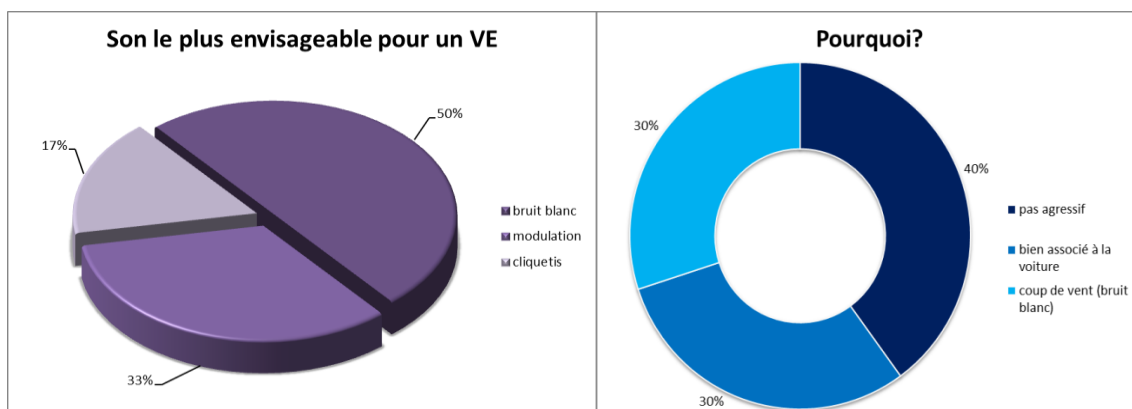


Figure 60: Résultats de la question 5 du questionnaire.

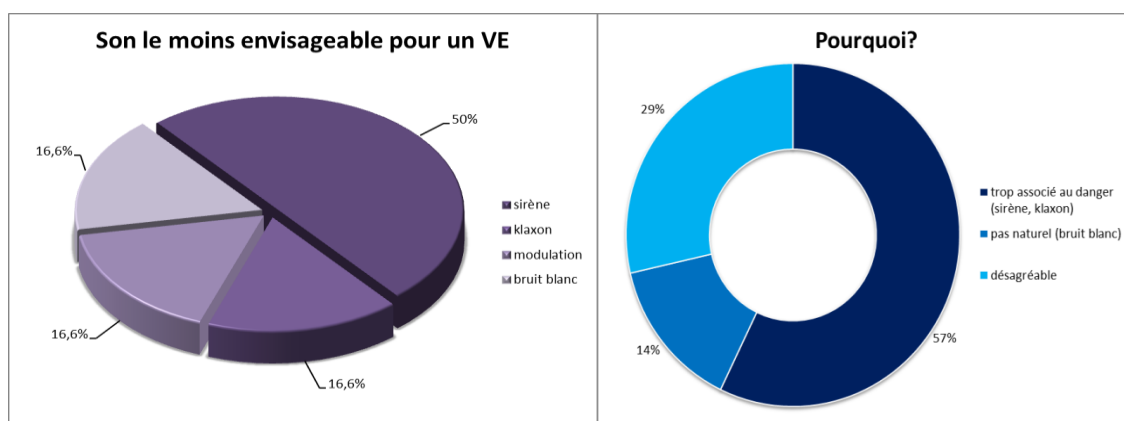


Figure 61: Résultat de la question 6 du questionnaire.

L'étude de Nyeste et Wogalter en 2008 avait permis de conclure que le bruit de moteur et le bruit blanc étaient les plus appréciés pour un véhicule électrique, et que le klaxon et la sirène faisaient partie des moins appréciés. Pour l'étude actuelle, le bruit de moteur est absent. Les résultats obtenus rejoignent ceux de Nyeste et Wogalter : le bruit blanc est le signal le plus apprécié pour un véhicule, contrairement à la sirène et au klaxon, mentionnés comme les moins appréciés. Ces résultats apportent un supplément à ceux de Nyeste et Wogalter, car les raisons des choix des auditeurs ont été recensées : les auditeurs préfèrent les sons doux sans contenu sémantique particulier, ne rappelant pas une situation de danger comme peut le faire la sirène ou le klaxon.

Les dernières questions enfin étaient posées pour déterminer quel signal les auditeurs étaient le plus/le moins disposés à entendre tous les jours en ville, si jamais un tel signal devait être appliqué aux véhicules. Les résultats sont présentés en figures 62 et 63. Le bruit blanc a été désigné à l'unanimité comme le signal le plus acceptable à entendre quotidiennement en ville. Jugé semblable au bruit du vent, il est considéré comme doux et facilement intégrable au paysage sonore urbain, ce qui en fait un signal acceptable au quotidien. La sirène a été majoritairement mentionnée comme étant le signal le moins acceptable à entendre tous les jours, rappelant trop le danger ou l'urgence, à connotation négative.

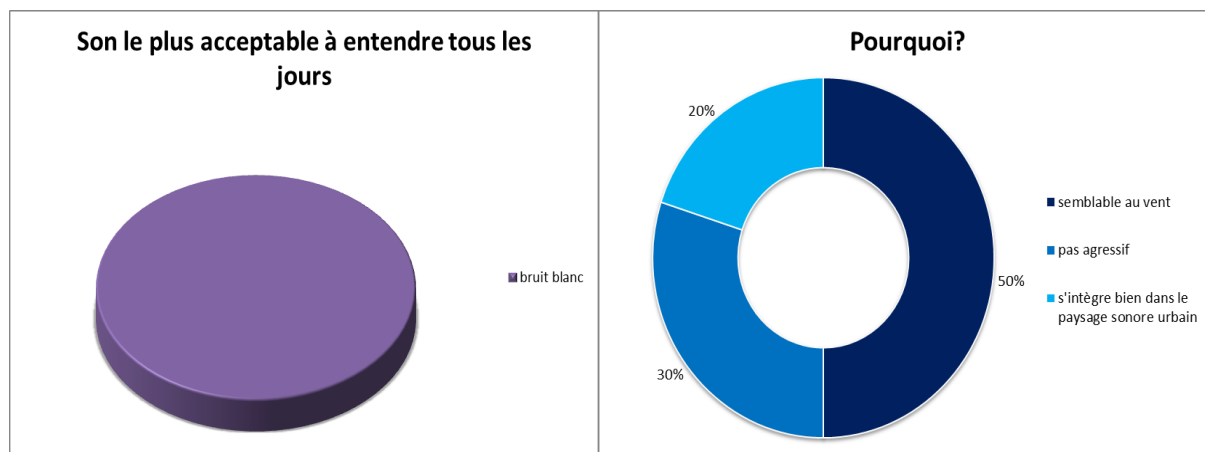


Figure 62: Résultats obtenus pour la question 7.

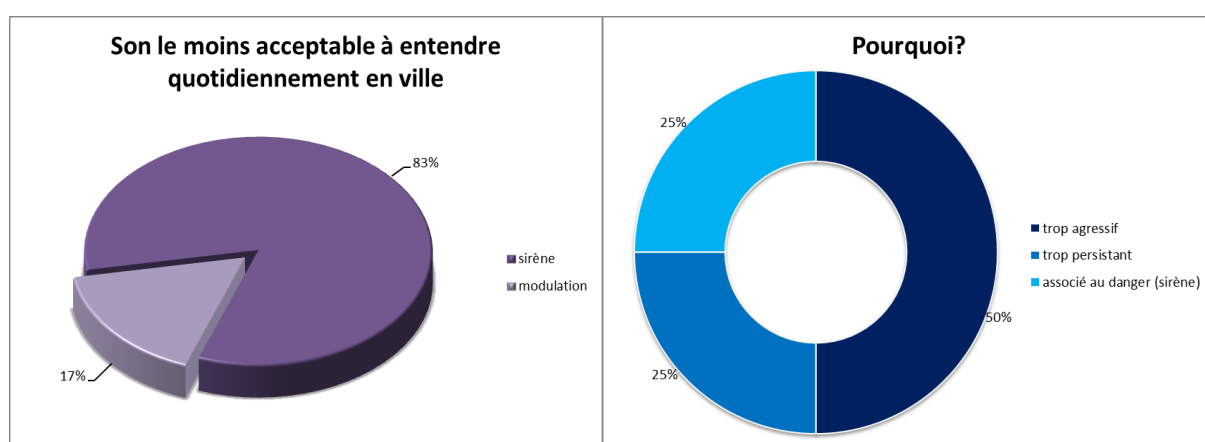


Figure 63: Résultats obtenus pour la question 8.

Les réponses obtenues et présentées précédemment proviennent des six participants à l'expérience de temps de réaction. Elles doivent donc être nuancées : les résultats de l'enquête d'opinion ne sont donnés que par un petit échantillon d'individus. Cependant ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la prise en compte de l'opinion des auditeurs dans le cadre d'une telle étude : d'après l'enquête, le bruit blanc semble être le plus envisageable. Pourtant ce son ne fait pas partie des sons détectés le plus tôt si l'on considère les moyennes de temps de réaction obtenues : si l'on se cantonne à l'étude statistique des temps de réaction, on pourrait conclure que le bruit blanc n'est pas le meilleur signal à retenir. Le choix d'une signature sonore pour un véhicule doit donc être le fruit d'un compromis entre les propriétés physiques assurant la sécurité des piétons et cyclistes, et les préférences permettant leur confort auditif.

II. Discussion

II.1. Distance critique et temps de réaction

Comment déterminer si un signal peut être retenu en tant que signal acceptable pour un véhicule électrique ? Il est nécessaire pour cela de définir la notion de distance d'arrêt et de distance critique pour le conducteur et le piéton. Kerber a étudié la notion de distance critique pour une rencontre piéton/véhicule [23]. Il s'agit de la distance minimale entre le véhicule et le piéton pour laquelle l'accident peut être évité par la réaction adéquate. Kerber a recensé trois cas, dans la situation d'un véhicule à l'approche et d'un piéton sur le point de traverser :

- Le conducteur et le piéton réagissent. Il s'agit du cas où la distance critique est la plus petite.
- Seul le piéton réagit. On suppose que le véhicule approche à une vitesse constante V_o , et que le piéton présente un temps de réaction t_{rp} . Dans les meilleures conditions (le piéton n'est pas distrait), le temps de réaction est en moyenne de 0,56 s. Il peut aller jusqu'à 1,3 s pour un piéton distrait. Etant donné que le piéton peut stopper immédiatement, il n'a pas besoin de distance de freinage, et sa distance critique est décrite par :

$$d_{cp} = V_o \times t_{rp} \quad (7)$$

- Seul le conducteur réagit. Il s'agit du cas pour lequel la distance critique est la plus élevée. Le temps de réaction du conducteur est toujours plus élevé que celui d'un piéton, car il prend en compte le temps d'appui sur la pédale de frein. Ainsi, dans les meilleures conditions, le temps moyen de réaction t_{rc} d'un conducteur est de 0,7 s. Mais si le conducteur est distrait, ce temps de réaction peut aller jusqu'à 1,5s. La distance critique est alors la somme de la distance parcourue à la vitesse constante V_o pendant le temps de réaction et de la distance de freinage :

$$d_{cc} = V_o \times t_{rc} - \frac{V_o^2}{2a} \quad (8)$$

L'accélération a , pendant le freinage, est supposée constante et de valeur négative.

Pour l'étude actuelle on choisit $a = -7,85 \text{ m/s}^2$ ce qui correspond à un freinage d'urgence sur une route bitumée sèche et propre, avec une voiture récente et en bon état mécanique. On a également $V_o = 20 \text{ km/h} = 5,56 \text{ m/s}$. $t=0\text{s}$ correspond au temps de départ de la voiture, et $t=13,5\text{s}$ est le temps où le véhicule atteint la position du piéton. On a, pour les temps de réaction maximaux $t_{rp} = 1,3\text{s}$ et $t_{cp} = 1,5\text{s}$:

$$d_{cp} = 5,56 \times 1,3 = 7,23 \text{ m et } t_{cp} = 13,5 - \frac{d_{cp}}{V_o} = 12,2 \text{ s le temps critique piéton à } 20 \text{ km/h.}$$

$$d_{cc} = 5,56 \times 1,5 + \frac{5,56^2}{2 \times 7,85} = 10,31 \text{ m et } t_{cc} = 13,5 - \frac{d_{cc}}{V_o} = 11,65 \text{ s le temps critique conducteur à } 20 \text{ km/h.}$$

Trois cas sont à considérer :

- 1^{er} cas : le temps de réaction obtenu pour un signal est supérieur à t_{cp} , et le piéton est le seul à réagir. Le signal est rejeté : le piéton n'a pas le temps de réagir pour éviter l'accident.
- 2^{ème} cas : le temps de réaction obtenu pour un signal est inférieur à t_{cp} mais supérieur à t_{cc} . L'accident peut être évité si le piéton réagit, car le temps de réaction est supérieur au temps critique piéton. Ce deuxième cas n'est optimal car il n'améliore

pas réellement la situation du véhicule électrique en ville : trop peu audible, le signal reste secondaire, et la vue reste le premier facteur de sécurité du piéton (rappelons que les deux temps critiques sont très proches).

- 3^{ème} cas : le temps de réaction est supérieur à t_{cc} . C'est le cas optimal : la sécurité est maximale. Le signal est alors validé.

II.2. Analyse des résultats

La discussion est faite dans un objectif de sécurité maximale : on ne se contente pas de regarder seulement les moyennes, mais on prête également attention aux écart-types. La figure 64 illustre le cas de la zone commerçante : le bourdonnement et le bourdonnement modulé présentent des valeurs entre t_o (le temps de passage au niveau du piéton) et t_{cp} . Ils sont donc rejetés. Les autres signaux ne présentent pas de valeurs entre t_o et t_{cp} ni entre t_o et t_{cc} . On peut se contenter de ne comparer que les moyennes pour ces signaux (tableau 13). Dans ce choix de sécurité maximale, dès qu'un signal présente des valeurs supérieures à t_{cc} et a fortiori à t_{cp} , il est rejeté., même si sa moyenne est inférieure.

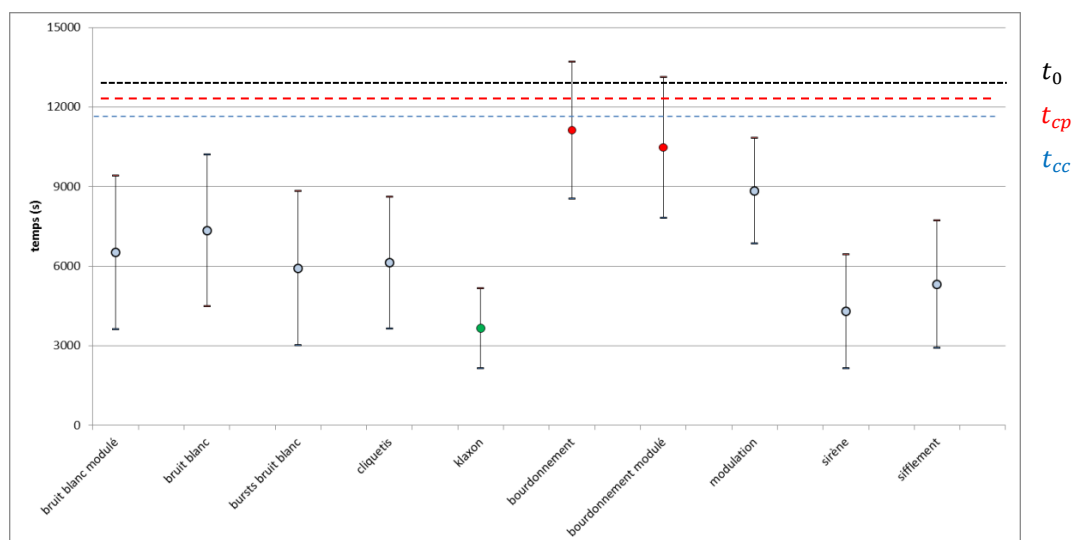


Figure 64: Exemple en zone commerçante. La ligne pointillée bleue indique le temps critique conducteur, la rouge indique le temps critique piéton. La ligne noire indique le temps pour lequel le véhicule atteint la position du piéton.

Valeurs du temps de réaction t	Signaux (par ordre croissant de moyenne) en zone résidentielle	Signaux (par ordre croissant de moyenne) en zone commerçante	Signaux (par ordre croissant de moyenne) en rue fréquentée
$t < t_{cc}$	Cliquetis Train d'impulsion de bruit blanc Sirène Sifflement Bruit blanc modulé Bruit blanc Klaxon	Klaxon Sirène Sifflement Train d'impulsion de bruit blanc Cliquetis Bruit blanc modulé Bruit blanc Modulation	Train d'impulsion de bruit blanc Sirène Sifflement Cliquetis Bruit blanc modulé Bruit blanc Klaxon
$t_{cc} < t < t_{cp}$	Modulation		Modulation
$t_{cp} < t$	Bourdonnement Bourdonnement modulé	Bourdonnement modulé Bourdonnement	Bourdonnement Bourdonnement modulé

Tableau 13: Classement des sons pour les différents bruits de fond. Dès qu'un signal présente des valeurs critiques, il est considéré comme non optimal et est placé dans la catégorie critique correspondante.

Une comparaison des moyennes de temps de réaction montre qu'il n'existe pas de différence significative entre un signal et son homologue modulé : ainsi, si un signal convient, le signal modulé correspondant aussi.

Les signaux validés sont classés en moyenne (c'est-à-dire tous bruits de fond confondus) dans cet ordre : la sirène, le train d'impulsions de bruit blanc, le cliquetis, le sifflement, le klaxon, le bruit blanc modulé et le bruit blanc. Ce classement moyen a été effectué grâce au temps de réaction moyen de chaque signal tous bruits de fond confondus. Les autres signaux sont rejetés. Deux points de vue peuvent alors être adoptés :

➤ **Point de vue n°1 : Le point de vue sécurité.**

On cherche à garantir au maximum la sécurité des piétons et cyclistes. On retient alors les sons détectés en premiers en moyenne. Ne gardons par exemple que les trois premiers signaux (choix arbitraire) : la sirène, le train d'impulsions de bruit blanc, le cliquetis. Puis reprenons la matrice (tableau 14) et l'espace temps/fréquence choisis au chapitre 1 (figure 65).

Temps Fréquence	Continu	Modulé	Train d'impulsions
Harmonique	Bourdonnement	Bourdonnement modulé Modulation	Klaxon
Inharmonique		Sifflement Sirène	Cliquetis
Bruit	Bruit blanc	Bruit blanc modulé	Train d'impulsions de bruit blanc

Tableau 14: Matrice des signaux. Les signaux en violet sont les trois premiers détectés, ceux en rouge sont des signaux rejetés.

On observe déjà que les signaux appartenant aux classes « harmonique continu », et « harmonique modulé » ne conviennent pas, du moins pour les sons étudiés. Cela correspond aux faibles valeurs de planéité spectrale combinées à des valeurs faibles ou moyennes de taux de modulation.

Quant aux premiers signaux détectés, on constate qu'ils font partie des trains d'impulsions et des signaux modulés inharmoniques. Les signaux détectés en moyenne le plus tôt combinent des valeurs moyennes ou élevées de planéité spectrale, avec des valeurs moyennes ou élevées de taux de modulation. Les valeurs élevées de planéité spectrale correspondent aux valeurs trouvées pour le bruit blanc.

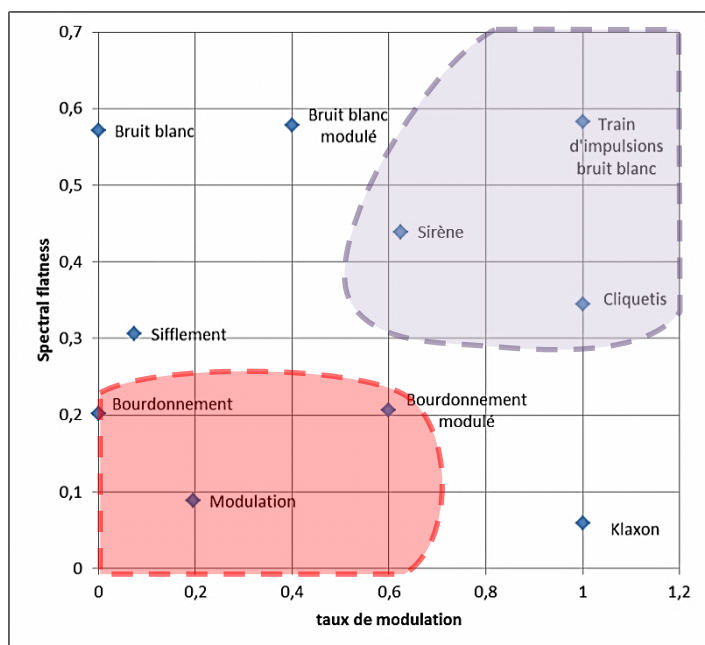


Figure 65: Espace temps/fréquence. La zone en rouge regroupe les signaux rejetés. La zone en violet regroupe les trois premiers signaux détectés. Ces zones sont approximatives.

Il est plus difficile de dégager des liens évidents pour les autres signaux.

Le lien existant entre le temps de réaction pour un signal et ses propriétés acoustiques n'est pas évident. Si l'on considère chaque bruit de fond, on constate que les trois sons détectés en moyenne le plus tôt se retrouvent également en début de classement (mis à part dans la zone commerçante où il faut descendre jusqu'au 5^{ème} son pour retrouver le cliquetis), mais dans un ordre différent. Ainsi pour des signaux clairement audibles dans un bruit de fond, et égalisés en sonie, on constate que certaines propriétés acoustiques (haute planéité spectrale et taux de modulation moyen ou élevé) sont associées à des détectabilités satisfaisantes. Mais il est difficile d'élaborer des corrélations indiscutables entre temps de réaction et propriétés acoustiques. En effet si l'on considère le bruit blanc et le klaxon, souvent détectés parmi les derniers des sons validés, on pourrait penser qu'une valeur élevée en planéité spectrale combinée à une faible valeur de taux de modulation, ou inversement, n'est pas le meilleur choix pour assurer une détectabilité optimale. Pourtant le klaxon s'avère être le premier détecté en zone commerçante. Il est évident que le type de bruit de fond influe sur le classement des signaux, du fait des effets de masquage en fréquence. L'analyse ANOVA a révélé que l'interaction {son ; bruit de fond} est significative, ce qui confirme l'importance du bruit de fond dans la détectabilité d'un signal. La complexité d'une telle étude est ainsi mise en évidence. Elle est très dépendante du contexte, et induit la question suivante concernant le choix d'un signal à ajouter au véhicule électrique: une seule signature sonore est-elle la meilleure solution ? Si l'on recense les propriétés des premiers signaux détectés dans chaque bruit de fond, on peut obtenir des résultats très différents des résultats obtenus en moyenne:

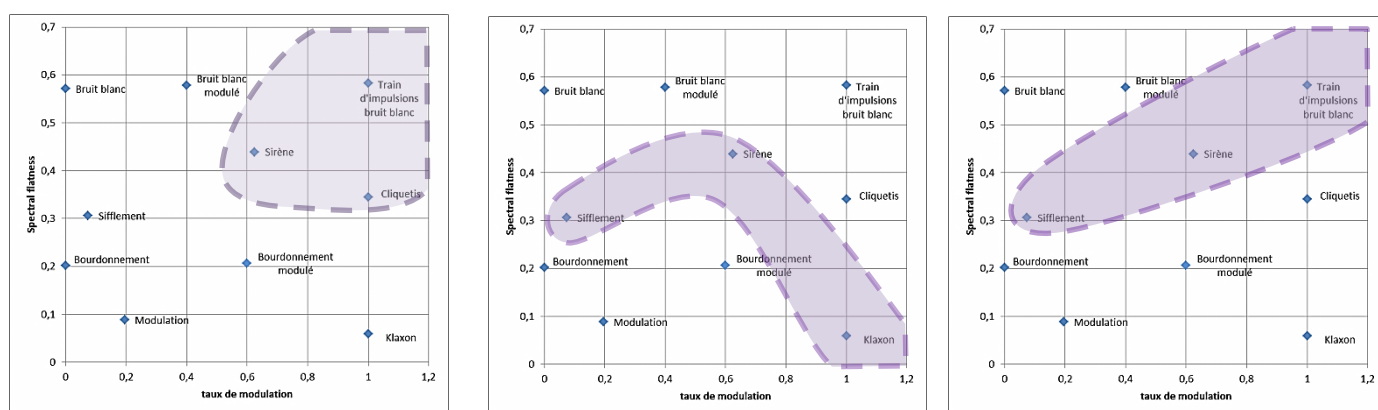


Figure 66: Zones regroupant les trois premiers signaux détectés par bruit de fond. (à gauche: la zone résidentielle, au centre: la zone commerçante, à droite: la rue fréquentée)

Il est notable sur la figure 66 que les ambiances sonores auxquelles est confronté le véhicule font partie intégrante du choix d'un signal adapté pour le véhicule. Certes il est possible de ne choisir qu'une signature sonore unique (les premiers signaux détectés en moyenne conviennent), mais étant donné que l'interaction {son ; bruit de fond} est significative, une signature sonore multiple, qui s'adapte à la situation, est sans doute préférable: l'ergonomie d'un signal doit intégrer le signal extérieur. Enfin, les propriétés des signaux assurant une bonne détectabilité devront être affinées à l'avenir à l'aide d'études plus précises. Il s'agissait ici de dégager des propriétés générales, et l'on constate qu'il n'est pas possible de conclure de façon définitive sur le lien propriétés des signaux/détectabilité.

Les études à venir porteront sans doute sur chaque case de la matrice de caractérisation, en faisant varier un à un pour chacune de ces cases des paramètres tels que la fréquence fondamentale, le nombre d'harmoniques, la fréquence de modulation...

➤ **Point de vue n°2 : le point de vue des auditeurs.**

L'enquête d'opinion a montré que les avis et préférences des auditeurs pouvaient différer des choix conseillés par des points de vue de pure sécurité. En effet, les résultats d'enquête amèneraient à penser que le bruit blanc continu est le signal le plus envisageable pour un véhicule électrique. Ce signal fait partie des signaux validés, mais pas des signaux détectés parmi les premiers. Cependant il est détecté en moyenne à une distance égale à environ 5 fois la distance critique piéton et environ 3,5 fois la distance critique conducteur, soit environ 36m, ce qui est satisfaisant.

Un signal tel que la sirène n'est par contre pas apprécié, malgré le fait qu'il garantisse en moyenne la sécurité maximale. Les préférences des auditeurs semblent plutôt décorréliées des propriétés des signaux, et plus en relation avec leur contenu sémantique : le bruit blanc leur rappelle le « bruit du vent » ou encore le « bruit de la mer », à connotation positive, alors que la sirène est évocatrice de stress, rarement apprécié.

On constate que le choix d'un signal pour un véhicule nécessite une étude attentive de ses propriétés acoustiques, et ne peut se faire sans connaître l'avis des auditeurs, premiers concernés par cette nouvelle signature sonore. De plus, contrairement à la situation actuelle du véhicule thermique, qui produit un son mécanique non maîtrisé, la situation du véhicule électrique est contrôlable : on peut choisir un signal optimal en fonction du bruit de fond. Un système passif ne produisant qu'un seul signal quelle que soit la situation aux faibles vitesses n'est peut-être pas la meilleure option. La solution réside peut-être dans le choix d'un système adaptatif, qui ajusterait le niveau sonore de façon à rester toujours clairement audible, et les propriétés de la signature sonore en fonction du contexte pour toujours offrir au piéton la sécurité maximale, tout en restant auditivement agréable.

Enfin, qu'advient-il de la pollution sonore en milieu urbain ? Rappelons que le silence du véhicule électrique reste un aspect très séducteur et un argument de vente auprès des consommateurs, car il promet des villes moins bruyantes. Cet aspect peut être en partie conservé. En effet, nous avons constaté que, dans un environnement sonore dépourvu de véhicules, tel que la zone résidentielle ou la zone commerçante, les dix signaux étudiés ci-dessus étaient tous audibles, alors que le bruit de moteur à la même sonie ne l'était pas. Ils sont donc détectables à un niveau sonore moins élevé que celui d'un moteur de véhicule thermique, et pourraient alors permettre d'envisager la perspective d'un véhicule moins bruyant. De plus, ces signaux sont détectables tôt : le bruit blanc, pourtant souvent classé en fin des signaux validés, est détecté en moyenne dès 36m, soit environ cinq fois la distance critique piéton. Les autres signaux sont détectés de plus loin encore. On pourrait alors envisager de baisser encore les niveaux de ces signaux validés (ce choix dépendrait des exigences et normes de sécurité du concepteur) pour obtenir un véhicule encore moins bruyant, tout en conservant la sécurité pour les piétons et les cyclistes. Il n'est pas nécessaire que le véhicule électrique s'entende plus que les autres, mais il ne doit certainement pas rester silencieux.

Conclusion

Le véhicule électrique suscite aujourd'hui beaucoup d'interrogation et en suscitera encore à l'avenir. Il sera très certainement amené à porter une signature sonore aux basses vitesses. Le choix de cette signature est multiple, et offre de nombreuses perspectives bien différentes de l'usuel bruit de moteur. Déterminer les propriétés permettant de fournir un signal satisfaisant au véhicule électrique exige un travail large et approfondi. Ce projet a pu fournir des pistes quant à ces propriétés, mais a également mis en lumière l'effet d'apprentissage d'un signal lorsque celui-ci est plongé dans un contexte inhabituel. Cet effet était inattendu, et a montré qu'il n'était pas obligatoire de se cantonner à un bruit proche du moteur. L'importance du bruit de fond a également été soulignée, et laisse imaginer pour le véhicule électrique de demain un système sonore adaptatif prenant en compte le contexte dans lequel le véhicule évolue, ajustant le niveau et les propriétés du signal en conséquence, pour une sécurité optimale des piétons. Cette conception de signature sonore ne pourra cependant pas être effectuée sans tenir compte des préférences des usagers de la route, principaux acteurs du futur du véhicule électrique.

Ce projet a été une succession de choix : ceux-ci devaient être clairs, rigoureux, solidement argumentés, et j'ai dû discuter chacun d'entre eux avec les tuteurs qui m'ont encadrée. Il m'a également permis de mettre en pratique les connaissances que j'ai pu acquérir lors de ma troisième année et de mon master, et les compétences que j'ai pu développer à l'ENSTA Paris Tech : l'esprit critique, l'autonomie, la mise en place et la gestion d'un emploi du temps, la détermination. Ce stage à l'IRCAM m'a également permis de renforcer mes capacités de créativité et d'adaptation pour faire face à l'imprévu, ma rigueur, et bien sûr mes connaissances en acoustique, me donnant l'envie d'être un ingénieur toujours plus compétent.

Références et bibliographie

- [1] Automotive Design Interview with Mr Ulrik Grape. Automotive Design (AD), Mai 2010, pp 10-12
- [2] INTERNOISE (2009, CANADA, OTTAWA). YOSHINAGA H. NAMIKAWA Y. Predicting noise reduction by electrification of automobiles.
- [3] Chiffres de vente & immatriculations de voitures électriques en France. In : Automobile propre. <http://www.automobile-propre.com/dossiers/voitures-electriques/chiffres-vente-immatriculations-france/>
- [4] Véhicule électrique, le coût d'usage du véhicule électrique. <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/economie/cout-usage>
- Lawrence Rosenblum, "Hybrid Cars are Harder to Hear." University of California Riverside – Newsroom, 28 avril 2008.
- [5] INTERNOISE (4-7 Septembre 2011, JAPON, OSAKA). YAMAUCHI K. MENZEL D. Cross-cultural study on feasible sound levels of possible warning sounds for quiet vehicles.
- [6] Equipe perception et design sonore. <http://pds.ircam.fr>
- [7] CFA - Congrès Français d'Acoustique (Avril 2012, FRANCE, NANTES). MISDARIIS N. CERA A. LEVALLOIS E. LOCQUETEAU C. Do electric cars have to make noise? An emblematic opportunity for designing sounds and soundscapes.
- [8] LE NINDRE B. GUYADER G. EV – sound quality: customer expectations and fears-crucial NVH stakes. février 2010.
- [9] WOGALTER M. On the Risk of Quiet Vehicles to Pedestrians and Drivers. Department of Psychology North Carolina State University Raleigh, NC 27695-7801 USA, 2001.
- [10] ROSENBLUM L. Hearing Quiet Car. 2007-2008
- [11] APR. Accident de la route piéton-Association Prévention Routière. 2010. <http://www.preventionroutiere.asso.fr/Nos-publications/Statistiques-d-accidents>
- [12] 20th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS (23-27 Août 2010, AUSTRALIE, SYDNEY). SANBERG U. GOUBERT L. MIODUSZEWSKI P. Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals?
- [13] MAURER M. The Danger Posed by Silent Vehicles. National Federation of the Blind, 19 février 2008
- [14] GOODES P. BAI Y. MEYER E. Investigation into the Detection of a Quiet Vehicle by the Blind Community and the Application of an external Noise Emitting System. 2009.
- [15] HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 52nd ANNUAL MEETING (2001). NYESTE P. WOGALTER M. On adding sound to quiet vehicles. Department of Psychology North Carolina State University Raleigh, NC 27695-7801 USA.
- [16] MARSHALL D.C. LEE J.D., P.A. AUSTRIA P.A. Alerts for vehicle information systems: Annoyance, urgency, and appropriateness. Human Factors, 2007, 49, 145-157.
- [17] FRIEDMAN A. What Is The "Crest Factor" And Why Is It Used? DLI Engineering
- [18] DAGA (2011, ALLEMAGNE, DUSSELDORF). MENZEL D. YAMAUCHI K. VÖLK F. FASTL H. Psychoacoustic experiments on feasible sound levels of possible warning signals for quiet vehicles.
- [19] DAGA (2008, ALLEMAGNE, DRESDEN). KERBER S. FASTL H. Prediction of perceptibility of vehicle exterior noise in a background noise.

- [20] MAFFIOLO V. De la caractérisation sémantique et acoustique de la qualité sonore de l'environnement urbain. 1999.
- [21] INTERNOISE (4-7 Septembre 2011, JAPON, OSAKA). YAMAUCHI K. MENZEL D. Cross-cultural study on feasible sound levels of possible warning sounds for quiet vehicles.
- [22] DAGA (2008, ALLEMAGNE, DRESDEN). KERBER S. FASTL H. Prediction of perceptibility of vehicle exterior noise in a background noise.
- [23] KERBER S. Perceptibility of vehicle external noises in background noises: Psycho-Acoustic assessments and model-based prognosis. 2008

Annexe 1

Expérience d'égalisation en sonie

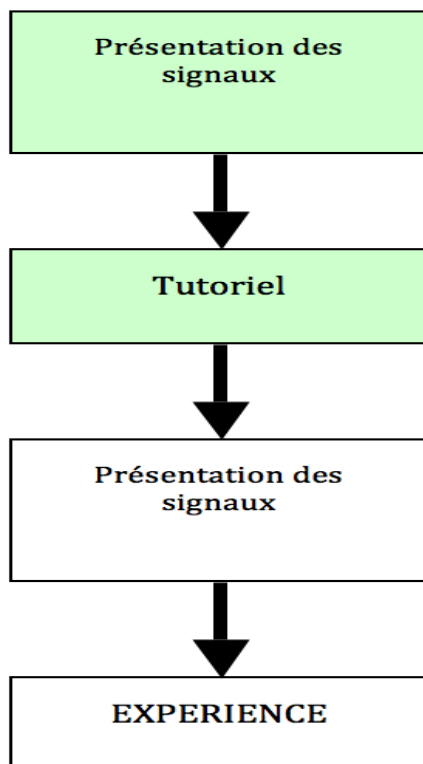
Au cours de cette expérience, vous allez entendre successivement différentes paires de sons. Dans chaque paire, le premier son est le son de référence. Votre rôle est d'ajuster, à l'aide du curseur à l'écran, le niveau perçu du deuxième son de façon à ce qu'il vous paraisse au même niveau sonore que le premier.

Annexe 2

Expérience de mesure de temps de réaction

L'expérience à laquelle vous allez participer a pour objectif de mesurer le temps de réaction lors de la détection d'un signal plongé dans un bruit de fond.

Au cours de cette expérience, vous allez entendre différentes séquences de 15 secondes. Chaque séquence contient un signal plongé dans une ambiance urbaine. Votre rôle sera d'appuyer sur la touche ESPACE du clavier dès que vous détectez le signal.



Les signaux que vous devrez détecter vous seront d'abord présentés une première fois, puis un tutoriel vous sera proposé pour vous familiariser avec le principe de l'expérience. Les signaux vous seront ensuite à nouveau présentés avant le démarrage de l'expérience. Ils vous seront plusieurs fois rappelés en cours d'expérience.

L'expérience dure environ 45 minutes.

Annexe 3

QUESTIONNAIRE – RETOUR SUR L'EXPÉRIENCE DE MESURE DE TEMPS DE RÉACTION

NOM :

1. Avez-vous des remarques quant à l'expérience à laquelle vous avez participé ?
2. L'expérience vous a-t-elle paru (trop) aisée/ (trop) complexe ?
3. Quel son avez-vous préféré ? Pourquoi ?
4. Quel son avez-vous le moins apprécié ? Pourquoi ?
5. Quel son vous semble le plus envisageable pour un VE ? Pourquoi ?
6. Quel son vous semble le moins envisageable pour un VE ? Pourquoi ?
7. Quel son vous semble le plus acceptable au quotidien en ville ? Pourquoi ?
8. Quel son vous semble le moins acceptable au quotidien en ville ? Pourquoi ?