



HAL
open science

Confort acoustique dans un appartement en milieu urbain dû aux sources sonores intrusives et aux dispositions constructives du bâtiment

Romain Dedieu

► **To cite this version:**

Romain Dedieu. Confort acoustique dans un appartement en milieu urbain dû aux sources sonores intrusives et aux dispositions constructives du bâtiment. Acoustique [physics.class-ph]. CY Cergy Paris Université, 2020. Français. NNT : 2020CYUN1057 . tel-03209848

HAL Id: tel-03209848

<https://theses.hal.science/tel-03209848v1>

Submitted on 27 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 405: Économie, Management, Mathématiques, Physique et
Sciences Informatiques (EM2PSI)

Doctorat

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

CY Cergy Paris Université

Spécialité “Acoustique”

présentée et soutenue par

Romain DEDIEU

le 10 Juin 2020

**Confort acoustique dans un appartement en milieu urbain dû aux
sources sonores intrusives et aux dispositions constructives du
bâtiment**

Directeur de thèse : **Catherine LAVANDIER**

Co-encadrants de thèse : **Sylvain BERGER** et **Cédric CAMIER**

Jury

Rozenn Nicol,	Ingénieur de recherche, HDR, Orange Labs	Rapporteur
Jean-Hugh Thomas,	PU, LAUM, Le Mans Université	Rapporteur
Catherine Marquis-Favre,	DR, ENTPE	Examineur
Guillaume Lemaitre,	Chef de projet, HDR, SNCF Innovation & Recherche	Examineur
Catherine Lavandier,	PU, CY Cergy Paris Université	Directeur
Sylvain Berger,	Ingénieur de recherche, Saint-Gobain	Encadrant
Cédric Camier,	Ingénieur de recherche, Saint-Gobain	Invité

Laboratoire ETIS, UMR 8051

CY Cergy Paris Université, ENSEA, CNRS

Site de Saint Martin, 2 rue Adolphe Chauvin, 95 302 Cergy-Pontoise Cedex France

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes trois co-directeurs de thèse pour leur écoute, pour leurs conseils, et pour m'avoir accompagné tout au long des trois ans de doctorat. Je tiens à remercier chaleureusement Catherine Lavandier, pour son investissement sans faille dans ce projet. Sa créativité, sa pédagogie ainsi que son dynamisme pour animer le projet m'ont énormément aidé dans la conduite de ces travaux. Je tiens également à remercier Sylvain Berger pour son accueil, pour son enthousiasme et pour la transparence de son management. Ses conseils pour l'avancement du projet et sa curiosité ont grandement contribué à l'aboutissement de ces travaux. Enfin, je remercie Cédric Camier d'avoir accepté de m'encadrer, et pour avoir partagé son savoir scientifique.

Je tiens à remercier Pierre Leroy pour m'avoir donné l'opportunité de débiter mon expérience professionnelle dans le domaine de la recherche appliquée. Il a été un encadrant exceptionnel et je tenais à lui témoigner ma profonde reconnaissance pour m'avoir mis le pied à l'étrier et pour avoir cru en moi.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe acoustique de SGR Paris. Je remercie Gary Jacques, Marina Malgrange, et Volodymyr Iurasov, qui de part leur curiosité et ouverture d'esprit se sont intéressés à mon sujet de thèse et m'ont enrichi de leurs expériences lors des nombreux échanges que nous avons eus. Marina Malgrange m'a en particulier beaucoup aidé lors de la phase de caractérisation acoustique du laboratoire. Je souhaite lui témoigner toute ma gratitude pour avoir partagé ses expériences dans le domaine de l'acoustique du bâtiment, et pour m'avoir aidé à effectuer toutes les mesures en un temps record.

Je voudrais remercier Jacques Fragoso, pour avoir réalisé les nombreux travaux d'aménagement du laboratoire de perception acoustique. Son savoir-faire et sa bonne humeur ont rendu toute la phase d'installation du laboratoire très agréable.

Mes remerciements vont également à Carine Royer, et à Hélène Guinet qui ont partagé le fruit de leurs travaux en psychologie cognitive. Nos échanges pluridisciplinaires ont contribué à enrichir le contenu du manuscrit.

Je souhaite remercier l'ensemble des participants qui ont accepté de participer à cette longue étude.

J'aimerais également remercier de tout mon cœur mes parents Sabine, et Thierry Dedieu. Leur amour, et leur soutien permanent m'ont permis de me construire jusqu'ici dans les meilleurs conditions. Je remercie également mon frère Etienne Zoldi Dedieu pour son soutien, son enthousiasme, et son humour.

Que le personnel administratif soit salué et le personnel d'entretien remercié de son travail.

Table des matières

Remerciements	i
Acronymes	xvii
1 Introduction	1
1.1 Contexte et motivation	1
1.2 Problématique	2
1.3 Originalité et objectif de la recherche	3
1.3.1 Une méthodologie originale	3
1.3.1.1 Caractérisation des préférences individuelles	3
1.3.1.2 Effet des performances du bâti	4
1.3.2 Sélection d'un panel	4
1.4 Organisation du mémoire	7
2 État de l'art	11
2.1 Vers une définition du confort acoustique au domicile	11
2.1.1 La gêne et le désagrément	11
2.1.2 Le paradoxe	12
2.1.3 Les moyens de contrôle	12
2.1.4 Vers des moyens plus élaborés de contrôle	14
2.1.5 Synthèse et proposition d'une définition	15
2.2 La sémantique des sources perçues au domicile	15
2.2.1 État des lieux des sources sonores dans le bâtiment	16
2.2.1.1 Sondages IFOP et TNS-Sofres	16
2.2.1.2 Enquêtes in situ - Corrélations entre gêne et performances?	17
2.2.1.3 Les sources intérieures au logement	26
2.2.1.4 Conclusion générale sur la sélection de sources	27
2.2.2 Comment construire les scènes sonores typiques?	28
2.2.2.1 Les paysages sonores urbains	28
2.2.2.2 Focus sur le bruit de trafic routier	28
2.2.2.3 Les bruits environnementaux intérieurs	29
2.2.3 Conclusion	30
2.3 Les éléments sociaux et culturels	31
2.3.1 Facteurs démographiques	31
2.3.2 Facteurs sociaux et culturels	31
2.3.3 Facteurs comportementaux	31
2.4 Approche de laboratoire	33
2.4.1 Approche psycho-acoustique	33
2.4.1.1 Échelle de jugement	33
2.4.1.2 Choix du type de procédure	34
2.4.2 Approche cognitive	34

2.4.2.1	Validité écologique	34
2.4.2.2	Mesure directe de gène	35
2.4.2.3	Évaluation indirecte de la gène par la mesure de charge cognitive	35
3	Le laboratoire d'écoute	39
3.1	Description	39
3.1.1	Introduction	39
3.1.2	Caractérisation acoustique de la salle	40
3.1.3	Le système de reproduction sonore spatialisée	42
3.1.3.1	Description	42
3.1.3.2	Définition du "crossover"	44
3.1.3.3	Définition des retards	45
3.1.3.4	Égalisation des moniteurs	45
3.1.3.5	Les modèles de restitution	50
3.2	Stratégie d'utilisation du système de restitution	52
3.2.1	Choix des sources	52
3.2.2	Filtrage du bâti	52
3.2.2.1	Méthode	52
3.2.2.2	Prolongement en hautes fréquences	53
3.2.2.3	Extrapolation basses fréquences	54
3.2.3	Spatialisation sonore	54
3.2.3.1	Rayonnement de paroi	54
3.2.3.2	Auralisation des contributions directes et indirectes	55
3.2.3.3	Méthode de filtrage des signaux sonores	57
3.3	Conclusion	58
4	La sémantique des sources	59
4.1	Contexte de l'étude	59
4.2	Le perçu	59
4.2.1	Les sources sonores	59
4.2.1.1	Introduction	59
4.2.1.2	L'intérieur du logement	60
4.2.1.3	Bruit d'impact	60
4.2.1.4	Parties communes	60
4.2.1.5	Les voisins adjacents ou de dessus	61
4.2.1.6	L'extérieur	62
4.2.2	Les performances du bâtiment	64
4.3	La procédure, la mesure	65
4.3.1	Évaluation subjective et questionnaire	65
4.3.2	Procédure	65
4.4	Résultats	68
4.4.1	Origine des sons	68
4.4.2	Analyse par Composantes Principales	69
4.4.3	Formation de 2 groupes d'individus	72
4.4.4	Conclusion	75

5	Superposition des sources	77
5.1	Contexte de l'étude	77
5.2	Filtrages de bâti	77
5.3	Sélection de sources typiques	77
5.4	Méthode	80
5.5	Résultats	83
5.5.1	Sources du voisin non-musicales	83
5.5.1.1	Émergence de points de vue	83
5.5.1.2	Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées	87
5.5.2	Cas particulier d'une source de façade : Les sons de nature	89
5.5.2.1	Émergence de points de vue	89
5.5.2.2	Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées	89
5.5.3	Sources musicales Pop. et classique du voisin : Stratégies d'optimisations	90
5.5.3.1	Émergence des points de vue	90
5.5.3.2	Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées	92
5.5.4	Compréhension des groupes formés	94
5.5.4.1	Le choix de ventilation	94
5.5.4.2	Les préférences musicales	95
5.5.5	Le design sonore impacte-t-il la perception d'agrément ?	96
5.5.6	Quantification en gain sonore de l'amélioration d'agrément	98
5.5.7	Questionnaire	99
5.6	Conclusion	100
5.7	Vers une sélection de sources	101
6	Confort / Gêne dans le bâtiment	103
6.1	Contexte de l'étude	103
6.1.1	Sélection des systèmes constructifs	103
6.1.2	Sélection des sources	105
6.1.3	Approche cognitive	109
6.1.3.1	La lecture	109
6.1.3.2	Le Raisonnement Grammatical (RG)	111
6.1.4	Procédure	112
6.1.4.1	Entraînement à la lecture	112
6.1.4.2	Entraînement au jeu de R aisonnement G rammatical (RG)	113
6.1.4.3	Test d'écoute dans le bruit	113
6.2	Résultats	115
6.2.1	Méthodologie d'analyse	115
6.2.2	Évaluation subjective de la gêne	115
6.2.2.1	Introduction	115
6.2.2.2	Émergence de points de vue	116
6.2.2.3	Effet d'ordre	124
6.2.2.4	Effet des conditions sonores	125
6.2.3	Mesures de performances	131
6.2.3.1	La lecture	131
6.2.3.2	Le raisonnement grammatical RG	142
6.2.4	Conclusion	154

7 Conclusion générale	157
7.1 Résumé des principaux résultats obtenus	157
7.1.1 Le studio d'écoute	157
7.1.2 La sémantique des sources individuelles	158
7.1.3 Les effets de composition de plusieurs sources	158
7.1.4 Les performances du bâtiment	159
7.2 Discussion	160
7.2.1 La méthode	160
7.2.2 Les choix d'auralisation	160
7.2.3 Les isollements aux bruits d'impacts	161
7.2.4 L'absence d'effet de l'amélioration de l'isolement basses fréquences . . .	161
7.3 Perspectives	161
A Questionnaire du premier test d'écoute	163
B Analyse par Composantes principales	177
B.1 Présentation des données	177
B.2 Principe général dans \mathbb{R}^K	178
B.2.1 Approche	178
B.2.2 Choix du nombre d'axes à conserver	179
B.3 Application de l'Analyse par Composantes Principales (ACP) dans \mathbb{R}^I	184
C Tableau de données du premier test perceptif sur la sémantique des sources (Chapitre 4)	187
D Résultats du test perceptif sur la superposition des sources (Chapitre 5)	191
E Questionnaire du second test d'écoute	205
F Tâche de lecture : Détail des textes utilisés	209
Bibliographie	221

Liste des figures

1.1	Distribution des sujets selon leur sensibilité au bruit (<i>A</i>), ou leur âge (<i>B</i>); (valeurs moyennes indiquées par des traits pointillés).	6
1.2	Répartition des sujets selon leur catégorie socio-professionnelle.	6
1.3	Caractérisation du panel de sujets selon des variables socio-démographiques. Variables de Genre (<i>B</i>), psychologiques : Quality of Life (QoL) (<i>D</i>), et de satisfaction à l'égard du confort acoustique au domicile(<i>E</i>), et descriptives du logement habité : Présence de pièce calme (<i>C</i>), et statut d'occupation du logement(<i>A</i>)).	9
2.1	Résultats du sondage TNS 2010 - Question : Parmi les bruits liés aux activités, quel est celui qui vous gêne le plus ? Source : (BEDEAU et al. 2010).	18
2.2	Comparaison des résultats de gêne aux questionnaires perceptifs Akulite (en bas : 0 = Pas du tout, 10 = Extrêmement) et Acoubois (en haut : 1 = Pas du tout, 5 = Extrêmement). Sources : (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a; QUALITEL 2016).	19
2.3	Graphique représentant les résultats de l'enquête perceptive de Hongisto - Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a); les indices à la fin de la dénomination de chaque source décrivent la localisation de chacune de ces sources : (o) : extérieures au bâtiment (n) : issues des logements voisins (s) : issues des couloirs et cages d'escalier (b) : autre sources issues de l'intérieur du bâtiment.	25
3.1	Modélisation du laboratoire de restitution sonore spatialisée. La croix correspond à la position de la source omnidirectionnelle utilisée pour mesurer la réponse de la salle au centre de l'espace d'écoute.	39
3.2	Isolements acoustiques mesurés selon la norme ISO16283-1 2014 et indicateurs globaux calculés selon la norme ISO717-1 2013 : entre la salle d'écoute et l'appartement voisin [■ vert], entre la salle d'écoute et la régie [▲ rouge], entre la régie et le laboratoire voisin [● bleu], et entre l'extérieur et la salle d'écoute [◆ bleu ciel].	40
3.3	Temps de réverbération mesuré dans la salle d'écoute avant et après pose de panneaux absorbants.	41
3.4	Visualisation 3D du placement des panneaux absorbants dans le studio d'écoute.	41
3.5	Mesures au point d'écoute central de la salle de restitution sonore : Fonction de transfert normalisée obtenue en effectuant la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle avant et après la pose d'absorbant dans la salle d'écoute.	42
3.6	Photographies du laboratoire de restitution sonore spatialisée (la Maison Internationale de la Recherche (MIR) , Neuville sur Oise).	43
3.7	Schéma de fonctionnement du processeur audio Yamaha DME 64N - Crossover défini comme l'association de deux filtres Low Pass Frequency (LPF) , et High Pass Frequency (HPF)	44
3.8	Courbe de réponse du moniteur audio Yamaha HS7 (Données fabricant).	44
3.9	Représentation 2D du salon d'écoute avec positionnement des points de mesure pour la caractérisation de la réponse impulsionnelle.	47

3.10	Fonctions de transfert des 16 chaînes de transmissions, par application de la méthode de caractérisation de FARINA (2000).	47
3.11	Diagramme de la méthode d'égalisation de chaque chaîne de transmission. Source : (RAMOS et LOPEZ 2006).	48
3.12	Schéma représentant le premier mode d'une salle parallélépipédique aux murs rigides.	49
3.13	Fonction de transfert du caisson de basses Genelec 7070A sans et avec égalisation par filtres en cascades Infinite Impulse Response (IIR).	49
3.14	Fonctions de transfert de chaque chaîne de transmission - (A) Avant égalisation, et (B) Après égalisation.	50
3.15	Schéma de fonctionnement de la méthode de restitution sonore spatialisée Vector Based Amplitude Panning (VBAP) développée par PULKKI (1997).	51
3.16	Représentation des chemins de transmission de bruit aérien entre locaux - Source : ISOVER Saint-Gobain.	53
3.17	Isolement in situ DnT d'une façade vitrée composée d'un simple vitrage 1.45 x 1.40 m - Deux options d'extrapolations basses fréquences sont évaluées.	54
3.18	Schéma du modèle simplifié d'auralisation employé.	55
3.19	Courbes d'isollements in situ par chemin de transmission estimées selon la norme ISO12354-1 2017 pour deux types de séparatifs voisin : (A) Briques creuses ; (B) Cloison SAD160.	56
4.1	Schéma des catégories sémantiques utilisées pour composer les scènes sonores issues de l'extérieur.	63
4.2	Courbes d'isollements aux bruits aériens entre locaux et de façade déterminées en application des normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017.	64
4.3	Plans de coupes du bâtiment utilisé pour les calculs d'isollements acoustiques (Source : Acoubat, CSTB) (A) Transversale ; (B) Longitudinale.	66
4.4	Photo d'une participante au premier test d'écoute.	66
4.5	Capture d'écran de l'interface utilisateur sur tablette tactile utilisée pour effectuer le premier test d'écoute.	67
4.6	Distributions d'agréments sonores pour les stimuli écoutés à deux reprises de deux provenances différentes. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. ♦ : Valeur moyenne ; - : Valeur médiane.	68
4.7	Diagramme de corrélation projeté sur les deux plus grandes dimensions de variabilité. Les flèches correspondent aux corrélations des variables par rapport aux deux premiers facteurs de l'ACP. Le gradient de couleur révèle la qualité de projection de chaque variable et est mesuré par l'indicateur \cos^2 , tel qu'il est décrit à l'équation B.9, dans l'annexe B, page 186. La flèche bleue désignée par le label "Means" représente la corrélation du vecteur de l'agrément moyen sur l'ensemble des sujets avec les deux principaux facteurs de ACP.	70
4.8	Représentation des stimuli sur le diagramme de corrélation de l'ACP.	71
4.9	Profil d'agrément sonore pour les deux groupes d'individus dont les goûts musicaux diffèrent.	72
4.10	Classement d'agrément moyen des stimuli et écarts-types associés (-50 = Très désagréable ; +50 = Très agréable).	73
4.11	Dendrogramme des participants issu de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) suivant la méthode de Ward.	73
4.12	Comparaison des groupes issus de la CAH - Agrément moyen par groupe en fonction de la scène sonore et répartition des sujets.	75

5.1	Évolutions temporelles (en secondes par pas de 1 sec.) des niveaux sonores en dB(A) pour les 12 stimuli utilisés au test 2.	79
5.2	Spectres en tiers d'octaves des niveaux sonores équivalents sur 30s notés $L_{eq,30s}$ en dB(A).	79
5.3	Description de l'interface utilisateur.	82
5.4	Diagramme de corrélation issu de l'ACP effectuée sur le sous-ensemble des réponses ayant comme source de bruit du voisin les travaux de perceuse.	84
5.5	Diagrammes de corrélation des résultats de l'ACP.	86
5.6	Diagramme de corrélation issu de l'ACP effectuée sur le sous-ensemble des réponses ayant comme source de bruit du voisin la fête (musique et éclats de voix) chez le voisin.	87
5.7	Cas de sources intrusives du voisin : Enfants adjacent, Fête, Travaux, et TV Doc. Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les deux points de vues dominants mis en évidences. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées "1 2 3" et "1 3 2" en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.	88
5.8	Diagramme de corrélation des résultats de l'ACP pour le sous-ensemble des données pour lequel les sons de Nature interviennent.	89
5.9	Cas des sons de nature : Résultats moyens des niveaux sonores par provenance de source. Mise en évidence des deux stratégies dominantes. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.	90
5.10	ACP : Résultats des diagrammes de corrélations pour les deux sources musicales intrusives du voisin.	91
5.11	Cas de la musique Pop. : Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les trois points de vues dominants mis en évidences. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les trois stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.	92
5.12	Cas de la musique classique jouée à la guitare : Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les deux points de vues dominants mis en évidence. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.	93
5.13	Distributions des comparaisons d'agréments sonores entre les deux scénarios optimisés : la scène la moins agréable comparée à celle la plus agréable pour chaque couple de sources sonores étudié. -50 = Beaucoup moins agréable ; +50 = Beaucoup plus agréable / ♦ : Valeur moyenne ; - : Valeur médiane.	97

5.14	Comparaisons d'agréments estimées à partir d'une analyse post-hoc via un calcul des moyennes marginales "emmeans" sur le modèle linéaire défini pour l'ANOVA. -50 = Beaucoup moins agréable; +50 = Beaucoup plus agréable; Intervalle de Confiance (IC) à 95%; les observations individuelles des sujets sont représentées par des cercles en nuances de gris.	98
5.15	Distributions des gains appliqués aux ambiances sonores les moins agréables. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. ♦ : Valeur moyenne; - : Valeur médiane.	99
5.16	Évaluation de la longueur du test par les participants. Question à choix multiples : "Comment évaluez-vous la durée de ce test?".	99
5.17	Évaluation de la difficulté du test par les participants. (1 = Très facile; 5 = Très difficile). Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. ♦ : Valeur moyenne; - : Valeur médiane.	100
6.1	Isolements normalisés calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isolements aux bruits aériens venus de l'extérieur, et entre deux locaux; les coefficients C et C_{tr} sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.	104
6.2	Enregistrements des stimuli spatialement restitués par la chaîne audio du laboratoire dans le salon d'écoute à deux points de mesures centrés sur le centre d'écoute à l'aide d'un couple de microphones classe 1 01-dB. Les spectres en tiers de bandes d'octaves sont suivis par un tableau récapitulatif des niveaux sonores équivalents $L_{Aeq,15min}$	106
6.3	Niveaux sonores en dB(A) des enregistrements des stimuli spatialement restitués par la chaîne audio du laboratoire dans le salon d'écoute moyennés sur les deux points de mesure autour du centre d'écoute à l'aide d'un couple de microphones classe 1 01-dB.	108
6.4	Photo présentant le positionnement des doigts pour l'activité de lecture.	109
6.5	Capture d'écran de l'interface utilisateur General User Interface (GUI) du jeu de RG. 111	
6.6	Captures d'écrans de l'interface utilisateur dans deux cas de réponses du sujet : (A) lorsque la réponse donnée est correcte (B) lorsque la réponse donnée est incorrecte. 113	
6.7	Capture d'écran de l'interface utilisateur GUI du questionnaire d'évaluation subjective de la gêne sonore.	113
6.8	Capture d'écran de l'interface utilisateur GUI du questionnaire d'évaluation de la tâche de RG.	114
6.9	Distributions des réponses subjectives de gêne en fonction des différentes conditions de bâti en fonction de la question posée (gêne dans la lecture, pendant le jeu des symboles, et au global. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. ○ blanc : Moyenne; - : Médiane).	116
6.10	Graphique des évaluations moyennes de gêne sonore par participant sur l'ensemble des quatre conditions sonores (A) : Gêne dans le jeu de RG en fonction de la gêne globale; (B) : Gêne dans la lecture en fonction de la gêne globale.	117
6.11	Distributions des réponses de gênes par sous-groupes en fonction des quatre conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles, des médianes (-) et moyennes (○ blanc).	118
6.12	Détails des réponses individuelles de gêne pour certains sujets du groupe 2 en fonction de la condition sonore.	119

6.13	Distributions des réponses de gènes par sous groupe final en fonction des quatre conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles, des médianes (traits noirs) et moyennes (cercles blancs).	120
6.14	Distributions de sensibilité au bruit des participants en fonction de leur appartenance aux groupes formés au test 3. Les valeurs moyennes de chaque distribution sont représentées par une ligne pointillée.	121
6.15	Taux de bonnes réponses moyens aux questions de compréhensions des textes pour les quatre sujets n'ayant pas un score satisfaisant.	131
6.16	Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANALYSIS OF VARIANCE (ANOVA) pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.	132
6.17	Distributions des temps de lecture par ligne de texte en fonction de l'ordre du cycle de lecture. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. (–) Valeur Médiane; (*) Valeur moyenne.	133
6.18	Temps de lecture moyen par ligne de texte.	134
6.19	Distributions des temps de lecture moyens par ligne de texte en fonction des différentes conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.	135
6.20	Distributions des temps de lecture moyens par ligne de texte en fonction des différentes conditions sonores croisées avec les ordres de sessions de lecture. Estimations moyennes par la méthode des moindres carrés et intervalles de confiance à 95 %.	136
6.21	Distributions des taux de bonnes réponses aux questions de compréhension en fonction des différentes conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.	139
6.22	Distributions des temps de réponse aux questions de compréhension en fonction de l'ordre de la session. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.	140
6.23	Distributions des temps de réponses aux questions de compréhension en fonction de la condition sonore. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.	141
6.24	Performances des sujets au test de RG. (A) : Temps de réponses moyens (4 conditions sonores après l'entraînement) en fonction du taux de bonnes réponses; (B) : Distribution des taux de bonnes réponses en fonction de la catégorie d'âge.	142
6.25	Taux de bonnes réponses des sujets à la tâche de RG en fonction de l'ordre de la session - Les tests post-hoc de Wilcoxon révèlent les différences significatives par paires de distributions entre les ordres 1 et 3, et entre les ordres 1, et 4. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. (–) Valeur Médiane; (*) Valeur moyenne.	146
6.26	Taux de bonnes réponses moyens des sujets à la tâche de RG en fonction des deux facteurs d'ordre et de conditions sonores. Estimation par la méthode des moindres carrés et intervalles de confiance à 95 %.	148

6.27	Taux de bonnes réponses moyens des sujets à la tâche de RG en fonction des deux facteurs d'ordre et de conditions sonores. Seuls les résultats des 3 ^{ème} et 4 ^{ème} ordres sont conservés. Les tests post-hoc de Tukey révèlent les différences significatives par paires de distributions. Les résultats sont symbolisés par des lettres a, et b. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. (–) : Valeur Médiane; (*) : Valeur moyenne.	150
6.28	Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANOVA pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.	151
6.29	Temps de réponse des sujets à la tâche de RG en fonction de l'ordre de la session. Les tests post-hoc de Tukey révèlent les différences significatives par paires de distributions; Les résultats sont symbolisées par des lettres a, et b. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles, des 1 ^{er} et 9 ^{ème} déciles. (–) : Valeur Médiane; (*) : Valeur moyenne.	152
6.30	Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANOVA pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.	153
B.1	Schéma des catégories sémantiques utilisées pour composer les scènes sonores issues de l'extérieur.	178
B.2	Décroissance du pourcentage d'inertie expliquée par axe de l'ACP.	179
B.3	Représentation des stimuli sur le diagramme de corrélation de l'ACP.	180
B.4	Diagrammes de corrélation représentant les deux plus grandes dimensions de variabilité. (a) Principe général, et (b) Exemple d'application issu de l'ACP effectuée sur les résultats au premier test d'écoute décrit au chapitre 4.	181
B.5	Profils d'agrément sonore en fonction du stimulus audio (a) Participant P47, (b) Participant P51, et (c) Profil d'agrément moyen sur l'ensemble des sujets.	183
B.6	Profil d'agrément sonore des sources musicales évaluées par les participants P21, et P31 au test perceptif présenté au Chapitre 4.	184
B.7	Représentation des variables suivant l'hypersphère de rayon 1.	185

Liste des tableaux

1.1	Tableau décrivant l'appartenance de chaque participant aux catégories de sensibilité et d'âge.	7
2.1	Tableau comparatif de la sélection des sources évaluées pour les deux études. Source : (BEDEAU et al. 2010; BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014)	17
2.2	Tableau comparatif de deux questionnaires in situ - Akulite Vs Acoubois. Sources : (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a; QUALITEL 2016).	20
2.3	Tableau comparatif des sources sonores proposées dans les questionnaires perceptifs Acoubois, et Hongisto. Source : (QUALITEL 2016; HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a).	22
2.4	Description des six classes de bâtiments - Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a).	23
2.5	Tableau décrivant les résultats de l'enquête perceptuelle d'Hongisto. Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). Les indices à la fin de la dénomination de chaque source décrivent la localisation de chacune de ces sources : (o) : extérieures au bâtiment (n) : issues des logements voisins (s) : issues des couloirs et cages d'escalier (b) : autre sources issues de l'intérieur du bâtiment.	24
3.1	Valeurs de retard temporel (en <i>ms</i>) appliquées à chacune des 16 chaînes de transmissions.	45
4.1	Description des stimuli sonores.	61
4.2	Performances acoustiques des éléments constructifs utilisés pour le test perceptif. L'indicateur global R_w a été calculé selon le standard ISO 717/1.	64
4.3	Indicateurs globaux calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isolements aux bruits aériens venus de l'extérieur, et entre deux locaux ; les coefficients C et $C_{r,r}$ sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.	65
4.4	Différences moyennes pour les paires de stimuli sonores : Test de Student apparié.	68
4.5	Répartition des sujets en fonction de leurs préférences musicales déterminées à partir du calcul de corrélation de chaque sujet avec la seconde dimension de l'ACP présentée à la Figure 4.7.	72
4.6	Description des groupes de la CAH par des variables quantitatives.	74
5.1	Répartition des sujets en deux groupes définis en fonction de la corrélation de chaque sujet avec les secondes dimensions des ACPs présentées aux Figures 5.4, 5.5, et 5.6. Le groupe VMC+ correspond au groupe de sujets ayant tendance à augmenter la source de ventilation pour masquer la source du voisin, et le groupe VMC- est constitué de sujets ayant plutôt préféré baisser le niveau de cette source de ventilation.	94
5.2	Répartition du nombre de sujets par sous-groupe formé à la CAH du test 1 croisé avec chacun de ceux formés au test 2 et lié au choix de la source masquante.	94

5.3	Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part, les groupes formés au premier test d'écoute référent à la tolérance aux sons intrusifs et d'autre part, les groupes formés au second test d'écoute en fonction de leurs choix de source masquante (Ventilation ou source de façade).	94
5.4	Répartition des sujets en deux groupes définie en fonction de la corrélation de chaque sujet avec la première dimension de l'ACP présentée à la Figure 5.10a. Les participants indiqués en rouge sont les sujets ayant effectué un transfert de groupe entre les tests 1, à 2. (Groupe 1p : corrélation positive; Groupe 2p : corrélation négative).	95
5.5	Répartition du nombre de sujets dans les sous-groupes formés au test 1 (en fonction des préférences musicales) croisés avec ceux formés au test 2.	95
5.6	Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les comparaisons d'agréments par paires de stimuli (Voisin | Façade); Obtenu sous \mathcal{R} via la fonction $aov_{ez}()$ issue de la librairie Analysis of Factorial EXperiments (AFEX).	97
6.1	Indicateurs globaux calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isollements aux bruits aériens entre deux locaux, et venus de l'extérieur; les coefficients C et C_{tr} sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.	105
6.2	Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de sensibilité au bruit en fonction des groupes formés au test 3.	121
6.3	Test de Student : Comparaison des distributions de sensibilité pour les deux groupes finaux formés au test 3.	121
6.4	Répartition des sujets dans les deux points de vues finaux définis en fonction de leurs résultats aux questions subjectives de gêne. Les participants ayant changé de groupe entre les deux tests (tests 1, et 3) sont indiqués en rouge.	122
6.5	Répartition du nombre de sujets par sous-groupe formés au test 1 croisés avec ceux formés au test 3.	122
6.6	Répartition du nombre de sujets par sous-groupe de préférence musicale formé au test 1 croisé avec chacun de ceux formés au test 3.	123
6.7	Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part, les groupes formés au premier test d'écoute référent aux préférences musicales et d'autre part, les groupes formés au troisième test d'écoute en fonction de leurs évaluations de gêne sonore.	123
6.8	Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part les groupes formés au second test d'écoute lors du mixage de la source de musique Pop. et d'autre part les groupes formés au troisième test d'écoute.	123
6.9	Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gêne subjective Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	124
6.10	Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gêne subjective pour le sous-groupe des gênés du test 3. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	125
6.11	Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gêne subjective pour le sous-groupe des non-gênés du test 3. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	125
6.12	Questions de gêne sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gêne perçue.	125

6.13	Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gène : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.	126
6.14	Gêne sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gêne perçue pour le sous-groupe 1 des tolérants non-gênés.	128
6.15	Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gène pour le sous-groupe 1 des tolérants non gênés : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.	128
6.16	Gêne sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gêne perçue pour le sous-groupe 2 final des gênés.	129
6.17	Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gène pour le sous-groupe 2 des gênés : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.	129
6.18	Évaluation de l'effet d'ordre sur le temps de lecture moyen par ligne de texte - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	132
6.19	Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les temps de lecture moyens par ligne de texte - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées.	132
6.20	Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de temps de lecture en fonction de la condition sonore.	134
6.21	Temps de lecture moyen par ligne de texte - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.	134
6.22	Évaluation de l'effet d'interaction Ordre et Condition Sonore sur le temps de lecture moyen par ligne de texte - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	135
6.23	Évaluation de l'effet d'ordre sur le taux de bonnes réponses aux questions de compréhension des textes - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	138
6.24	Taux de bonnes réponses aux questions de compréhension de textes - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.	138
6.25	Évaluation de l'effet d'ordre sur les temps de réponses aux questions de compréhension des textes - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).	139
6.26	Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les temps de réponses aux questions de compréhension de l'activité de lecture - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées. . .	140
6.27	Temps de réponse moyens aux questions de compréhension de texte - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.	140
6.28	Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de taux de bonnes réponses du jeu de RG en fonction de l'âge des sujets.	143
6.29	Test de Student pour comparer les valeurs moyennes des deux distributions par catégorie d'âge pour les résultats au jeu de RG.	143

6.30	Évaluation de l'effet d'ordre sur le taux de bonnes réponses à l'activité de RG - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973). . .	145
6.31	Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les taux de bonnes réponses de l'activité de RG - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées.	145
6.32	Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de taux de bonnes réponses au jeu de RG en fonction de la condition sonore.	146
6.33	Taux de bonnes réponses à l'activité de RG - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.	146
6.34	Performances au RG - Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les taux de bonnes réponses avec pour variable indépendante les facteurs d'ordre et de condition sonore.	147
6.35	Performances au RG - Effets d'interactions entre les facteurs condition sonore et ordre sur les taux de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à deux facteurs. Attention, la normalité des résidus n'est pas assurée.	147
6.36	Test de Student : Comparaison des distributions de niveau de performance pour le groupe constitué des participants ayant écouté la condition sonore C4 à l'ordre 3.	149
6.37	Performances au RG : Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les taux de bonnes réponses aux ordres 3, et 4, avec pour variable indépendante le facteur condition sonore.	149
6.38	Performances au RG - Effet du facteur condition sonore sur les taux de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à 1 facteur - Attention, la normalité des résidus n'est pas satisfaite et seules les données des ordres 3 et 4 sont utilisées pour le calcul.	149
6.39	Performances au RG - Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les temps de réponses et la variable d'ordre.	151
6.40	Performances au RG - Effet du facteur Ordre sur les temps de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à 1 facteur.	151
6.41	Performances au RG - Évaluation de la sphéricité des données (homogénéité des variances pour un plan à mesures répétées) - Test de MAUCHLY (1940) sur les temps de réponses.	153
6.42	Résultats de l'ANOVA univariée de type III en mesures répétées supposant la sphéricité pour mesurer l'effet du facteur condition sonore sur la variable dépendante des temps de réponses des sujets à la tâche de RG.	153

Acronymes

DP	D écrément de P erformance 36
STIt	T ime varying S ound T ransmission I ndex 36
ACP	A nalyse par C omposantes P incipales vi, viii, ix, xii–xiv, 69–73, 83–87, 89–96, 100, 178–181, 184, 185
AFEX	A nalysis of F actorial E Xperiments xiv, 97
ANOVA	A Nalysis O f V ariance xi, xii, xvi, 96, 97, 115, 125, 126, 132–134, 145, 147, 149, 151–153
BC	B riques C reuses 106
BIAP	B ureau I nternational d’ A udio P honologie 7
CAH	C lassification A scendante H iéarchique viii, xiii, 72–75, 94, 122
CRESSON	C entre de R echerche sur l’ E space S onore 12
CSTB	C entre S cientifique des T echniques du B âtiment 18
DDL	D egrés D e L ibertés 94, 121, 123–125, 128, 129, 132, 134, 135, 138–140, 145–147, 149, 151, 153
den	D énominateur 153
ECG	É lectro C ardio G raphie 37
EEG	E lectro E ncéphalo G ramme 37
FCBA	F orêt C ellulose B ois-construction A meublement 18
FIR	F inite I mpulse R esponse 57
GES	G eneralized E ta- S quared 97, 133, 137, 149, 151
GUI	G eneral U ser I nterface x, 65, 80, 82, 111, 113, 114
HF	H autes F réquences 53, 56
HP	H aut- P arleur 45
HPF	H igh P ass F requency vii, 44
IC	I ntervalle de C onfiance x, 97, 98
ICA	I nternational C ommission for A coustics 59
IIR	I nfinite I mpulse R esponse viii, 47–50, 58, 157

LPF	Low Pass Frequency vii, 44
MCH	Modified Cooper-Harper scale 36
MIR	Maison Internationale de la Recherche vii, 2, 3, 39, 43, 44, 51, 58, 122, 157
N/A	Numérique / Analogique 43
num	Numérateur 153
OMS	Organisation Mondiale de la Santé 11
ORTF	Office de Radiodiffusion Télévision Française 52
OW	Overall Workload 36
QoL	Quality of Life vii, 7, 9, 74
RG	Raisonnement Grammatical v, x–xii, xv, xvi, 4, 109, 111–118, 125, 126, 129, 142–155, 160
RTLX	Raw Task Load Index 36
SCe	Somme des Carrés des Écarts 97, 153
SCr	Somme des Carrés Résiduels 153
SCt	Somme des Carrés Totale 147, 149, 151
SEA	Statistical Energy Analysis 52, 64
SETRA	Service d’Etude sur les TRANsports 29
SWAT	Subjective Workload Assessment Technique 36
TLX	Task Load Index 36
TMM	Transfer Matrix Method 52
TR	Temps de Réverbération 40, 41
VBAP	Vector Based Amplitude Panning viii, 51, 54, 58, 157
WFS	Wave Field Synthesis 51
XLR	eXternal Line Return 43

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et motivation

L'étude du confort acoustique suscite un intérêt croissant pour l'évaluation de la qualité environnementale d'un bâtiment. Les effets produits par des nuisances sonores ou par un environnement inconfortable se manifestent notamment sur la santé (trouble de santé psychologique pour des habitations domestiques, stress au travail pour des bâtiments à visée professionnelle etc.), le bien-être ou la productivité. Ces répercussions sont importantes et le coût qu'engendre une mauvaise gestion du bruit dans nos sociétés a récemment été estimé à 57 milliards d'euros par an (EY 2016). 86% d'un panel représentatif de la population française jugent les nuisances sonores au domicile gênantes contre 85% au travail (BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014). La production de publications scientifiques est croissante en la matière (ALHARR et al. 2016) et malgré le besoin d'un consensus sur la définition et les critères du confort acoustique (TU901 2011), les recommandations normatives sur les objectifs à atteindre varient considérablement en termes de descripteurs, de gammes de fréquences considérées et de niveaux et sont parfois, selon les pays, contradictoires avec les textes législatifs (RASMUSSEN 2010 ; RASMUSSEN 2018). Les indicateurs uniques caractérisant les performances acoustiques des systèmes constructifs ne prennent pas en compte la richesse des sources sonores perçues dans un bâtiment. Le contenu spectral des sources sonores étant variable, certains indicateurs sont mieux adaptés pour quantifier la performance acoustique vis à vis d'un type de sources sonores plutôt qu'un autre. Cette dépendance entre la typologie de sources sonores et l'isolement acoustique passif du bâtiment rend difficile la mise en évidence de critères de performances absolus adaptés à toute situation (N.-G. VARDAXIS et BARD 2018). L'entreprise Saint-Gobain qui a financé ce projet dans le cadre d'une convention Cifre travaille au développement de matériaux et systèmes constructifs dans le domaine de l'isolation et du traitement acoustique. Aujourd'hui, les objectifs de Recherche et Développement concernant ces systèmes s'inscrivent dans une perspective globale d'amélioration du confort de l'utilisateur. Cet objectif de confort est multi-sensoriel et accorde une dimension importante à la qualité de l'environnement sonore.

Pour pouvoir améliorer la qualité des environnements sonores dans lesquels évoluent les usagers de bâtiments, les liens entre sources de bruit, performances acoustiques et confort perçu doivent être mieux compris : les termes du confort doivent être définis, des grandeurs perceptives pertinentes doivent être identifiées et des indicateurs mesurables physiquement doivent être sélectionnés ou proposés afin que les relations entre critères objectifs et subjectifs soient bien établies. Les objectifs de cette thèse sont donc multiples. D'une part, la notion de confort acoustique dans le résidentiel doit être précisée. Deuxièmement, des indicateurs objectifs de performances constructives doivent être confrontés au ressenti subjectif des usagers des bâtiments. Enfin, une méthodologie doit être élaborée pour étudier le confort acoustique dans ces bâtiments. Cette méthodologie doit être conçue pour être, le cas échéant, appliquée à différents contextes (logement, école, bureaux, etc.).

Dans le cadre de cette thèse, deux contextes ont été étudiés, celui des bureaux ouverts (analyse bibliographique et étude in situ (MALGRANGE et DEDIEU 2018)), et le contexte de logement résidentiel. Dans le contenu de ce manuscrit, un seul contexte de bâtiment sera étudié, celui du logement résidentiel en milieu urbain. Pour atteindre cet objectif, un laboratoire d'acoustique perceptive a été développé à la MIR de CY Cergy-Paris université recréant ce contexte résidentiel. Des tests d'écoutes seront mis en œuvre au sein de ce laboratoire en application de la méthodologie qui aura été préalablement établie. Cette approche va permettre de se focaliser sur l'environnement sonore comme objet d'étude. Elle offre donc l'avantage de maîtriser le contexte physique, et l'environnement sonore produit pour créer des expériences répétables. Dans ce contexte de laboratoire, l'être humain sera étudié dans son rapport à l'environnement sonore (approche en général choisie par les acousticiens), et non pas comme objet d'étude à part entière (approche souvent choisie par les sociologues).

1.2 Problématique

Dans ses travaux et notamment dans le cadre de l'action européenne COST TU0901 qui s'est achevée en 2013, Rasmussen définit le confort acoustique comme une situation où : les sons non désirés sont absents, les sons désirés ont un niveau sonore correct, les activités sont possibles sans gêner son voisin (RASMUSSEN 2010). Si l'on s'appuie sur cette définition, une réduction de la gêne sonore allant jusqu'à sa disparition devrait aboutir à une amélioration du confort. Si l'on veut étudier le confort, il semble donc important de regarder les nombreuses recherches qui se sont intéressées à la gêne due au bruit.

La gêne peut être observée de deux manières différentes, selon que l'on écoute le bruit de façon active ou bien que l'on entende ce bruit de façon passive. Dans le premier cas, un bruit écouté peut produire une réaction immédiate de désagrément, liée à une signature sonore inadaptée pour l'auditeur. Dans le second cas, le bruit n'est pas écouté, mais il est subi. La gêne sonore peut alors correspondre à la perturbation d'une ou plusieurs activités (ce bruit me gêne pour écouter la télévision, ou pour me reposer, etc.), ou bien elle peut correspondre à un sentiment durable de gêne vis-à-vis de l'environnement sonore (globalement, je suis gêné par l'environnement sonore dans mon cadre de vie).

L'étude du désagrément sonore ou de l'agrément sonore relève du champ disciplinaire du « design sonore » où l'on s'intéresse uniquement à la qualité du son écouté, dans une approche purement psycho-acoustique. Cette approche de laboratoire, qui peut permettre dans un premier temps de bien comprendre la signification des sons désirés ou non désirés, ne peut pas s'appliquer telle quelle à une étude sur le confort car le confort est forcément lié à une activité. Il faut alors aborder le sujet avec une approche plus cognitive, qui place l'individu dans un contexte d'interaction avec son environnement.

Les travaux sur le confort acoustique doivent ainsi s'intéresser à la non-perturbation de tâches du quotidien. Dans les travaux sur la gêne sonore de court terme étudiée en laboratoire, divers types de tâches mobilisant des fonctions cognitives différentes ont été utilisés : tâche de mémorisation classique (écoute puis restitution d'informations) avec par exemple une étude de Lavandier (LAVANDIER et al. 2011), ou mémorisation sérielle avec par exemple une étude de Banbury (BANBURY, MACKEN et al. 2001), ou tâche d'attention (STROOP 1935), ou encore tâche de lecture simple avec par exemple une étude de Kostallari (KOSTALLARI et al. 2018). De toutes ces études, il semble que la charge sonore subie par les participants ralentisse l'exécution des tâches. C'est à

travers cette approche cognitive que le confort acoustique dans un habitat pourra être étudié dans le cadre de la thèse. Diverses dispositions constructives, ainsi que la présence de sons désirés ou non dans l'environnement sonore devront alors être testées pour couvrir une large gamme de contextes sonores. Enfin, le confort étant une notion subjective, des facteurs personnels influent les attentes des individus. La prise en compte de ces facteurs est nécessaire pour une meilleure compréhension des attributs du confort acoustique.

1.3 Originalité et objectif de la recherche

Afin de répondre à cette problématique, et dans une recherche d'objectivation du confort acoustique en logement résidentiel qui prenne en compte à la fois la diversité des sources sonores perçues, les performances du bâti, et des facteurs personnels, une méthodologie originale a été conçue. Cette méthodologie s'est construite suivant une approche de laboratoire afin de maîtriser notre objet d'étude, l'environnement sonore en logement résidentiel urbain.

1.3.1 Une méthodologie originale

Cette méthodologie s'articule autour de trois tests perceptifs successifs qui se sont déroulés sur environ un an de Mai 2018 à Juillet 2019 dans le laboratoire situé à la MIR de l'université de CY Cergy Paris. Un panel de sujets a été recruté pour effectuer cette série de tests. En suivant ce panel de sujets invariant tout au long des travaux, les préférences individuelles et points de vues typés seront caractérisés. Les deux premiers tests préliminaires sont dédiés à l'étude des sources écoutées individuellement ou en composition. Ils visent à caractériser ces préférences individuelles à l'égard de la grande variété de sources sonores perceptibles dans un logement résidentiel. Une fois l'analyse des deux premiers tests préliminaires terminée, le rapport des sujets aux diverses sources sonores sera mieux compris et la variabilité inter-individuelle sera caractérisée. Sur la base de ces résultats, une sélection de sources sera faite et utilisée pour le dernier test d'écoute. Ce test final vise à rendre compte de l'effet de travaux de rénovation (simulés en laboratoire) d'un bâtiment ancien des années 1920-1940 sur la diminution de la gêne. Puisque dans ce dernier test, seules les performances du bâtiment varient, un choix de sources (invariantes tout au long du test) a été effectué. L'influence de la sémantique de ces sources finalement choisies devait au préalable être bien comprise et maîtrisée. Les tests préliminaires ont été conçus dans ce but.

L'articulation des trois tests est proposée en commençant par la description des deux premiers tests préliminaires.

1.3.1.1 Caractérisation des préférences individuelles

Dans un premier temps, des sources sonores typiques seront écoutées individuellement et évaluées sur une échelle d'agrément. Une écoute attentive est requise afin que les participants jugent de l'agrément des sons. Ce premier test d'écoute est présenté au Chapitre 4. Ce premier passage pour les participants sera aussi l'occasion de récolter des données socio-culturelles et psychologiques pertinentes pour l'étude. Dans un second temps, les participants seront invités à revenir pour effectuer un second test d'écoute qui sera présenté au Chapitre 5. En contraste avec le premier test d'écoute, l'écoute attentive s'effectuera avec des environnements sonores composés d'une combinaison de sources sonores superposées aux provenances variées. Des capacités de contrôle de l'environnement sonore seront données aux participants pour qu'ils expriment leurs préférences en fonction de la provenance de sources (voisin, extérieur au bâtiment, intérieur au logement) et de leurs typologies (musique, nature, trafic, etc.). Les deux premiers tests sont donc complémentaires. Les stratégies des sujets pour contrôler l'environnement sonore pendant la seconde l'expérience pourront être interprétées à l'aune des préférences révélées au premier test d'écoute. Ce second test

viendra confirmer ou infirmer les interprétations des résultats du premier test d'écoute.

Ces deux premiers tests consistent donc à évaluer l'agrément de sources sonores écoutées individuellement (Chapitre 4) ou en combinaison de plusieurs provenance (Chapitre 5) pour révéler les points de vues typés des participants sur les sons plus ou moins désirés/agréables dans leur environnement. Des facteurs socio-culturels et psychologiques seront étudiés pour juger de leur influence sur les réponses des sujets. De ces deux premiers tests, des sources sonores consensuelles pourront être mises en évidences et serviront de bases pour évaluer l'effet des performances du bâtiment.

Car à la fin de ces deux tests, deux objectifs n'auront cependant pas encore été traités : l'effet des performances du bâtiment et la mesure de confort acoustique approchée par une étude de gêne. En effet, l'approche psycho-acoustique suivie pour les deux premiers tests et définie au prochain chapitre ne permet pas de caractériser le confort acoustique en logement résidentiel. En effet, le confort peut être étudié en laboratoire à condition de se placer dans une approche cognitive d'écoute distraite (Cf. Chapitre 2, Section 2.4.2) et sera l'objet du troisième et dernier test d'écoute.

1.3.1.2 Effet des performances du bâti

Le confort acoustique se caractérise par rapport à un contexte (un lieu, une activité). L'effet des performances acoustiques du bâtiment sera finalement évalué au troisième test d'écoute suivant une approche cognitive pour révéler si l'amélioration des performances des systèmes constructifs influe sur la perception de confort acoustique. Pour cette évaluation, un contexte de logement dans un ancien bâtiment (simulé) des années 1920-1940 a été retenu pour rendre compte de l'effet de quelques options de rénovation de différentes parties du logement (Façade, Séparatif voisin) sur le confort ressenti. Des activités seront proposées aux sujets pour qu'ils ne se concentrent pas sur l'environnement sonore. Une activité de lecture simple ainsi qu'une tâche de RG difficile seront proposées aux participants. Pendant la réalisation de ces activités, des mesures seront effectuées pour quantifier l'effet des différentes situations sonores sur les participants. Deux types de mesures seront effectuées : des mesures subjectives de gêne ressentie, et des mesures de performances (temps de lecture, temps de réponse, taux de bonnes réponses). Ce troisième test vise à approcher finalement la notion de confort perçu dans un salon de logement résidentiel par une approche cognitive effectuée en laboratoire, en connaissant au préalable les préférences individuelles qui peuvent influencer sur les évaluations. Ainsi si des différences apparaissent, elles pourront être mieux comprises par l'analyse des résultats précédents et la connaissance fine des participants.

Puisque le panel de sujets est conservé pour l'ensemble des trois tests, il s'agit de définir les critères prépondérants pour décider du recrutement des sujets. Sur quels critères est-il préférable de les recruter ? Quels sont les facteurs révélés influents sur la perception de confort acoustique au domicile. La sélection du panel est décrite à la Section 1.3.2.

1.3.2 Sélection d'un panel

L'analyse bibliographique qui sera présentée en Section 2.3.2 page 31 révélera les facteurs influant la perception de confort au domicile. Parmi ces facteurs, le statut d'occupation (Locataire / Propriétaire), l'ancienneté dans le logement, l'âge, la densité de population dans la ville de résidence, et la catégorie socio-professionnelle sont les cinq variables socio-démographiques qui sont ressorties de l'analyse. La sensibilité au bruit a également été révélée influente sur l'évaluation de gêne, et d'agrément. Pour pouvoir tester l'influence d'une variable descriptive, un minimum de 15 sujets par modalité est requis. Le panel étant constitué au maximum de 60-70 participants, la

sélection du panel ne peut se faire en fonction de tous ces critères. La décision de sélectionner le panel en fonction de seulement deux variables croisées a été retenue. Au total, quatre catégories ont été définies correspondant à deux catégories d'âge croisées avec deux catégories de sensibilité au bruit :

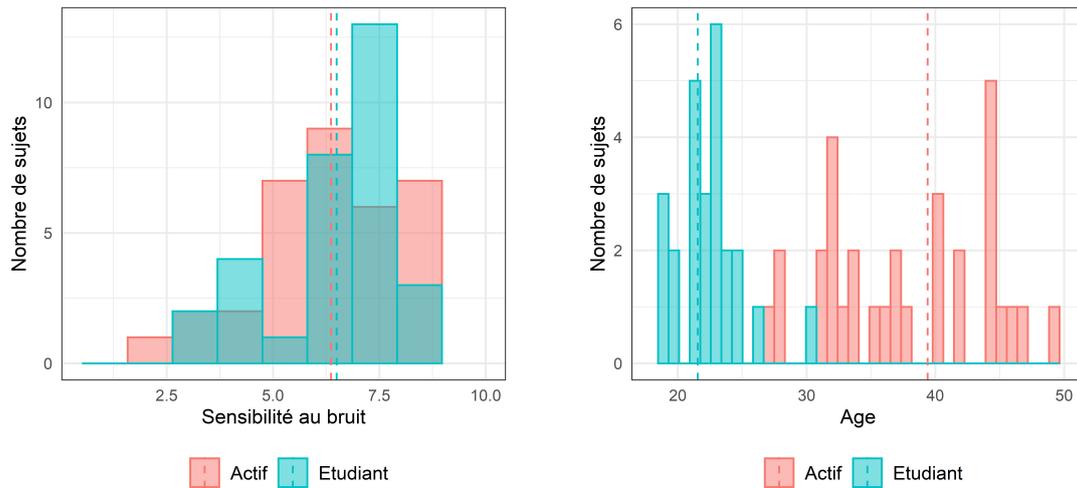
- Étudiants entre 18-30 ans ne vivant plus chez leurs parents, vivant actuellement en appartement en milieu urbain ou péri-urbain, et ayant grandi dans un environnement urbain ou péri-urbain (30 personnes) ;
- Actifs actuellement en activité, âgés entre 27 et 50 ans, vivant depuis plus de 10 ans dans leur appartement, et ayant grandi en environnement urbain ou péri-urbain ; (30 personnes).

Deux options de séparation des tranches d'âges ont été envisagées : 18-40, 40-60 ou celle finalement retenue des 18-30, 30-50. Les échanges avec la sociologue Hélène Subrémon, croisés avec l'analyse bibliographique ont aidé à la prise de décision. Les points de vues des 18-30 ans et des 30-50 ans semblent plus homogènes. Les besoins des 18-30 ans, leurs modes de vie devraient être plus cohérents. L'absence de sujets de plus de 50 ans est remarquable et s'explique par le manque de temps et de moyens disponibles pour intégrer cette catégorie d'âge dans l'étude. Nous avons donc choisi de ne pas avoir de participants à la retraite. Au final, 65 participants sont allés au bout des trois tests.

La seconde variable descriptive étant la sensibilité au bruit, le panel des auditeurs devra respecter une segmentation en deux sous-groupes : 50 % d'individus sensibles voire très sensibles au bruit et 50 % de participants peu sensibles voire pas sensibles au bruit. L'évaluation de la sensibilité au bruit a été effectuée lors de la première expérience et s'appuie sur le questionnaire de Griefahn (GRIEFAHN 2008). La valeur de sensibilité de chaque participant est d'abord calculée sur une échelle de 0 à 3 puis transformée en une échelle de 0 à 10. Avec le panel de sujets recruté pour ces expériences, il n'a pas été possible de recruter suffisamment de sujets peu sensibles. Pour maintenir une répartition suffisamment homogène, la valeur pivot utilisée pour déterminer l'appartenance d'un participant au groupe des plus sensibles ou au contraire à celui des moins sensibles est de 6.5. Les distributions de sensibilité au bruit calculées à partir du questionnaire de Griefahn sont présentées à la Figure 1.1a. Avec une valeur médiane de sensibilité à 6.5, ce panel est constitué d'un noyau de sujets important entre 5.5 et 7.5. On remarque l'absence de sujets extrêmement sensibles, comme de sujets pas du tout sensibles. Les participants de l'étude ont été identifiés par des labels commençant par la lettre "P" et se finissant par un indice unique pour préserver leur anonymat. Pour repérer à quelle catégorie de sensibilité et d'âge/situation professionnelle chaque sujet appartient, le Tableau 1.1 détaille les groupes constitués. La distribution d'âge des sujets est également fournie à la Figure 1.1b. 3 sujets ont moins de 30 ans et appartiennent tout de même au groupe des actifs en raison de leur activité professionnelle. Les étudiants ont pour la plupart entre 18 et 25 ans.

Des informations socio-démographiques, psychologiques, et relatives au logement occupé par les participants sont détaillées aux Figures 1.2, et 1.3. La Figure 1.2 décrit la répartition des sujets en fonction de leur catégorie socio-professionnelle. Le panel est composé à 48 % d'étudiants. Parmi les actifs, plus de la moitié sont employés.

La Figure 1.3 est constituée de 5 sous-figures. La Figure 1.3a décrit la répartition des sujets en fonction de leur statut d'occupation dans leur logement. 3/4 des sujets sont locataires, et le dernier quart est propriétaire. Bien que le statut d'occupation semble influencer sur les attentes en termes de confort acoustique des habitants, la répartition non-homogène des sujets selon ce critère d'occupation rend difficile la mesure de cet effet dans notre étude car un trop faible nombre de sujets est propriétaire. Les critères fixés initialement nécessitant environ une moitié d'étudiants



(A) Sensibilité au bruit (0=Pas du tout sensible ; 10=Extrêmement sensible)

(B) Age

FIGURE 1.1 – Distribution des sujets selon leur sensibilité au bruit (A), ou leur âge (B) ; (valeurs moyennes indiquées par des traits pointillés).

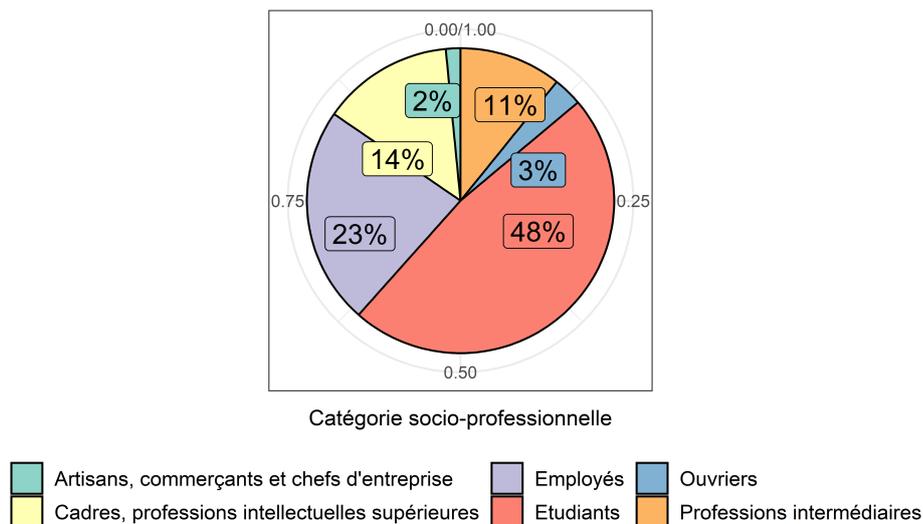


FIGURE 1.2 – Répartition des sujets selon leur catégorie socio-professionnelle.

rendait difficile voire impossible l'obtention d'une parité entre locataires et propriétaires. Le panel est constitué à 60% de femmes et 40 % d'hommes. La parité n'est pas respectée. L'analyse bibliographique disponible à la Section 2.3, p.31 a révélé l'absence d'effet du genre sur les résultats d'études sur le confort acoustique dans son logement. En conséquence, il n'apparaissait pas utile d'imposer ce critère de parité en genre pour le recrutement des sujets. La présence de pièce calme dans son logement peut être contributive de la sensation de confort acoustique. Les résultats du questionnaire montrent que 54% des sujets du panel ne possèdent pas de pièce calme contre 46% qui en bénéficient. Ce critère pourra donc être testé dans notre étude. Enfin, une évaluation de la qualité de vie des sujets a été mesurée grâce au questionnaire de Da Rocha (ROCHA et al. 2012). À partir des réponses à 8 questions portant sur des thèmes variés (physique, psychologique, sur l'environnement, et le social), une moyenne est calculée et déterminée sur une échelle de 0 à 4

	Étudiants 18-30 ans	Actifs 30-50 ans
Les moins sensibles $s \leq 6.5$ (1-10)	P18, P19, P34, P41, P43, P48, P50, P51, P55, P57, P64, P67, P68, P69	P2, P5, P8, P15, P20, P23, P27, P30, P32, P36, P37, P40, P44, P52, P56, P59, P61
Les plus sensibles $s > 6.5$ (1-10)	P6, P9, P21, P22, P33, P35, P38, P47, P49, P53, P54, P58, P60, P62, P63, P65, P66	P3 P4 P7 P10 P11 P13 P16 P17 P24 P25 P26 P28 P29 P31 P42 P45 P46

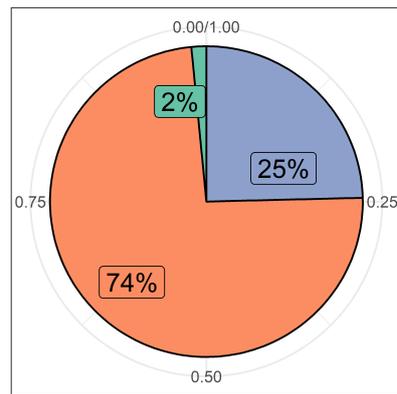
TABLEAU 1.1 – Tableau décrivant l'appartenance de chaque participant aux catégories de sensibilité et d'âge.

le niveau de qualité de vie des participants. Les étudiants ont obtenu un score moyen de QoL inférieur aux actifs. Ils sont donc moins satisfaits à l'égard de leur qualité de vie. Une proportion significative d'actifs estime avoir une qualité de vie moyenne voire plutôt bonne ($2.5 \leq \text{QoL} \leq 3$). Enfin, une question a été finalement posée aux sujets dans le questionnaire pour obtenir leur ressenti concernant le confort acoustique perçu chez eux. Les résultats de cette question sont présentés à la Figure 1.3e. Un large spectre d'évaluations est obtenu allant de sujets très insatisfaits par le confort acoustique dans leur domicile, d'autres ni satisfait, ni insatisfait, et enfin des sujets très satisfaits. En conséquence, les valeurs moyennes sont très centrées sur 3 et l'écart type est important ($SD = 1.3$). Les étudiants de ce panel sont en moyenne plus satisfaits que leur aînés du confort acoustique de leur logement. Ces critères seront ultérieurement testés pour savoir s'ils influent sur la perception des sujets. Enfin, un audiogramme complet est proposé aux participants pour vérifier l'absence de troubles auditifs. Le critère pour déterminer si l'acuité auditive des participants est suffisante pour les évaluations perceptives est donné par l'**Bureau International d'AudioPhonologie (BIAP)** (BIAP 2002).

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire s'articule autour de 6 chapitres. Au prochain Chapitre 2, un état de l'art et une description des différentes approches de laboratoire seront développés afin de justifier l'approche retenue, et le choix d'une méthodologie articulée en trois tests perceptifs. Au Chapitre 3, les moyens matériels sont présentés. Le laboratoire d'acoustique perceptive est d'abord caractérisé en fonction de ses attributs d'acoustique de salle. S'ensuit une description du système de restitution sonore spatialisée. Les différentes stratégies de reproduction sonore spatialisée sont alors introduites. La stratégie retenue pour les tests d'écoute sera explicitée et les raisons justifiant ce choix seront développées. Enfin, les stratégies de simulation pour rendre compte du filtrage de bâti seront explicitées. Le chapitre suivant (Chapitre 4) est dédié à la présentation, et à l'analyse des résultats du premier test d'écoute dont l'objectif est de mesurer l'agrément sonore des sources typiques d'un environnement de salon d'appartement en milieu urbain prises individuellement. L'analyse fera émerger les préférences individuelles et sera une base de compréhension en vue du développement du second test d'écoute. Ce second test d'écoute est l'objet du Chapitre 5 et se focalisera sur l'étude de la superposition des sources sonores. Il sera articulé de façon analogue au précédent avec une description du test d'écoute et de son protocole suivie d'une analyse des résultats obtenus. Les résultats aux deux premiers tests seront déterminants pour la sélection des sources sonores qui seront impliquées dans le dernier test d'écoute dont l'objectif est de quantifier le confort perçu en fonction de différentes situations de rénovation d'un ancien bâtiment des années 1920-1940

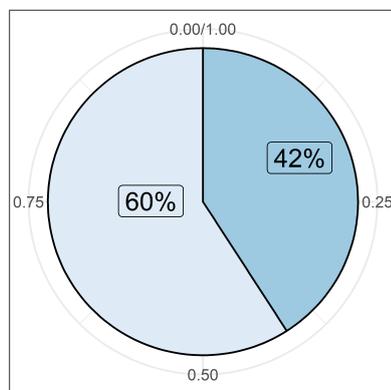
(Chapitre 6). L'approche cognitive choisie donnera accès à des mesures de performances qui seront analysées à l'aide de méthodes statistiques d'analyse de variance. La dernière partie (Chapitre 7) sera consacrée à la conclusion qui rappellera les résultats importants du mémoire et se terminera par une discussion ouverte sur les résultats et la méthodologie mise en place.



Statut d'occupation

■ Hébergé à titre gratuit
 ■ Locataire
 ■ Propriétaire

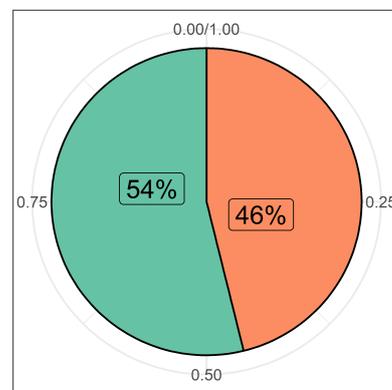
(A) Statut d'occupation du logement



Genre

■ Femme
 ■ Homme

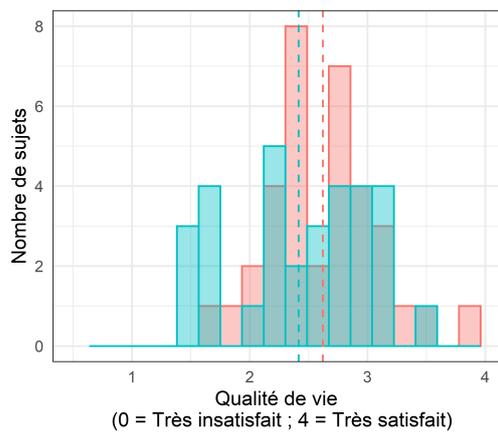
(B) Genre



Pièce calme

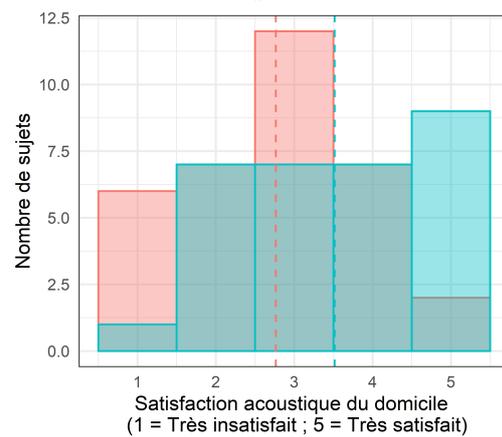
■ Non
 ■ Oui

(C) Présence de pièce calme



(D) Qualité de vie (valeurs moyennes indiquées par des traits pointillés)

■ Actif
 ■ Etudiant



(E) Confort acoustique au domicile (valeurs moyennes indiquées par des traits pointillés)

■ Actif
 ■ Etudiant

FIGURE 1.3 – Caractérisation du panel de sujets selon des variables socio-démographiques. Variables de Genre (B), psychologiques : QoL (D), et de satisfaction à l'égard du confort acoustique au domicile(E), et descriptives du logement habité : Présence de pièce calme (C), et statut d'occupation du logement(A).

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Vers une définition du confort acoustique au domicile

L'analyse bibliographique vise à recenser les diverses définitions du confort acoustique. Peut-on réduire l'étude du confort acoustique à une étude de gêne, de recherche de silence ? Et quels sont les facteurs qui influent sur le confort perçu ?

2.1.1 La gêne et le désagrément

La gêne et le désagrément sont des notions proches, qui selon les définitions, s'entrecroisent. Les dictionnaires donnent par exemple des définitions montrant que la frontière entre ces deux notions est ténue. "gêne : subst.fem. [...] 2. *Désagrément*, charge imposés par quelqu'un, quelque chose : Causer une gêne à quelqu'un." (extrait du Larousse en ligne, Édition 2020). De même, dans les dictionnaires de synonymes de langue française, "gênant" et "désagréable" sont synonymes l'un de l'autre. Il semble que ce soit aussi le cas en anglais : "unpleasant : adj. [...] 2. Very unpleasant or annoying" (extrait du dictionnaire Ultralingua).

Cependant, certaines études marquent une frontière plus nette entre ces deux notions. Pour des études en laboratoire, Ellermeier décrit le concept de gêne comme étant associé aux interférences avec d'autres tâches à réaliser (ELLERMEIER, EIGENSTETTER et al. 2001 ; ELLERMEIER, MADER et al. 2004). Puisque dans le cadre de leurs études, les sujets étaient dans une écoute attentive des stimuli audio, la notion de gêne ne convenait pas car le concept de gêne est donc plus souvent utilisé en référence aux interférences avec d'autres tâches à réaliser dans un contexte d'écoute distraite (GUSKI 1997). Il évaluèrent donc le désagrément. En effet, la notion de gêne est plus associée à l'évaluation du bruit dans un contexte donné plutôt que simplement basée sur les aspects perceptifs de la qualité et de l'intensité (BERGLUND et al. 1990). En contraste avec la gêne, l'évaluation d'agrément ou de désagrément est alors plutôt un indicateur de qualité sonore obtenu par l'intermédiaire d'une écoute focalisée sur le son.

D'autre part, la gêne est considérée comme susceptible d'avoir un impact sur la santé.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) considère que l'exposition au bruit peut entraîner une gêne définie de façon large comme "une sensation de désagrément, de déplaisir provoquée par un facteur de l'environnement dont l'individu ou le groupe connaît ou imagine le pouvoir d'affecter sa santé". Dans les textes de lois européens, elle est simplement définie comme "le degré de nuisance généré par le bruit dans l'environnement, déterminé par des enquêtes sur le terrain" (CONSEIL EUROPÉEN 2002).

Peut-on approcher la notion de confort acoustique par l'étude de la gêne sonore ainsi définie ? Le paradoxe explicité dans la suite de cette étude bibliographique vient questionner ce lien entre gêne et confort.

2.1.2 Le paradoxe

Les facteurs influents le confort acoustique sont de diverses natures et rendent discutable l'invérifiable équation Silence = Confort / Bruit = Gêne (CHELKOFF et al. 1991). Le confort sonore est souvent réduit à la recherche d'absence de gêne. Il en découle du point de vue de l'acousticien que le meilleur moyen pour empêcher cette sensation de gêne est de permettre le silence dans le domicile (ne pas entendre son voisin, les équipements du bâtiment...). Une mise en perspective de tous les éléments du confort dans l'espace sonore du domicile est cependant proposée en préambule.

Au Centre de Recherche sur l'ESpace Sonore (CRESSON), des travaux de recherche se sont intéressés à délimiter les contours du confort acoustique. Chelkoff constate que de nombreuses pratiques quotidiennes "passent" par le canal sonore (CHELKOFF et al. 1991). Il développe son propos : « Dire qu'elles "passent" signifie non seulement qu'elles se font entendre mais qu'il existe des protocoles, des manières de faire, des codes et des modes, à quelque niveau de sociabilité que ce soit (famille, voisinage, public, privé) qui régissent le monde sonore et lui confère une dimension symbolique ». Cette dimension symbolique du monde sonore ne peut être définie uniquement par des aspects essentiellement quantitatifs et physiques. Chelkoff montre à titre d'exemple qu'une bonne isolation n'empêche pas l'intolérance aux bruits encore perceptibles du voisin (CHELKOFF et al. 1991). Ce résultat est confirmé par les recherches de Defrance (DEFRANCE 2017). Dans ses travaux de thèse, Defrance prouve l'absence de corrélation entre performances d'isolation et gêne sonore perçue en raison des bruits de vie nocturne rue Oberkampf, à Paris (DEFRANCE 2017). Bien qu'il ne remette pas en cause l'effet d'une bonne isolation de façade sur la réduction perceptive des nuisances sonores, il rend compte de l'influence prépondérante du degré de tolérance de l'habitant sur la réponse en gêne. L'évaluation subjective de l'environnement sonore par l'habitant engendre donc des attitudes typées. Des facteurs psycho-sociaux domineraient dans la caractérisation du confort acoustique devant les facteurs objectifs des performances en isolation acoustique. Cependant, ces résultats suggèrent que des nuisances sont encore perceptibles, et donc que l'isolement acoustique n'est pas suffisant. Des recherches sociologiques menées par Augoyard et ses collègues tendent d'ailleurs de décrire les différents types d'attitudes et réactions aux stimuli sonores au domicile (AUGOYARD et al. 1985) (voir la Section 2.3, page 31).

Le paradoxe du confort sonore dans l'espace domestique tient dans la recherche d'équilibre entre le besoin d'isolement et celui de communication. Tout son non désiré et sur lequel l'habitant n'a pas de contrôle est perçu comme une intrusion de l'espace privé. Or, le logement est un lieu dans lequel la sauvegarde de l'intimité est primordiale (CHELKOFF et al. 1991). Dans le même temps, l'espace intime du domicile est un espace dans lequel la liberté d'être faiseur de bruit et d'être entendu est cruciale. Le son, de part le milieu dans lequel il se propage ne connaît pas de frontières clairement délimitées et des nuisances sonores extérieures sont susceptibles d'envahir l'espace privé et contrarier l'intimité de l'individu. Chelkoff met en avant que les sources sonores influentes ne se limitent pas seulement aux bruits du voisins ou ceux de l'extérieur au bâtiment, et souligne l'influence du bruit issu des activités du ménage. Pour tenter de gérer ce paradoxe l'habitant utilise des moyens de contrôle de son environnement sonore.

2.1.3 Les moyens de contrôle

La capacité de l'habitant à pouvoir agir activement sur son environnement sonore est explicitée dans l'ouvrage de Chelkoff (CHELKOFF 1993). Premièrement, en plus du droit au silence qui est de plus en plus revendiqué comme élément de confort, le droit à faire du bruit sans gêner son voisin apparaît également comme un élément influent. Une étude qualitative commandée par ISOVER auprès de l'institut IFOP (PÉREZ-BOUGUET et al. 2017) montre en outre qu'une grande majorité

des sons venant de l'intérieur du logement sont perçus de façon positive parce qu'ils sont générés par les membres du foyer, et qu'ils procurent des émotions positives (Exemple des enfants jouant dans leur chambre ou dormant). Les sons entrants et les sons sortants apparaissent comme deux éléments clés du confort. En fonction des sons entrants perçus par l'habitant, des régulations et adaptations vont s'opérer ce qui influera sur les sons émis par lui-même. Oleksik montre que l'utilisateur est actif dans la gestion de son environnement sonore (OLEKSIK et al. 2008). Parmi les moyens d'actions utilisés par l'utilisateur sont cités la possibilité d'ouvrir ou fermer ses fenêtres, la fermeture ou ouverture des portes intérieures du logement, ainsi que l'usage récurrent du contrôle de volume sur les équipements électroniques (Télévision, radio, équipements Hifi). Ce contrôle du volume varie et reflète des stratégies d'adaptation des usagers. En fonction des autres activités génératrices de sons qui entrent en compétition, le volume est ajusté dans un équilibre visant à écouter sans contraindre l'autre dans son activité. Oleksik rend compte que le volume sera réduit en fonction des personnes présentes dans la pièce pour permettre des activités multiples ou pour marquer un changement de rythme de la famille (avant d'aller dormir, le niveau sonore "global" baisse).

Le sociologue Bull décrit dans son ouvrage les stratégies adoptées pour obtenir ce droit à la privatisation de l'espace sonore en décrivant le phénomène Ipod (BULL 2007). Il décrit la privatisation du rythme audio où chacun habite sa propre réalité. On parle ici d'une "mise en scène musicale" qui repose sur une alternance de musique et de silence. Puisque le lieu de vie n'est pas toujours le cadre serein que l'on souhaite, pour s'en échapper l'utilisateur trouve des niches de calme qui peuvent créer des réalités sonores très variées dans le même foyer. La présence de pièce calme dans le logement permet également d'obtenir ce droit à la privatisation (ÖHRSTRÖM et al. 2006).

Un autre élément du confort sonore au domicile s'appuyant sur cette notion de contrôle concerne les bruits extérieurs au bâti. Un élément du confort sonore serait de maîtriser, et de rendre accessible l'ambiance extérieure au logement. Citons Debard(2004) : « La captation des éléments naturels pour qu'ils soient présents dans la maison est un moyen pour des architectes de solliciter les sens des habitants. (...) Entendre la pluie, sentir l'air chez soi sont des sensations que le confort moderne et ses normes avaient fait oublier et que tentent de réhabiliter des architectes (...) ». Des pistes de développements ont alors été avancées pour améliorer les conditions de confort dans le logement et ce sera l'objet de la section suivante ci-dessous.

Selon Chelkoff, le confort sonore se construit, s'élabore. La part créative, active de l'habitant pour façonner l'espace sonore de son domicile est finalement essentielle dans le processus qui mène au sentiment de confort. La notion de temporalité est explicitée dans son ouvrage dont voici une citation : « La dimension du temps est aussi cruciale dans les usages quotidiens, ainsi la séparation des fonctions dans l'espace limite difficilement les sons produits, certains appareils sont alors employés à des moments déterminés où chaque membre de la famille sait qu'elle dispose d'un créneau de temps de silence. Le temps de l'usage se révèle alors déterminant dans l'appréciation du confort sonore » (CHELKOFF 1993). Toujours dans cette idée de réglage des sons produits dans le temps, Chelkoff décrit les phénomènes de synchronisation et de désynchronisation permettant de superposer ou de séparer des activités. La représentation du confort par l'habitant est par conséquent indexée par le temps chronologique qui règle tout vécu sonore. Puisque l'individu s'approprie son espace sonore dans le temps et développe des stratégies d'adaptation pour rendre cet espace sonore confortable, l'objectif premier devrait être de créer un potentiel de confort. Le potentiel de confort qui est alors proposé dépend de deux composantes : le cadre physique du logement et la création de contextes estimés satisfaisants par les habitants. Plusieurs éléments sont alors mis en avant mais tous concernent principalement des préoccupations internes au foyer. Est mis

en avant le rôle des portes pour s'isoler ou bien au contraire permettre la communication. Il rend compte de l'importance des pièces de transitions utilisées comme canal de diffusion et permettre en même temps une atténuation du signal source. Chelkoff rend compte des plaintes récurrentes de la faible isolation phonique des cloisons internes au logement (CHELKOFF 1993). Enfin, il met en évidence les nouvelles pratiques d'isollements individuelles par l'utilisation d'écouteurs comme mis en évidence plus récemment par Bull (BULL 2007).

Les moyens de contrôle des sons entrants et sortants restent cependant limités. Premièrement, il reste difficile de se rendre compte de ce que perçoit l'autre (le colocataire, autre membre de la famille, voisin, passant) en raison de sa propre activité. Deuxièmement, la capacité de se couper des sons extérieurs reste elle aussi limitée. Des propositions de moyens de contrôle plus élaborés sont imaginés et décrits Section 2.1.4

2.1.4 Vers des moyens plus élaborés de contrôle

Pour Oleksik et ses collègues, de nouveaux appareils technologiques pourraient être développés (OLEKSIK et al. 2008). Le premier appareil s'appelle le baromètre sonore. Son fonctionnement consisterait à rendre compte du "feed-back" clair de son empreinte sonore dans les autres pièces du logement ou même chez le voisin. Le second appareil est un relais sonore sélectif qui viendrait indiquer l'usage d'un appareil domestique bruyant actionné par un membre du ménage. Il s'agirait d'un indicateur d'évènements spécifiques.

Enfin, des travaux de recherches menés par Amphoux et Leroux rendent compte des éléments sur lesquels agir pour réduire les nuisances sonores issues du voisin (AMPHOUX et LEROUX 1989).

1. Effets élémentaires :
 - Réverbération
 - Filtrage
2. Effets de composition sonore :
 - Reprise : Répétition réglée et identique d'un motif sonore ;
 - Coupure : Chute soudaine d'intensité ;
 - Mur : impression de mur intense et sans prise pour l'usager ;
 - Bourdon : une hauteur reste constante et sans variation ;
 - Ubiquité : Impossible d'identifier la source.
3. Effets liés à l'organisation perceptive :
 - Synecdote : Valorisation d'un son ou d'un groupe de sons ;
 - Irruption : Événement sonore imprévu ;
 - Lombard : Vigilance augmentée avec l'intensité.
4. Effets psychomoteurs :
 - Enchaînement : enchaînement de sons et de réponses d'abord non conscientes ;
 - Attraction : un phénomène sonore attire l'attention et module le comportement.
5. Effet sémantique : Décalage, dé-contextualisation du son qui apparaît inconnu
6. Autres effets du son :
 - Synchronisation : le rythme du son s'accompagne d'effet sur le comportement ;

- Dé-synchronisation : le son rompt un rythme comportemental ;
- Hyperlocalisation : focalisation de l'attention sur une source changeante ;
- Intrusion : sons présents dans un espace intime ;
- Suspension : sentiment d'incomplétude de la source sonore ;
- Perte : un son qui est donné à la cantonade, témoigne d'une angoisse

Ces réactions au stimulus sonore de l'habitant déterminent le confort perçu par celui-ci.

2.1.5 Synthèse et proposition d'une définition

L'habitant construit activement du confort sonore dans son logement. La recherche du développement de potentiel de confort serait plus adaptée pour que l'usager du bâtiment façonne son espace sonore en fonction de ses besoins singuliers. Ce potentiel de confort permet à l'habitant d'avoir un contrôle actif sur son environnement sonore qu'il peut façonner dans le temps et ajuster en fonction des activités en cours dans son voisinage. Les différentes composantes sur lesquelles l'on peut agir pour réduire les nuisances sonores au domicile ont été définies et dépendent de facteurs physiques (isolation acoustique, réverbération). Elles sont liées à la sémantique des sources, et à l'interaction entre les sources perçues et les activités réalisées par l'habitant (synchronisation, désynchronisation, etc.).

Ces éléments complètent la définition donnée par Rasmussen qui rapproche la notion de confort avec celle de gêne couplée avec la sémantique des sons (désirés ou non) pour une activité (RASMUSSEN 2010). Le droit à faire du bruit sans gêner autrui apparaît comme une dimension influant la notion de confort perçu. Dans la suite des travaux de thèse, l'approche de laboratoire choisie (voir la Section 2.4) requiert de focaliser les recherches sur certains aspects du confort acoustique. La notion de temporalité ainsi que l'étude des moyens de contrôle ne seront pas vraiment abordés. Les travaux se limiteront à l'étude de l'agrément, et de la gêne en accord avec la définition proposée par Rasmussen : les sons non désirés sont absents, les sons désirés ont un niveau sonore correct, les activités sont possibles sans gêner son voisin (RASMUSSEN 2010). Cette définition doit être circonscrite à des contextes spécifiques en fonction des activités qui y sont exercées. La suite de l'analyse bibliographique porte sur ces sons. Une diversité importante de sources entoure l'usager de bâtiment. Comment toutes ces sources sont-elles catégorisées dans la littérature ? Elles peuvent être caractérisées en fonction des grandeurs objectives à l'aide d'indicateurs développés par la communauté psycho-acoustique (sonie, rugosité, force de fluctuation, etc.), mais aussi en fonction de la sémantique, les attributs qui permettent à l'individu de donner du sens à ce qu'il entend. Quelle est l'influence de la sémantique sur la perception ? Pendant les travaux de thèse, l'analyse bibliographique portant sur la sémantique des sources s'est intéressée à deux contextes de bâtiments : les bureaux ouverts, et les logements résidentiels (DEDIEU, LAVANDIER et CAMIER 2017). La prochaine partie s'intéresse aux sources sonores qui peuvent être perçues dans un logement résidentiel en milieu urbain.

2.2 La sémantique des sources perçues au domicile

L'objet de cette section est de renseigner l'ensemble des catégories de sources de bruits pertinentes à étudier dans le contexte du bâtiment résidentiel. Les différentes typologies de sources seront identifiées au travers d'une revue de littérature. La plupart des études sur le sujet suivent une approche in situ d'analyse de réponses à des questionnaires. L'analyse de la formulation des questionnaires et des résultats associés éclairera sur les typologies de sources sonores estimées pertinentes pour le contexte de logement résidentiel. L'ensemble des études se basent sur des

questionnaires fermés pour évaluer le confort sonore perçu dans le bâtiment. Dans l'ensemble de la revue bibliographique, deux origines de sources sont discriminées, les sources intérieures au bâti et les sources provenant de l'extérieur. En ce qui concerne les sources intérieures au bâti, les sources de bruit sont classées en fonction de leur provenance : intérieur au logement, issues des parties communes, et en provenance des voisins (dessus/dessous et sur les côtés). Pour chacune des provenances, deux familles de bruits sont définies, celle issue des bruits d'équipements, et celle issue de la vie quotidienne.

2.2.1 État des lieux des sources sonores dans le bâtiment

2.2.1.1 Sondages IFOP et TNS-Sofres

Les deux premières études sont dédiées à l'évaluation des français sur le sujet des nuisances sonores (BEDEAU et al. 2010 ; BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014). 1000 personnes ont répondu à l'enquête TNS Sofres et 1001 personnes à l'enquête IFOP. Il s'agit d'évaluer le rapport des populations à leur environnement sonore et de révéler les sources nuisibles. En revanche, ces études ne rendent pas compte des sources sonores agréables puisqu'elles sont orientées vers des mesures de gêne ou de nuisance et non d'agrément. Les panels des deux études sont représentatifs de la population française. On retrouve donc des individus de toutes les catégories socio-professionnelles résidant dans des agglomérations de différentes tailles (communes rural jusqu'aux grandes villes). Une comparaison des types de sources sur lesquelles les sondés ont été interrogés pour ces deux études est proposée dans la Tableau 2.1.

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une source ou un ensemble de sources (nommée "famille") telle qu'elle a été formulée et présentée dans chacun des deux questionnaires. Cela induit que le sondé ne peut pas distinguer son évaluation pour les sources appartenant à une même famille.

Il apparait que l'enquête IFOP ne s'intéresse qu'à peu de sources et que celles-ci sont regroupées en grandes familles : Les équipements du domicile, les bruits liés aux voisins, les activités industrielles et commerciales etc. (BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014). Au sein même d'une famille, des sources de natures très différentes sont mentionnées en guise d'exemple avec pour la famille "Les voisins" un regroupement à la fois des bruits de la vie quotidienne, de ceux issus des travaux et de ceux provoqués par les animaux domestiques est proposé. Peu d'informations sur les nuisances suscitées par des sources spécifiques ne seront extraites des résultats de cette étude. Seuls des renseignements généraux pourront toutefois être retenus. En ce qui concerne les sources issues de l'extérieur du bâtiment et en particulier en provenance de locaux collectifs, seulement 2 familles sont proposées : "les restaurants et cafés" et les "activités commerciales, ou industrielles". Pour les bruits de transports, la liste est complète et les trois principales sources de bruit de transport sont différenciées.

Pour le questionnaire TNS-Sofres (BEDEAU et al. 2010), les propositions de bruits liés aux transports sont identiques à celles du questionnaire de l'IFOP. Pour les autres provenances, la liste y est plus détaillée notamment concernant les bruits liés au locaux collectifs à l'extérieur du bâtiment et pour les sources de bruit intérieures dues à la vie quotidienne.

Les principaux résultats sur l'étude des sources sont résumés ci-après. Les deux classes de bruit les plus nuisibles sont la circulation routière et les voisins (BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014). Bien que d'après l'étude IFOP, les bruits liés aux activités commerciales, et industrielles représentent des sources de gêne de second ordre puisque seulement 5% des questionnés ont choisi ces sources comme première cause de gêne due au bruit, il ressort du sondage TNS Sofres que parmi toutes les sources de bruit appartenant à cette classe, les deux plus gênantes sont celles liées

		Année	TNS Sofres 2010	IFOP 2014
Sources provenant de l'intérieur du bâtiment	Issu des logements voisins	Vie quotidienne	Le volume des conversations ou les cris dans le voisinage	Les voisins (Vie quotidienne, travaux, animaux)
			Le volume des appareils TV Hifi	
			Les déplacements dans l'immeuble (parties communes, bruits de pas ou de chocs de l'étage du dessus)*	
			Les deux roues	
			Les animaux domestiques	
		Equipements	Le bricolage ou le jardinage	Absence
Sources provenant de l'extérieur du bâtiment	Issu de l'intérieur du logement	Vie quotidienne	Absence	Absence
		Equipements	Le fonctionnement de certains équipements individuels ou collectifs des bâtiments (ascenseurs, climatisation, pompes)*	Les équipements du domicile (ventilation, tuyauteries, ascenseurs...)
	Issu des parties communes	Vie quotidienne	Les déplacements dans l'immeuble (parties communes, bruits de pas ou de chocs de l'étage du dessus)*	Absence
Equipements		Le fonctionnement de certains équipements individuels ou collectifs des bâtiments (ascenseurs, climatisation, pompes)*	Absence	
Sources provenant de l'extérieur du bâtiment	Locaux collectifs		Les activités industrielles ou artisanales	Activités commerciales, ou industrielles
			Les activités des bars, restaurant, salles de spectacles et discothèque	Les cafés, restaurants, discothèques
			Les équipements sportifs, scolaires et de loisirs	
			Les commerces	
	Transports		Circulation véhicule	Circulation véhicule
			Circulation ferroviaire	Circulation ferroviaire
			Circulation aérienne	Circulation aérienne
Travaux		Travaux et chantier	Les chantiers de construction, de BTP	
Autre		Les activités liées à l'élevage	Absence	

(*): Création de doublons: Pour l'étude TNS Sofres, la séparation du type de sources de bruit intérieures au bâtiment ne s'est pas effectuée en fonction de sa provenance mais en fonction de sa nature (équipement ou vie quotidienne)

	Vie quotidienne
	Equipements
	Locaux collectifs
	Transports

TABLEAU 2.1 – Tableau comparatif de la sélection des sources évaluées pour les deux études. Source : (BEDEAU et al. 2010 ; BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014)

aux travaux et chantiers (31% des réponses) et celles liées au dépôt et ramassage des ordures (9% des réponses) comme représenté dans la Figure 2.1. Au sein de la catégorie bruit de transports, le bruit lié à la circulation routière est la première source de nuisance devant les trafics aérien et ferroviaire. Parmi les sources de bruit de voisinage, les bruits d'animaux et de voix de voisins ont été mesurés comme les sources de bruit les plus dérangeantes. D'autres études se sont intéressées au confort acoustique au domicile et suivent des approches in situ comparables, elles sont donc présentées conjointement au prochain paragraphe.

2.2.1.2 Enquêtes in situ - Corrélations entre gêne et performances ?

Plusieurs études in situ visant à corrélérer la gêne perçue des habitants avec les performances acoustiques des bâtiments ont été menées. Les résultats des projets Acoubois, et Akulite (QUALITEL 2016 ; BALANANT et al. 2014 ; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a) seront explicités après un paragraphe introductif. Une troisième étude s'inscrit dans cette approche d'étude in situ pour la caractérisation de la gêne corrélée avec les performances acoustiques des bâtiments (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a).

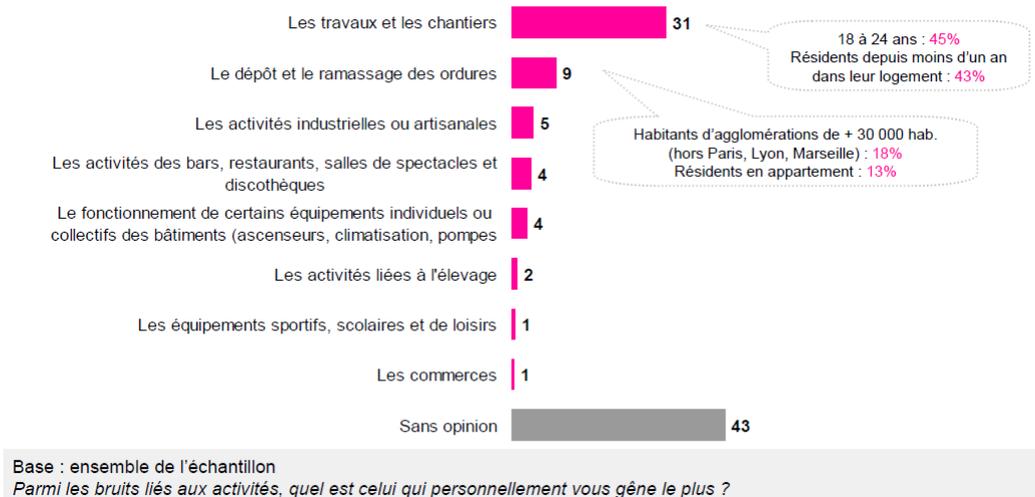


FIGURE 2.1 – Résultats du sondage TNS 2010 - Question : Parmi les bruits liés aux activités, quel est celui qui vous gêne le plus ? Source : (BEDEAU et al. 2010).

Présentation des études L'étude Acoubois a été initiée par l'association QUALITEL (QUALITEL 2016). Elle a été réalisée en partenariat avec le CSTB et l'institut technique de la Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) et est dédiée à l'étude de l'effet des composantes basses fréquences des sons perçus dans deux types de logement ; les logements à ossature bois et ceux à structure béton. Au total, 249 personnes ont été interrogées, 108 résidants dans des logements à structure béton, et 141 résidants dans des immeubles à ossature bois. Cette dernière étude a la particularité de réaliser en plus des mesures in situ des performances aux bruits d'impacts et aériens des logements considérés. Les bâtiments choisis pour l'étude correspondent tous à des opérations certifiées par CERQUAL Qualitel Certification. Cette certification requière de respecter 4 critères acoustiques plus exigeants que ceux imposés par la réglementation :

- Isolement de façade entre 30 et 45 dB ;
- Isolement aux bruits de chocs doit être 3 dB plus performant que celui imposé par la réglementation ;
- Dans le cas d'une VMC double flux dans les chambres : 5 dB plus performant que ce qu'exige la réglementation ;
- Exigences renforcées sur le confort acoustique des circulations communes.

L'étude Akulite est comparable de l'étude Acoubois (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a). Des mesures de performances en isolation aux bruits aériens et aux bruits d'impacts ont été effectuées dans des bâtiments en Suède et des questionnaires perceptifs ont été envoyés aux habitants de ces bâtiments dans le but de mesurer des corrélations entre la gêne déclarée et les performances en isolation. Enfin, une étude Finnoise a été réalisée avec les mêmes objectifs (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). 597 participants ont répondu à un questionnaire d'évaluation de la gêne ressentie dans son logement. Ces trois études seront comparées pour déduire les sources sonores qui ressortent.

Analyse des résultats Les résultats de l'enquête Acoubois montrent que 74% des 249 personnes interrogées déclarent être satisfaites de l'acoustique de leur logement. Ce pourcentage descend à 54% pour les locataires de logements à ossature bois. Plus de 98% des individus interrogés qui vivent en logement à structure béton certifiés CERQUAL Qualitel se sont déclarés satisfaits de l'acoustique de leur domicile. Puisque seuls les résultats des individus insatisfaits de l'acoustique de

leur domicile ont été compilés, le panel ne représente plus que 65 personnes dont la quasi-intégralité vit dans des bâtiments à ossature bois. Cette étude est à mettre en parallèle avec un projet Suédois appelé Akulite mené par Klas Hagberg (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a). Le Tableau 2.2 propose une comparaison de ces deux questionnaires. En contraste avec les deux précédents sondages, une plus grande variété de sources a été testée. La Figure 2.2 présente les principaux résultats des réponses moyennes augmentées de l'écart-type pour les deux questionnaires perceptifs.

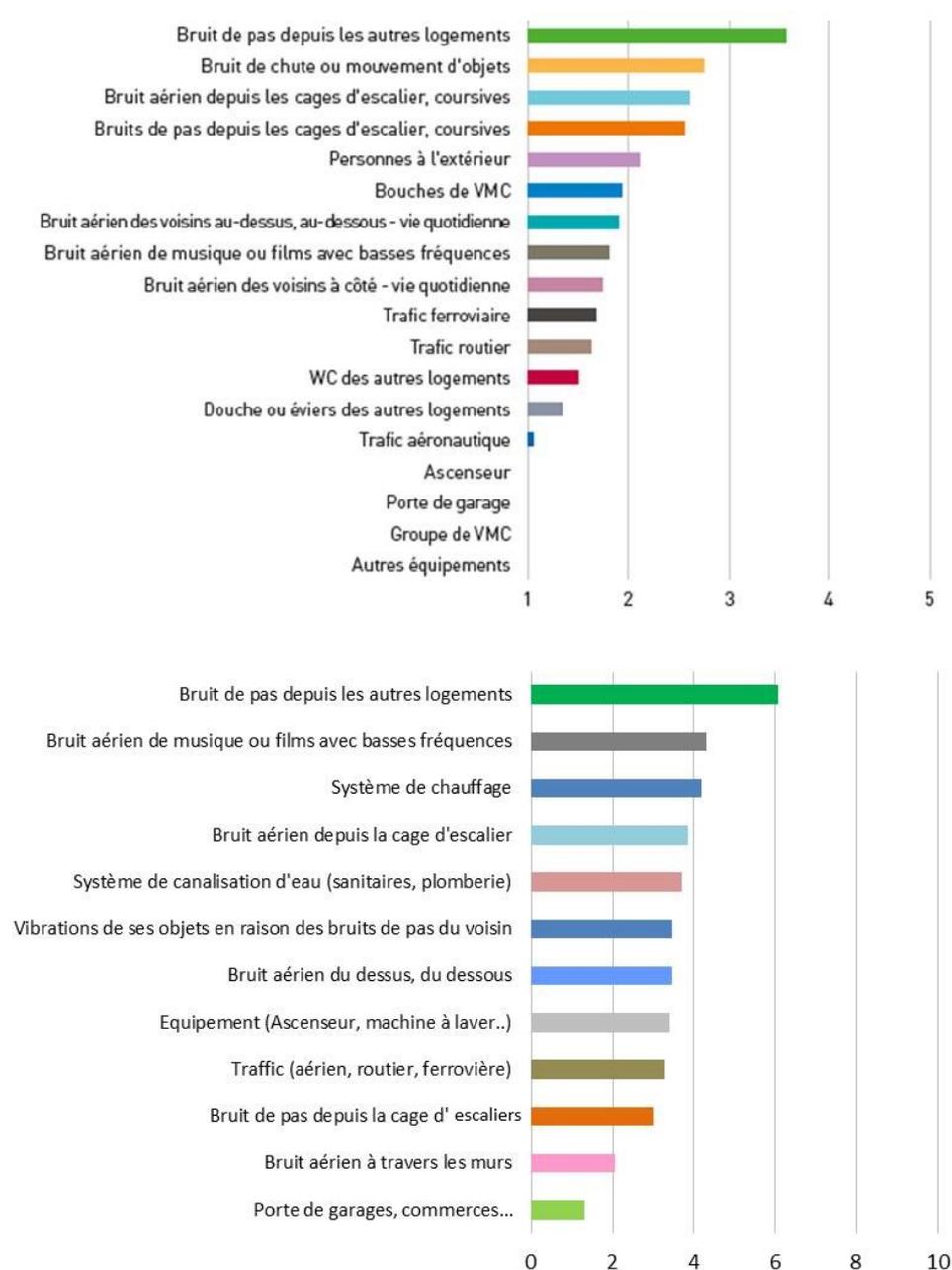


FIGURE 2.2 – Comparaison des résultats de gêne aux questionnaires perceptifs Akulite (en bas : 0 = Pas du tout, 10 = Extrêmement) et Acoubois (en haut : 1 = Pas du tout, 5 = Extrêmement). Sources : (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a; QUALITEL 2016).

Les résultats ne suivent pas la même dynamique pour les deux études. Les sources sont plus distinctement séparées en termes de niveau de gêne dans l'étude Acoubois alors qu'elles sont

		Etude Qualitel / CSTB		Etude Akulite	
Année		2014		2013	
Objectif de l'étude		Qu'en est-il du ressenti des occupants vis-à-vis de la composante basse fréquence dans le résidentiel ?			
Type d'étude		Questionnaire fermé + Mesures acoustiques in situ			
Nombre de sondés		249 (108 béton / 141 bois)		453 (304 béton / 149 bois)	
Mesure de Gêne (Oui / Non)		Oui		Oui	
Echelle		Continue 5 niveaux de absents à présent et très gênant		Continue 10 niveaux! 0= not at all disturbed 10= extremely	
Séparation (Jour/Nuit) ou (Salon/Chambre)		Salon - Chambre 1 - Chambre 2		Indifférentié	
Commentaires		Séparation ossature bois / Structure béton			
Sources provenant de l'intérieur du bâtiment	Issu des logements voisins	Vie quotidienne	Bruit du voisin du dessus/dessous : personne parlant, audio, TV au travers des sols et plafonds	Bruit du voisin du dessus/dessous : personne parlant, audio, TV au travers des sols et faux plafond	
			Bruit du voisin des cotés : personne parlant, audio, TV à travers les murs	Les voisins des cotés: personnes parlant, audio, TV	
			Bruit de pas et capacité de Localisation des bruits	Bruit de pas entendus les voisins marchent sur le sol	
			Transmissions des vibrations des bruits de pas		
		Musique ou film basses fréquences	Musique avec basses et percussions		
		Equipements	WC ou chasse d'eau des autres logements	Installations pour les circuits d'eau: plomberie, WC, douche	
	Douche ou évier des autres logements		Installations de gestion de la température (chaudière, air conditionné, VMC)		
	Machine à laver des autres logements		Installation de service: Ascenseurs, machine à laver, système de ventilation		
	Pompe à chaleur des autres logements				
	Vibrations de la machine à laver				
	Autre à préciser :				
	Issu de l'intérieur du logement	Vie quotidienne	Personne parlant, audio, TV	Sa propre famille: entendu dans son logement avec les fenêtres fermées	
			Bruit venant d'une autre pièce au dessus ou en dessous : personne parlant, audio, TV		
			Musique ou films avec des basses et des percussions		
			Bruit de pas d'une autre personne / Localisation		
		Vibrations de vos propres objets ou mobilier quand quelqu'un marche dans votre logement	Claquements ou tintement des ses propres biens dus aux mouvements de ses voisins du dessus ou dessous		
		Bruit de chute ou mouvement d'objets (raclements de chaises, roulement de billes ...)			
	Equipements	Chaudiere	Installations pour les circuits d'eau: plomberie, WC, douche		
Ballon ECS thermodynamique		Installations de gestion de la température (chaudière, air conditionné, VMC)			
Bouches de VMC					
Autres à préciser:					
Issu des parties communes	Vie quotidienne	Voix de la cage d'escalier et coursives	Voix de la cage d'escalier et coursives		
		Pas de la cage d'escalier et coursives	Pas de la cage d'escalier et coursives		
	Equipements	Ascenseurs	Installation de service: Ascenseurs, machine à laver, système de ventilation		
		VMC			
Porte de garage					
Sources provenant de l'extérieur du bâtiment	Locaux collectifs	Fenetre fermée: Garages, magasins, bureaux, bars, restaurants, laverie ou autre	Locaux: Garages, commerces, bureaux, bars, restaurants, lavomatique ou autre, entendu à l'intérieur fenêtres fermées		
	Transports	Routier	Traffic (voiture, bus, camion, trains, ou avions) entendu de l'intérieur fenêtres fermées		
		Ferroviere			
		Aerien			
	Vivant	Personnes (enfant jouant, personnes parlant,...)	Non posée		
Travaux	Non posée	Non posée			

TABLEAU 2.2 – Tableau comparatif de deux questionnaires in situ - Akulite Vs Acoubois. Sources : (LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a; QUALITEL 2016).

beaucoup plus proches les unes des autres dans l'étude Akulite. Il apparaît toutefois que le bruit de pas provenant des logements voisins représente la source de bruit jugée la plus gênante en Suède comme en France. Parmi les différentes sources de bruits d'impact, un classement de la gêne se dessine et suit le même ordre pour les deux études :

1. Le bruit de pas avec un indice de gêne perceptif respectivement de 3.6/5 et 6/10
2. Le bruit de chute ou mouvement d'objets respectivement 2.8/5 et 3.9/10
3. le bruit de pas depuis les cages d'escalier 2.5/5 et 3/10

Par l'analyse des deux séries de résultats, on remarque que le bruit aérien des voisins traversant les murs latéraux est de second ordre puisqu'elle est classée respectivement à la 9^{ème} et à la 11^{ème} place. Ce résultat doit être mis en contexte avec la plutôt bonne isolation acoustique des séparations qui ont un indice d'isolement acoustique in situ $D_{nT,w} + C$ compris entre 50 et 65 dB selon les logements des deux études. De telles performances semblent permettre une gêne limitée du bruit aérien latéral de voisin.

Le bruit aérien provenant de la cage d'escalier fait partie des sources les plus gênantes. Il serait intéressant de comprendre pourquoi cette source ressort en énonçant les hypothèses suivantes :

- Performance : Isolation trop faible aux bruits aériens du séparatif portes comprises ;
- Psychologie : Par exemple, le manque d'attention du responsable du bruit irritant d'autant plus le résident ;
- Les attributs de la nuisance : Exemple des portes qui claquent : bruit intempestif à forte émergence.

Une source de bruit ressort dans l'étude Akulite et est classée deuxième source de bruit la plus dérangeante, il s'agit du bruit aérien de musique et de film avec basses fréquences. L'étude Acoubois ne recense cette source qu'à la 8^{ème} place. Cette différence de perception reste inexplicée. Parmi les bruits extérieurs, le bruit de personnes dépasse en termes de gêne toutes les autres sources de bruit de trafic (routier, aérien, ferroviaire). Le bruit humain apparaît donc plus gênant que le bruit non-vivant lorsqu'il s'agit de bruit extérieur. Et parmi les bruits de trafic, les bruits de trafic routier et ferroviaire sont équivalents mais sont plus gênants que le bruit de trafic aérien. Enfin concernant les bruits d'équipement, il semblerait qu'il s'agisse de sources de gêne de second ordre, à l'exception des bruits liés aux systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation qui ressortent comme la troisième source la plus gênante dans l'étude Akulite.

Une autre étude s'intéresse aux sources de bruit domestique et les premiers résultats ont été publiés en 2013 (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). Sur le Tableau 2.3 est détaillé l'ensemble des sources de bruit domestique qui ont été évaluées dans le cadre de cette étude. Cette liste de sources est comparée aux sources sonores proposées dans l'étude Acoubois.

Année		Etude Qualitel / CSTB 2014	Etude Finland - Hongisto 2013	
Type d'étude		Questionnaire fermé + Mesures acoustiques in situ	Questionnaire	
Nombre de sondés		249 (108 béton / 141 bois)	597 (19 bâtiments)	
Mesure de Gène (Oui / Non)		Oui	Oui	
Echelle		Continue 5 niveaux de absents à présent et très gênant	Continue 5 niveaux! 1= not at all disturbed 5= very much disturbing	
Séparation (Jour/Nuit) ou (Salon/Chambre)		Salon - Chambre 1 - Chambre 2	Indifférentié	
Commentaires				
Sources provenant de l'intérieur du bâtiment	Issu des logements voisins	Vie quotidienne	Bruit du voisin du dessus/dessous : personne parlant, audio, TV au travers des sols et plafonds	Voix
			Bruit du voisin des cotés : personne parlant, audio, TV à travers les murs	Eclats de rire, cris, pleurs
			Bruit de pas et capacité de Localisation des bruits	Bruit de pas
			Transmissions des vibrations des bruits de pas	Mouvements, chute d'objet
			Musique ou film basses fréquences	Chant - Instrument joué
				TV ou musique
	Equipements	WC ou chasse d'eau des autres logements		
		Douche ou évier des autres logements		
		Machine à laver des autres logements		
		Pompe à chaleur des autres logements	Aspirateur	
		Vibrations de la machine à laver	Ouverture et fermeture de porte	
		Autre à préciser :	Autres bruits d'équipements ménagers	
Issu de l'intérieur du logement	Vie quotidienne	Personne parlant, audio, TV		
		Bruit venant d'une autre pièce au dessus ou en dessous : personne parlant, audio, TV		
		Musique ou films avec des basses et des percussions		
		Bruit de pas d'une autre personne		
	Vibrations de vos propres objets ou mobilier quand quelqu'un marche dans votre logement			
	Bruit de chute ou mouvement d'objets (raclements de chaises, roulement de billes ...)			
Equipements	Chaudière			
	Ballon ECS thermodynamique			
	Bouches de VMC Autres à préciser:			
Issu des parties communes	Vie quotidienne	Voix de la cage d'escalier et coursives	Voix, cris de la cage d'escalier	
		Pas de la cage d'escalier et coursives	Pas de la cage d'escalier et coursives	
	Equipements	Ascenseurs	Ascenseurs	
		VMC	Ouverture et fermeture de porte	
			Radiateurs	
		Porte de garage	Canalisations Air conditionné	
Sources provenant de l'extérieur du bâtiment	Locaux collectifs	Fenêtre fermée: Garages, magasins, bureaux, bars, restaurants, laverie ou autre		
	Transports	Routier	Véhicule provenant de la rue	
		Ferrovière	Camion éboueur, nettoyage, ou déneigeuse	
		Aérien		
	Vivant	Personnes (enfant jouant, personnes parlant,...)	Personnes ou animaux coté cours	
Travaux	Non posée	Personnes ou animaux coté rue Non posée		

TABLEAU 2.3 – Tableau comparatif des sources sonores proposées dans les questionnaires perceptifs Acoubois, et Hongisto. Source : (QUALITEL 2016; HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a).

La première observation est l'absence de questions sur les sources intérieures au logement. En revanche un nombre conséquent de sources de bruit de voisinage et issues des parties communes est proposé avec une répartition assez homogène entre les deux provenances (8 pour les parties communes contre 10 pour les logements voisins). Plus de sources de bruit d'équipement sont listées pour les parties communes (5 contre 3 sources dû aux comportements) et cette tendance est inversée

Type de bâtiment	Année de construction	R'_w [dB] minimal	$L'_{n,w}$ [dB] maximal	$L_{A,eq,07-22}$ [dB] du côté source
A1	2001-2008	55	53	<55
A2	2001-2008	55	53	60-75
A3	2001-2008	55	53	<60
B	1972-1976	52/53	58	<55
C1	1955-1965	52	56	<55
C2	1955-1965	52	56	65-75

TABLEAU 2.4 – Description des six classes de bâtiments - Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a).

lorsqu'il s'agit des logements voisins (3 contre 7). Enfin, pour les sources de bruit extérieures au bâtiment, on remarque l'absence de sources liées aux logements collectifs et parmi les sources de bruit de transport, seul le bruit de trafic est proposé avec une distinction entre les véhicules personnels et les camions éboueurs. Une distinction dans la catégorie vivant entre l'extérieur côté rue et côté cours est à noter. Enfin, on remarque l'absence de certaines sources décrites dans les précédents sondages (toilettes, chasse d'eau, porte de garage, etc.) et la présence de nouvelles sources (l'aspirateur, les éclats de rire, cris et pleurs, le camion éboueur etc.).

Les classes de bâtiments utilisées dans l'étude d'Hongisto sont explicitées au Tableau 2.4 (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). Le choix des immeubles s'est effectué de manière à ce que 6 classes de bâtiments soient représentées en fonction de leur date de construction, de leurs performances acoustiques, et du niveau équivalent de bruit extérieur tiré d'une carte de bruit. Les résultats de l'étude sont donc présentés avec un ensemble de résultats de gêne perçue par type de bâtiment puis la moyenne sur les six classes pondérée par le nombre de répondants pour chacune des classes est calculée. Le tableau 2.5 ci-dessous présente l'ensemble de ces résultats.

Globalement, les niveaux de gêne moyens restent toujours relativement bas quelle que soit la source de bruit puisque l'évaluation la plus critique est obtenue dans la classe C2 avec la source de bruit de trafic qui recueille un score moyen de 2.31 correspondant à un niveau de gêne significatif mais pas très élevé. Toujours de façon générale, les variations des évaluations de la gêne perçue selon les sources restent relativement faibles.

Bien que le classement varie selon les classes de bâtiment, certaines sources font l'unanimité. Le passage des camions éboueurs, l'ouverture et la fermeture de portes issues des parties communes sont deux sources qui ressortent comme parmi les sources de bruit les plus gênantes. Second point, une première importante contradiction par rapport aux deux études précédentes est à relever. Les bruits de pas ne sont pas les sources de bruits considérées comme les plus gênantes et sont plutôt des sources de gêne de second ordre (11ème source la plus gênante sur la moyenne des 6 classes). Rien ne permet a priori d'expliquer cette contradiction. Il apparaît toutefois difficile compte tenu du manque d'informations présentées dans l'étude (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a) de réaliser une analyse fine des résultats par classe tant le contexte socio-démographique peut influencer. Seules les grandes tendances seront mises en évidence. Le graphique présenté à la Figure 2.3 détaille les résultats des enquêtes pour deux classes de bâtiments comparés à la moyenne sur les 6 classes.

	MEAN	A1	A2	A3	B	C1	C2
Noise from radiators ^(b)	1,15	1,22	1,11	1,01	1,23	1,25	1,04
Vacuum cleaning ⁽ⁿ⁾	1,22	1,17	1,09	1,09	1,32	1,34	1,25
Other domestic appliances ⁽ⁿ⁾	1,27	1,29	1,12	1,1	1,38	1,4	1,28
Noise from air-conditioning ^(b)	1,32	1,58	1,43	1,33	1,28	1,11	1,2
Lift ^(s)	1,43	1,36	1,23	1	1,57	1,29	1,91
Noise of people or animals from the balcony ^(b)	1,45	1,5	1,42	1,37	1,46	1,35	1,56
Instrument playing or singing ⁽ⁿ⁾	1,45	1,14	1,3	1,3	1,52	1,52	1,79
Delivery of post ^(s)	1,46	1,56	1,38	1,36	1,49	1,48	1,47
Speech ⁽ⁿ⁾	1,49	1,38	1,2	1,32	1,58	1,69	1,67
Noise caused by running water in the pipes ^(b)	1,49	1,65	1,35	1,4	1,63	1,42	1,34
Noise of people or animals from the courtyard ^(b)	1,51	1,46	1,24	1,77	1,61	1,31	1,47
Footsteps ⁽ⁿ⁾	1,56	1,63	1,26	1,59	1,65	1,68	1,52
Footsteps ^(s)	1,57	1,44	1,23	1,69	1,65	1,49	1,79
Noise of pets ⁽ⁿ⁾	1,63	1,47	1,2	1,45	1,94	1,65	1,7
Moving items of furniture ⁽ⁿ⁾	1,66	1,75	1,33	1,49	1,7	1,92	1,84
TV or music ⁽ⁿ⁾	1,67	1,58	1,5	1,84	1,54	1,82	1,96
Noise of people such as speaking or shouting ⁽ⁿ⁾	1,74	1,47	1,28	1,45	1,96	1,88	2,15
Vehicle noise from the street ^(o)	1,75	1,49	1,85	1,83	1,57	1,57	2,31
Opening or closing of doors ⁽ⁿ⁾	1,76	1,71	1,48	1,51	1,92	1,77	1,99
Loud laughter ⁽ⁿ⁾	1,82	1,63	1,54	1,52	1,97	1,98	2,1
Opening or closing of doors ^(s)	1,91	1,85	1,53	1,67	2,09	1,8	2,26
Carbage, sweeping or snowplough truck ^(o)	1,93	1,93	1,93	2,17	1,71	2,06	2,04

TABLEAU 2.5 – Tableau décrivant les résultats de l'enquête perceptive d'Hongisto. Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). Les indices à la fin de la dénomination de chaque source décrivent la localisation de chacune de ces sources : (o) : extérieures au bâtiment (n) : issues des logements voisins (s) : issues des couloirs et cages d'escalier (b) : autre sources issues de l'intérieur du bâtiment.

Pour mettre en perspective ces résultats, rappelons les résultats clefs des études Akulite et Acoubois.

1. **Sources de bruit d'impact, 1er ordre de la gêne** : Les bruits de pas, de chute ou mouvement d'objets, qu'elles soient issues des parties communes, ou des voisins sont parmi les sources de bruit les plus gênantes ;
2. **Sources extérieures au bâtiment, 2nd ordre de la gêne** : Les bruits de personnes gênent davantage que le bruit de trafic et les bruits de trafic ferroviaire et routier ressortent plus gênants que le bruit de trafic aérien ;
3. **Sources issues des parties communes, 1er ordre de la gêne** : Le bruit aérien issu des parties communes fait partie des sources les plus gênantes ;
4. **Sources issues des logements voisins** : Le bruit de voix est une source de gêne de second ordre, le bruit de musique ou TV avec une composante basses fréquences est jugé plus gênant ;
5. **Source de bruit d'équipements** : Seuls les bruits de chauffage, climatisation, et ventilation sont des sources jugées parmi les plus gênantes.

En se basant sur les résultats de la classe C2 correspondant aux bâtiments avec les plus faibles performances acoustiques, voici les grands enseignements, les différences et similitudes qui ressortent par rapport aux précédentes études :

1. **Sources extérieures au bâtiment, 1er ordre de la gêne** : 1ère différence, le bruit de trafic routier ainsi que celui généré par les camions éboueurs sont parmi ceux les plus gênants. Les bruits de personnes en provenance de l'extérieur ne sont alors plus une source de gêne ;

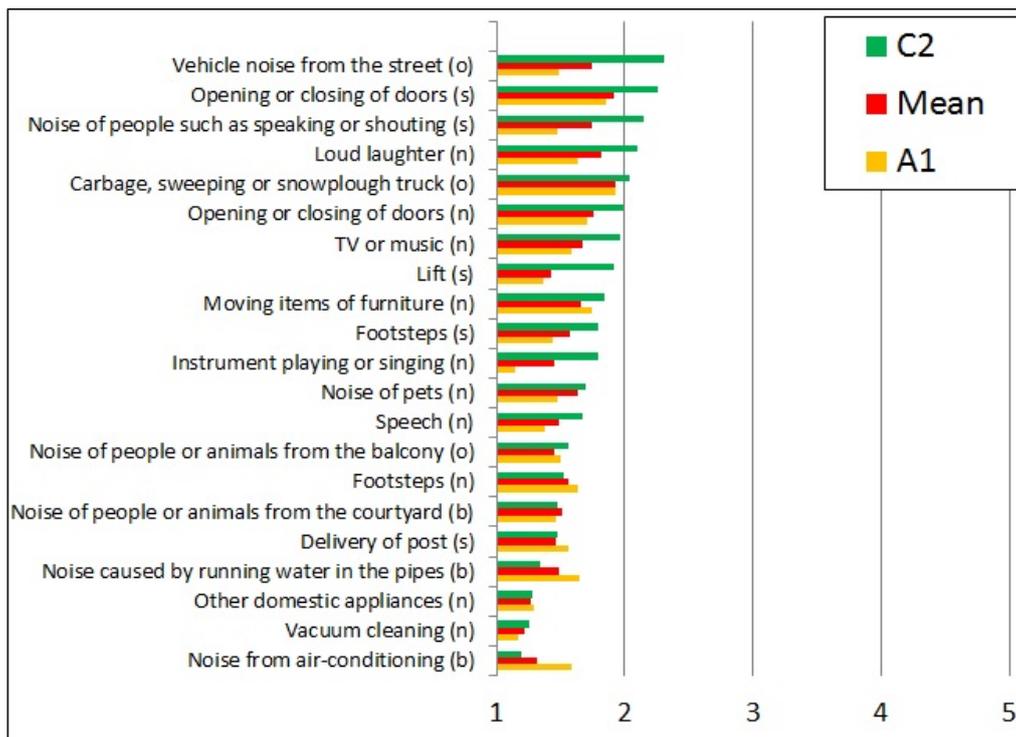


FIGURE 2.3 – Graphique représentant les résultats de l'enquête perceptive de Hongisto - Source : (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a) ; les indices à la fin de la dénomination de chaque source décrivent la localisation de chacune de ces sources : (o) : extérieures au bâtiment (n) : issues des logements voisins (s) : issues des couloirs et cages d'escalier (b) : autre sources issues de l'intérieur du bâtiment.

2. **Sources issues des parties communes, 1er ordre de la gêne** : Première similarité avec les études précédentes, le bruit issu des parties communes fait partie des sources les plus gênantes. Et l'étude d'Hongisto complète et qualifie les sources qui gênent le plus. Il apparaît que le bruit de claquement de porte est la première source de gêne (rang 2/21) devant le bruit de personnes parlant ou criant (rang 3/21), lui même plus gênant que le bruit d'ascenseur (8/21). À noter également qu'il s'agit de la provenance recensant le plus grand nombre de sources dans le top 10 de la gêne perçue ;
3. **Sources issues des logements voisins** : Idem que pour les études précédentes, le bruit de voix est une source de gêne de second ordre, le bruit de musique ou TV est jugé plus gênant malgré l'absence de la caractéristique basses fréquences. La source "Eclats de rire, pleurs, cris" est la source de voisins la plus gênante (rang 4/21) suivie par le bruit de portes du voisin (rang 6/21) ;
4. **Source de bruit d'équipements** : Contrairement aux études précédentes, aucune source de bruit d'équipement ressort comme gênante. A noter que le bruit de ventilation/chauffage issu de son propre logement n'est pas proposé dans ce questionnaire.

Conclusion des approches in situ L'analyse bibliographique des études in situ effectuées dans trois pays européens (France, Suède, et Finlande) tient compte d'un nombre significatif de sources sonores pour l'évaluation perceptive de gêne perçue dans les logements aux performances acoustiques variables. Les bruits d'impacts qu'ils proviennent des parties communes, ou des voisins font partie des sources les plus gênantes pour une majorité d'études (QUALITEL 2016 ; BALANANT et al.

2014; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a). D'autres résultats montrent des résultats plus contrastés. À titre d'exemple, l'étude effectuée en Finlande montre que le bruit de trafic routier est la typologie de source la plus gênante alors que pour les études Française et Suédoise, cette même source ne ressort pas comme parmi les plus gênantes. Dans ces études in situ, très peu de sources intérieures au logement ont été mentionnées, et étudiées. Cette provenance de source est l'objet de la suite de l'analyse.

2.2.1.3 Les sources intérieures au logement

Une étude commandée par ISOVER en 2016 a été mise en œuvre par l'institut IPSOS. Un rapport rend compte des résultats d'une enquête originale (PÉREZ-BOURGUET et al. 2017b). Il s'agit d'une étude qualitative réalisée sur 20 individus propriétaires de leur logement et vivant dans de grandes villes (Paris, Lyon, ou Lille). Un tiers des individus vit en environnement très bruyant, un tiers en environnement bruyant, et un tiers en environnement varié. 10 d'entre eux ont eu recours à des travaux d'isolation phonique et les 10 autres n'ont encore jamais réalisé de travaux. Le protocole mis en place s'organise comme suit :

- Rédaction par chacun des individus d'un carnet de bord pour décrire leur environnement sonore accompagné de preuves sonores enregistrées par ces mêmes sondés ;
- Entretiens individuels ethnographiques (semi-ouverts) à domicile suivant le questionnaire élaboré par ISOVER en collaboration avec SGR (PÉREZ-BOURGUET et al. 2017a) ;
- Confrontation des résultats des entretiens, des carnets de bords à 8 mesures acoustiques in-situ.

Il ressort des entretiens que les sons provenant de l'intérieur du logement ne sont qu'à de rares occasions spontanément cités car ils font partie de "sa sphère personnelle". Ces sons sont perçus de façon "positive" parce qu'ils sont créés par des membres du foyer. En plus d'être peu cités spontanément, les sons du domicile sont souvent bien tolérés. Plusieurs raisons expliquent ce jugement :

- Les sons qui sont produits par les membres de la famille sont teintés d'une coloration affective qui font qu'on les accepte bien ;
- On a le pouvoir de réduire, ou d'arrêter les sons (rappeler les enfants à l'ordre, éteindre la radio, ...) ;
- Quand on utilise un appareil électroménager on choisit le moment de l'utiliser, et on anticipe le bénéfice de son utilisation (l'aspirateur : propreté de la maison ; cocote minute : repas agréable, ...).

En contraste, les bruits extérieurs sont ceux les plus évoqués spontanément parce qu'ils interfèrent avec le cours de la vie. Trois facteurs mesurables sont cités pour ces sources :

- l'intensité ;
- la fréquence (grave, aigu) ;
- la récurrence.

Ils sont souvent imprévisibles et troublent l'harmonie de son environnement "homogène". Un clivage très fort entre deux types de sons : les sons agréables (qui viennent de la nature) et les sons désagréables. En plus des sons de la nature (le chant des oiseaux, le vent...) d'autres sources sont généralement jugées agréables (Ex : les cloches de l'église, les enfants qui jouent).

2.2.1.4 Conclusion générale sur la sélection de sources

Cette partie sur l'analyse bibliographique de la sémantique des sources visait à répertorier la multitude de sources sonores considérées dans les études perceptives dont l'objet est l'étude de la gêne sonore dans les logements. Dans le cadre des travaux de thèse, les sources sonores typiques estimées les plus pertinentes ont été sélectionnées à partir des résultats obtenus dans cette analyse bibliographique et dont les principaux enseignements sont présentés dans la suite de cette conclusion :

La circulation des véhicules et les voisins sont les deux premières sources de nuisances sonores au domicile (BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014). Deux études indiquent que le bruit de pas depuis les autres logements est la source de bruit la plus gênante au domicile (BALANANT et al. 2014; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a). Concernant les sources de bruit gênantes issues de l'extérieur du bâtiment, deux d'entre elles ressortent : le bruit de trafic routier et le bruit de passant mais selon les études, le poids de chacune de ces sources dans le jugement de la gêne varie. L'étude Acoubois montre que le bruit de passant est la source extérieure au bâti la plus gênante alors que dans le cas de l'étude d'Hongisto, la gêne moyenne due au bruit de passant est mesurée plus faible pour le groupe de sujets vivant dans un logement à faibles performances acoustiques (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013a). Parmi les sources de bruit routier, le bruit de camion éboueur ressort particulièrement gênant. Les sources de bruit de type bruit de trafic aérien et ferroviaires ainsi que les bruits liés aux activités commerciales ne ressortent pas comme étant significativement gênantes. Dans les sources non étudiées et potentiellement intéressantes, les sources de bruit de nature pourraient amener la dimension agréable de l'environnement sonore perçu. En ce qui concerne les sources de bruit du voisinage, deux provenances se distinguent : dans l'ordre du plus au moins gênant, le bruit issu des parties communes (1-Claquement de portes, 2-bruit de voisin parlant, 3-bruit d'ascenseur) et le bruit issu des logements voisins (1-Éclats de rire, pleurs, cris 2-Claquement de porte, 3-Bruit de musique ou TV, 4-Voisin parlant). Le bruit de claquement de portes ressort également. Donc dans le cadre de nos études, voici a priori le choix de sources pertinentes à considérer dans le design des scènes sonores. Pour les sources extérieures :

1. Trafic routier (désagréable);
2. Bruit de voix + pas en mouvement (désagréable d'après (BALANANT et al. 2014));
3. Nature (agréable);
4. Enfants jouant, clocher d'église (agréable).

Pour les sources des parties communes :

1. Claquement de portes;
2. Bruit de voix;
3. Bruit d'ascenseur.

Pour les sources produites par les voisins :

1. Dispute, Éclats de rire, pleurs;
2. Claquement de portes;
3. Musique, TV.

Les scènes sonores estimées intéressantes à étudier pour rendre compte de la diversité des sources perçues dans un logement et de leur potentiel de gêne sur l'habitant doivent être définies en fonction de critères psycho-acoustiques. L'approche de laboratoire choisie pour ces travaux et

décrite au Chapitre 3 vise à faire écouter des scènes sonores typiques de logement résidentiel qui auront été au préalable composées à partir d'enregistrements sonores capturés en contexte. Ces compositions s'effectueront en accord avec les critères qui auront été trouvés dans la littérature et explicités dans la prochaine section.

2.2.2 Comment construire les scènes sonores typiques ?

Cette partie vise à établir les différents facteurs acoustiques et non-acoustiques qui pourraient caractériser les sources typiques perceptibles dans son logement et leur effet sur la perception.

2.2.2.1 Les paysages sonores urbains

Guastavino montre dans le contexte de paysage urbain que les sons de voix et de nature sont appréciés alors que les bruits mécaniques sont dérangeants (GUASTAVINO 2007). Dans le cas particulier des voix humaines, la littérature rend compte qu'elles peuvent être perçues de façon négative ou positive. Cela dépend du contexte. Concernant la musique, est montré que lorsque le son est rediffusé par un système de restitution sonore (Télévision, radio, système amplifié) celui-ci est perçu négativement. En opposition, le son naturel correspondant directement au musicien jouant de la musique est perçu positivement. La catégorisation libre a confirmé que dans le cas de sons du quotidien, les attributs sémantiques dominent sur les attributs perceptifs. Deux grands groupements de sources ont été révélés :

- Prédominance Trafic (Deux sous catégories : Véhicules légers Vs lourds)
- Prédominance Présence de voix humaines (Deux sous catégories : Forte activité, faible activité)

Dans ses travaux de thèse, Lafay a développé un outil de mixage pour la création de scènes sonores urbaines (LAFAY 2016). L'objectif est de permettre à un participant de sélectionner les échantillons d'évènements et de textures qu'il souhaite et de les mixer ensemble pour créer un paysage sonore urbain. Pour construire la banque de sons représentative de l'environnement sonore urbain, Lafay réalisa une étude bibliographique basée sur 16 articles. De cette analyse, il propose deux taxonomies décrivant les classes de sons émergeant dans la littérature. Une taxonomie décrit les évènements, une autre les textures. Ces deux taxonomies sont détaillées dans son mémoire de thèse (LAFAY 2016, chap. 4). Grâce à l'outil de mixage et une base de sons fournie respectant les deux taxonomies ainsi construites, des tests ont été réalisés. Dans un premier temps, les participants sont amenés à créer deux scènes sonores : une idéale, l'autre au contraire intitulée scène non-idéale (très désagréable). Ensuite dans un second temps, d'autres participants ont dû juger l'agrément de toutes ces scènes sonores créées. Enfin, une troisième expérience est réalisée consistant à un exercice de catégorisation libre avec pour corpus de stimuli les scènes sonores idéales et non-idéales créées lors de la première expérience. De cette expérience est mis en évidence que les groupements de stimuli dépendent bien, à la fois, des sources présentes, et des qualités affectives perçues (sensation de calme, agrément, gêne). Il s'agit d'une confirmation des résultats de Maffiolo (MAFFIOLO 1999).

2.2.2.2 Focus sur le bruit de trafic routier

Notre stratégie se construit avec comme condition de proposer des contextes d'écoutes représentatifs pour nos tests. Qu'est ce qu'un bruit de trafic routier réaliste depuis son domicile ? On se place dans le contexte de l'appartement d'un bâtiment situé en contexte urbain. Dans un contexte de ville, deux cas de figures peuvent a priori se présenter. Soit il s'agit d'un logement situé loin des grands axes ($v_{max} < 50$ km/h), soit le logement est situé proche des grands axes ($v_{max} > 50$ km/h).

Une thèse menée par Julien Morel traite justement de la caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain dans le cas de trafic routier à faible vitesse (MOREL 2012). Il rappelle la richesse des types de bruit routier existants dépendant de nombreux facteurs : types de véhicules, et types de sources acoustiques ce qui résulte de bruits de compositions spectrale et temporelle variées. Ces différents paramètres sont inspirés des propositions du Nouveau Guide du Bruit publié par le Service d'Étude sur les TRANSPORTS (SETRA) (SERVICE D'ÉTUDE SUR LES TRANSPORTS 2009). L'objectif principal de la thèse était de définir des indicateurs du bruit routier plus adaptés à la perception humaine. Par l'intermédiaire d'un test de catégorisation libre, il définit 7 catégories définies suivant 2 facteurs : le type de véhicule (deux-roues, véhicules légers, ou lourds) et le type d'allure (accélérée, décelérée, constante). Pour chacune des 7 catégories, il construit un modèle de gêne. Les modèles montrent que le volume sonore (exprimé en sonie, ou en niveau équivalent pondéré A, sur des bandes de fréquences plus ou moins grandes) domine la réponse en gêne. Les caractéristiques de rugosité, de taux de décroissance, et de force de fluctuation y ont une influence secondaire. De cette étude, on retiendra que la catégorisation des sources de bruit routier s'effectue d'abord en fonction du type de véhicule (bus, 2 roues, véhicules légers), et de l'allure de celui-ci (allure stable, accélérée, décelérée).

2.2.2.3 Les bruits environnementaux intérieurs

Après les sources sonores extérieures au bâtiment, vient l'étude des sources sonores intérieures. Les recherches sur ce domaine sont bien moins fournies et aucune publication ne répond tout à fait à notre problématique. Les recherches sur le domaine des bruits environnementaux prennent source des travaux de Gaver (GAVER 1993). Gaver introduit la notion des deux types d'écoute : l'écoute musicale qui se définit avec une attention sur les caractéristiques perceptives (tonalité, niveaux) et l'écoute du quotidien qui est dédiée à l'attention sur les événements sonores pour rassembler de l'information. Les bruits environnementaux sont définis comme suit : « All naturally occurring sounds other than speech and music » (GYGI et al. 2007). Il ne s'agit donc pas des sons domestiques ce qui s'écarte de ce que nous visons ici. Néanmoins, nombreuses sont les sources sonores environnementales qui intègrent également la famille des sons domestiques. Des travaux de catégorisations libres des bruits environnementaux ont été menés par de nombreux chercheurs (VANDERVEER 1979 ; GUYOT 1996 ; SUSINI et al. 1998 ; MARCELL et al. 2000 ; DUBOIS 2000 ; GYGI et al. 2007). En excluant les stimuli du "vivant" la catégorisation s'effectue suivant plusieurs mécanismes :

- Propriétés acoustiques du son ;
- Propriétés causales de la source (animée ou inanimée) : actions, mouvements responsables de ces sons ;
- Propriétés sémantiques (liées à l'interprétation de la source) ;
- Réponses émotionnelles comme la gêne, ou l'agrément.

Être en mesure d'identifier la source importe dans la stratégie adoptée pour la catégorisation. Lorsque l'on peut identifier la source, les propriétés causales vont l'emporter alors que si la capacité à identifier le stimulus est faible, la catégorisation s'effectue souvent en se basant sur des attributs acoustiques. Pour ces bruits environnementaux une revue bibliographique menée par Gygi rend compte des attributs perceptifs influents sur les stratégies de catégorisation (GYGI et al. 2007).

1. (VANDERVEER 1979) : La catégorisation s'effectue plus par l'étude des similarités des structures temporelles que par celles spectrales ;
2. (BONEBRIGHT 2001) : Sur 30 stimuli environnementaux, 80% de la variance s'exprime suivant trois dimensions :

- Niveau sonore maximal (Amplitude ceiling);
 - Niveau sonore moyen;
 - Modulation fréquentielle.
3. (KIDD et WATSON 2003) : Sur 140 stimuli environnementaux, 90% de la variance était exprimée sur les quatre dimensions suivantes :
- Rugosité;
 - Durée;
 - Complexité;
 - Attrait.
4. (GYGI et al. 2007) : Sur 70 stimuli sonores, la catégorisation a regroupé ensemble les sons harmoniques d'une part, les sons d'impacts d'autre part, et enfin les sons continus; cette catégorisation s'exprime par :
- (a) Des attributs perceptifs;
 - Harmonicité;
 - Étendue spectrale (spectral spread);
 - Continuité;
 - Périodicité;
 - Modulation de l'enveloppe.
 - (b) Le type de sons (Vocalises, impacts, sons causés par le mouvement d'eau);

Une seule étude a été recensée pour étudier les regroupements effectués lorsqu'en plus des stimuli environnementaux étaient ajoutés les sons dits "vivant" avec des voix humaines par exemple (GIORDANO et al. 2010). Lors d'une tâche de catégorisation libre avec un corpus regroupant à la fois des stimuli de sources non-vivantes et des stimuli de sources du vivant, le regroupement des stimuli "non-vivant" s'effectue par l'analyse d'attributs acoustiques alors que dans le cas des stimuli "vivant", les regroupements s'effectuent par l'analyse du contenu sémantique. Lorsque le stimulus comprend des sources "non-vivante" et "vivante" les considérations acoustiques peuvent influencer en plus du contenu sémantique.

De ces études, la compréhension des attributs sémantiques, perceptifs, et émotionnels inférant dans le processus de catégorisation des sons environnementaux ont été mis en évidence. Seulement, pour la majorité de ces études, les stimuli utilisés consistaient en des événements sonores particuliers de courte durée (bruit de perceuse, balle qui tombe, splash d'eau etc.). À l'exception de l'étude de GUASTAVINO (2007), il s'agissait d'études sémantiques sur les événements sonores entendus dans l'environnement avec des sources issues de l'extérieur et d'autres produites à l'intérieur du bâtiment.

2.2.3 Conclusion

Les sources sonores étudiées dans la littérature dans le cadre d'études in situ sont très diverses et des typologies de sources ont été proposées pour la suite des travaux. Ces différentes typologies de sources ont ensuite été caractérisées grâce à l'analyse d'études de catégorisation libres visant à faire émerger les grandeurs perceptives et sémantiques importantes et permettent aux individus de reconnaître les sources qui les entourent. Une notion n'a cependant pas encore été abordée, celle de la mise en évidence des facteurs non-acoustiques personnels. Le confort étant une notion subjective, une variabilité importante dans les besoins des individus est présumée. Comment expliquer cette variabilité, comment la caractériser ? Quels sont les facteurs sociaux-culturels, ou psycho-sociaux qui influent sur les attributs du confort acoustique au domicile ?

2.3 Les éléments sociaux et culturels

2.3.1 Facteurs démographiques

De l'analyse de la littérature s'intéressant aux nuisances sonores au domicile sont ressorties des types de sources influentes sur la gêne perçue au domicile. Des facteurs liés au contexte socio-démographique ont été révélés (BEDEAU et al. 2010 ; BENDAVID et CHASLES-PAROT 2014) :

- la gêne sonore au domicile augmente avec la densité de population. En particulier, une proportion plus importante de personnes habitant les grandes villes (Paris, Lyon, Marseille) est gênée en permanence par le bruit au domicile ;
- l'âge influe dans la préoccupation des français à la gêne sonore : plus on vieillit (jusqu'à atteindre 65 ans ou plus) et plus on est préoccupé par les questions relatives au bruit et aux nuisances sonores ;
- les catégories socio-professionnelles Cadres, Professions libérales, artisans, commerçants sont les plus gênés par les nuisances sonores au domicile ;
- la proportion de locataires d'appartements sociaux considérant le domicile comme étant le contexte dans lequel les nuisances sonores sont les plus dérangeantes est augmentée de 12% par rapport à la moyenne nationale mesurée à 50%.

2.3.2 Facteurs sociaux et culturels

Chelkoff met en évidence les clivages culturels et sociaux et ceux des classes d'âges dans les pratiques, les exigences et les jugements des individus (CHELKOFF 1993). Un point intéressant mis en avant est en outre le contexte sonore durant la période de travail qui influencerait les attentes de confort sonore au domicile.

Par ailleurs, alors que pour la mesure de sensibilité au bruit, aucune relation avec des aspects sociaux-culturels n'a pu être mise en évidence, lorsqu'il s'agit du degré de tolérance, Defrance parvient à expliquer ces comportements par des causes sociales ou culturelles (DEFRANCE 2017). Dans le cadre de son projet de recherche dédié au cas d'étude d'un quartier parisien en gentrification, Oberkampf, Defrance prouve que les habitants de plus de 20 ans d'ancienneté dans leur logement sont intolérants aux nuisances sonores extérieures alors que les habitants récemment installés et locataires du logement sont beaucoup plus tolérants. Deux variables sont donc prépondérantes dans l'évaluation du degré de tolérance : le statut d'occupation ainsi que l'ancienneté d'installation. Sida confirme l'influence du statut d'occupation sur la réponse en gêne dans le cas d'étude du contexte sonore de chambre à coucher (SIDA 2016). La sensibilité au bruit ainsi que l'âge de l'occupant apparaissent comme des variables influentes ce qui confirme les résultats de Ellermeier sur l'effet de la sensibilité au bruit sur le désagrément (ELLERMEIER, EIGENSTETTER et al. 2001). Enfin, la mauvaise configuration du logement ou l'absence de pièce calme affecte le jugement des personnes dont la durée d'installation est relativement longue (ÖHRSTRÖM et al. 2006).

2.3.3 Facteurs comportementaux

Une étude sociologique exploratoire a décrit trois grands types d'interprétation des sons domestiques et perçus depuis l'espace domestique par les résidents (AUGOYARD et al. 1985) :

1. Le type réactif, envisage les sons comme des bruits à maîtriser :
 - Le paranoïaque : "Les gens savent qu'ils font du bruit, mais le font quand même" ; Ressentent un sentiment d'enfermement, fixation sur les sons jugés dérangeants ;

- Le gêné : "Si au moins ce n'était pas à cette heure là » : ne se sent pas visé, abdique ; Passif face au bruit, se plaint mais n'agit pas sur la source ;
- Le soucieux : "Comme ça m'agresse moi-même, je pense que ça agresse les autres" ; Module son propre comportement ;
- Le protégé : S'isole totalement du bruit environnant ;
- Le surveillant : "Maintenant, elle fait attention à chaque fois que je fais mon café, Surveillance et attention mutuelle.

2. Le type normatif : envisage les sons comme une problématique de codage

- Le propriétaire : "Ils n'ont pas le droit de faire du bruit, c'est insensé" ; Scandalisé, mais peu actif ;
- Le bourgeois : "C'est une question de savoir-vivre" ; Privilégie la discrétion
- Le naturaliste : "C'est naturel, c'est normal ces sons là" ; Met l'accent sur le caractère routinier des sons ;
- L'acousticien : Tendance à mesurer les sons et appréhende les sons par leur intensité et leur mesure ;
- Le technicien constructeur : "C'est vraiment mal insonorisé" ; Vigilance sur les matériaux.

3. Le type contemplatif :

- Le curieux : "Je descends pour voir" ; Le son autorise à l'indiscrétion ;
- Le joueur : "Ce sont des bruits rigolos" ; Jouer avec les sons de l'environnement ;
- Le vitaliste : "C'est le son de quelqu'un qui vit" ; Attachement aux sons qui témoignent du vivant ;
- Le poète : Un son active une figure de style ; Dérive imaginaire à partir des sons ;
- L'amoureux du lieu : Le son est signature du lieu ; Rechercher la signature sonore du lieu
- Le nostalgique : "Ca faisait de l'animation dans l'immeuble avant..." ; Regrette les sons du passé.

Defrance définit lui quatre degrés de tolérance qui engendrent quatre types de comportement (DEFRANCE 2017) :

- Le rejet ;
- La résignation ;
- Le compromis acceptable ;
- L'acceptation sans réserve.

Cette revue bibliographique sert de base pour approcher l'effet de la sémantique des sources sur les individus dans leur logement. Le choix des sources pertinentes à étudier dans le cadre de l'étude du confort en appartement a été déduit de la présente analyse bibliographique et est développé à la Section 4.2.1.1 page 59. Sur la base de cette analyse bibliographique sur l'environnement sonore au domicile, des résultats relativement disparates ont été mis en évidence. Afin de bien caractériser les objets d'études en question (l'environnement sonore, et le rapport de l'individu à cet environnement sonore), une maîtrise des stimuli est nécessaire afin d'évaluer le rapport de l'individu à cet environnement sonore. Pour maîtriser ces environnements sonores simulés, l'approche de laboratoire a été retenue.

2.4 Approche de laboratoire

Dans le cadre de mesures perceptives en laboratoire, plusieurs approches peuvent être envisagées. Selon l'objectif d'évaluation, le sujet sera soit dans une situation d'écoute attentive (approche psycho-acoustique), soit dans une situation d'écoute distraite (approche cognitive). Les processus psychologiques résultant de ces deux types d'écoutes sont différents (GAVER 1988). Dans le premier cas, l'attention de l'auditeur donne accès à des grandeurs perceptives issues de processus psychologiques haut-niveaux (conscients). Dans l'écoute distraite, l'auditeur est occupé dans une activité annexe visant à le distraire pour qu'il ne focalise pas son attention sur le stimulus sonore. Sous cette hypothèse, le stimulus audio peut induire des effets sur le sujet qui ne sont pas conscients (processus bas niveaux). L'écoute distraite est aussi appelée par Gaver "Every day listening" (écoute de tous les jours). Cette approche d'écoute distraite donne accès à d'autres grandeurs perceptives telle que la gêne sonore, ou le confort puisque cette grandeur est définie circonscrite à une activité (être gêné pour lire, pour se concentrer, etc.), et peut difficilement être déduite d'une écoute attentive. En fonction du type de grandeur perceptive à caractériser, le choix de l'une ou l'autre approche s'effectue.

2.4.1 Approche psycho-acoustique

Dans une approche psycho-acoustique classique, les participants doivent juger les stimuli audio après les avoir attentivement écoutés. Le contexte physique importe moins ce qui autorise l'usage du casque audio ou d'une paire de haut-parleurs dans une cabine audiométrique. D'après l'état de l'art sur l'évaluation du bruit des transports en laboratoire (CHAMPELOVIER et al. 2010), le système de restitution majoritairement utilisé utilise des haut-parleurs, mais l'usage du casque reste cependant assez courant (35% des études référencées). Dans cette situation d'écoute attentive, seule une tâche de jugement des stimuli convient. L'évaluation s'effectue en termes de description du son (Aigu / Grave, Faible / Fort volume, etc.), de préférence (comparaison par paires de stimulus par exemple), ou bien encore de désagrément.

2.4.1.1 Échelle de jugement

Le choix d'échelle détermine les types d'analyses statistiques qui en découlent. Il réduit le champ des possibles. Selon le type d'échelle de mesure, la variable extraite pourra être qualitative ou quantitative. Plusieurs classifications des échelles psychophysiques ont été créées. La plus communément admise est celle proposée par Stevens qui fait la distinction entre quatre types d'échelles qualitatives : nominale, ordinale, d'intervalles et de ratio (STEVENS 1946 ; STEVENS 1951 ; STEVENS 1975).

Échelle nominale : présente des catégories nommées ;

Échelle ordinale : présente des catégories nommées et ordonnées ;

Échelle d'intervalles : présente des catégories nommées et ordonnées, et dont l'intervalle entre chaque catégorie a toujours la même valeur ;

Échelle de ratio : échelle d'intervalles avec présence d'un zéro naturel.

Concernant la méthode de jugement, une échelle continue est assez souvent utilisée, notamment pour juger le désagrément. À titre d'exemple, dans le cadre d'une étude sur l'influence des composantes des bruits d'avions sur le désagrément, Brocolini et Parizet ont utilisé une échelle continue d'intervalles (BROCOLINI et PARIZET 2015), surmontée de cinq catégories comme cela est recommandé par Fields et ses collègues (FIELDS et al. 2001). Les cinq catégories étaient labellisées : pas du tout désagréable / un peu / moyennement / beaucoup / très désagréable. Cette échelle présente l'avantage d'être continue, avec les propriétés mathématiques qui en découlent, tout en

permettant à l'auditeur de situer plus facilement son jugement sur l'échelle présentée. L'utilisation des 3 subdivisions intermédiaires supposent que l'écart sémantique est le même pour les 4 bandes successives ce qui est difficile à démontrer. Pour les tests perceptifs effectués dans le cadre de ces travaux, les échelles de jugement choisies sont toujours continues à différentiel sémantique (adjectifs opposés aux deux extrémités de l'échelle).

2.4.1.2 Choix du type de procédure

La procédure employée pour la mesure de perception influe sur le type de résultat obtenu. Il existe un grand nombre de méthodes disponibles pour le jugement de stimuli sonore : les méthodes d'estimation, de comparaison de deux ou plusieurs stimuli, de classement (Exemple : catégorisation libre) ou encore les méthodes de jugement continu.

Le jugement d'échelle par la méthode d'estimation est l'approche la plus directe et est couramment utilisée. L'approche de comparaison de stimuli donnent accès à plusieurs dimensions perceptives grâce aux nombreux croisements de stimuli effectués. Cette méthode est également fiable parce que des redondances dans les paires évaluées permettent de garantir un contrôle de la cohérence des résultats. Elle comporte toutefois l'inconvénient de nécessiter un grand nombre d'évaluations pour aboutir à un plan d'expérience complet. Parmi les méthodes de classement, la méthode de catégorisation libre est utilisée notamment pour faire émerger des prototypes, des sources typiques considérées comme les meilleurs représentants de leur catégorie perceptive. Les méthodes de recueil de réponses par l'intermédiaire d'échelles de catégories sont reconnues pour être fiables (MARQUIS-FAVRE et al. 2005) et présentent l'avantage d'être rapides et facilement exploitables.

Une étude comparative méthodologique a été effectuée par Parizet (PARIZET et al. 2005). 6 méthodes d'évaluation du désagrément de stimuli ont été testées. Il ressort de cette étude que quelle que soit la méthode suivie, les résultats de désagrément sont assez similaires. Parizet et ses collègues recommandent toutefois la méthode consistant à évaluer tous les stimuli sur le même écran pour que les sujets comparent les évaluations données. Elle représenterait un bon compromis entre la validité et la durée du test.

2.4.2 Approche cognitive

L'approche cognitive se distingue de l'approche psycho-acoustique dans la mesure où dans ce cadre, l'écoute attentive des sons n'est pas recommandée, on se place dans un contexte d'écoute distraite. Cette approche requière la mise en contexte pour garantir la validité écologique de la mesure.

2.4.2.1 Validité écologique

L'approche de laboratoire induit un risque de biais parce que l'évaluation par le sujet ne s'effectue pas dans un contexte naturel. Le sujet peut alors exprimer un ressenti biaisé en raison du manque de réalisme de la situation. Un auditeur n'est pas toujours amené dans sa vie ordinaire à naturellement écouter attentivement des sons du quotidien pour les caractériser comme le requiert l'approche psycho-acoustique. La validité écologique exprime le postulat que les comportements observés au cours de l'étude sont le reflet des comportements qui se produisent effectivement en milieu naturel. Pour garantir un grand niveau de validité écologique, le contexte doit être au plus près des conditions réelles d'usage.

La mise en contexte s'articule autour de deux aspects principaux : le contexte physique (sensible), et l'activité. Le contexte physique valide est défini en fonction des différentes perceptions sensorielles dont le sujet est sensible dans la caractérisation d'un milieu. Pour le contexte de salon résidentiel, le sujet sera a priori sensible aux ressentis de température et humidité du lieu, mais surtout aux aspects visuels et sonores qui doivent être réalistes pour que le sujet puisse s'imaginer dans le contexte simulé. Pour le contexte de salon résidentiel, l'idéal est que le laboratoire ressemble à un salon d'appartement pour garantir le réalisme visuel, l'acoustique du lieu doit être proche de celle d'un salon standard ($TR_{60} \approx 0.5 s.$), et la solution de restitution sonore spatialisée doit être la moins intrusive, et la plus réaliste possible.

L'activité proposée au sujet vise à le distraire pour qu'il ne se place pas dans une écoute attentive. L'activité permet aussi d'accéder à la notion de gêne. La gêne sonore se ressent circonscrite à une activité. Selon le niveau de ressources cognitives requis, un même stimulus sonore peut être perçu plus ou moins gênant. La notion de confort sonore dépend de façon analogue à l'activité exercée. En garantissant un contexte physique adapté, et en proposant des activités de distraction, un haut niveau de validité écologique peut être atteint et la généralisation des résultats devient alors acceptable. Des grandeurs perceptives telles que la gêne sonore ou le confort acoustique deviennent ainsi mesurables.

Si le but principal de cette tâche est avant tout de détourner l'attention des sujets de l'environnement sonore, elle pourra néanmoins être utile pour mesurer une performance dans la réalisation de celle-ci et ainsi comparer les effets d'une situation sonore donnée par rapport à une situation de référence. La mesure d'une performance ou d'un temps d'exécution vise alors également à mesurer l'impact éventuel que peut avoir un certain contexte sonore. Ces mesures peuvent en effet traduire l'aspect perturbant des stimuli et constituent ainsi une forme de mesure de gêne. Toutefois, l'étude de la performance ne livre pas nécessairement les mêmes conclusions que la mesure de gêne exprimée par les auditeurs, et peuvent ainsi venir enrichir l'analyse (EBISSOU 2013 ; JAHANPOUR 2019). En outre, d'autres mesures, complémentaires à la mesure de la performance sont exploitées, notamment des mesures d'évaluation de la charge cognitive nécessaire à la réalisation de la tâche ou encore des mesures physiologiques.

2.4.2.2 Mesure directe de gêne

Le mesure directe s'effectue de manière analogue à la méthode psycho-acoustique de jugement à échelle continue et à différentiel sémantique présentée Section 2.4.1. La principale différence tient dans le moment de l'évaluation. Dans le cadre d'une approche cognitive, la mesure s'effectue à la fin de la tâche cognitive. L'auditeur détermine sur une échelle la gêne ressentie pour effectuer la tâche demandée. Selon les études, les mesures de gêne sont effectuées une fois que toutes les séquences sonores aient été écoutées par le sujet, par exemple (BROCOLINI, PARIZET et al. 2014), ou bien la même question est posée à la fin de chaque séquence.

2.4.2.3 Évaluation indirecte de la gêne par la mesure de charge cognitive

Cette approche vise à quantifier la surcharge cognitive nécessaire au sujet pour effectuer l'activité demandée. Les ressources cognitives nécessaires varient en fonction de la complexité de la tâche, avec un investissement du sujet accru avec l'augmentation de la complexité de la tâche (DELIGNIÈRES 1993). Les ressources mises en œuvre pour effectuer la tâche donnée est la charge cognitive liée à l'activité (PAAS et VAN MERRIËNBOER 1994 ; PAAS, TUOVINEN et al. 2003). L'environnement sonore peut stimuler le sujet et impacter la charge cognitive employée par le sujet. La charge de travail augmente et le sujet peut s'en rendre compte. Deux états de l'art complets décrivent les différentes techniques de mesures de la charge cognitive. (MILLER 2001 ; CAIN 2007).

Trois types de mesures ont pour objet de quantifier de la charge cognitive : la mesure subjective, la mesure de performance, et la mesure physiologique.

Mesure subjective Pour quantifier la charge cognitive, des questionnaires ont été développés afin que le sujet évalue par lui-même la difficulté qu'il a ressentie pour effectuer la tâche demandée. Deux familles d'échelles sont employées pour effectuer cette mesure : Les échelles unidimensionnelles (Modified Cooper-Harper scale (MCH), Overall Workload (OW)), et les échelles multidimensionnelles (NASA-Task Load Index (TLX), sa version plus courte la NASA-Raw Task Load Index (RTLX), et la Subjective Workload Assessment Technique (SWAT)). Ces méthodes de mesures ont fait l'objet de nombreuses études de comparaison pour évaluer la sensibilité et la fiabilité de ces échelles (HILL et al. 1992; WIERWILLE et EGGEMEIER 1993). Globalement, les résultats montrent que ces questionnaires sont fiables avec un avantage pour l'échelle NASA-TLX.

Mesure de performance La mesure de performance est sans doute la plus utilisée dans le domaine de l'acoustique. L'objectif de la mesure de performance est de montrer que le stimulus audio induit une augmentation de la charge cognitive pour réaliser la tâche. Soit le sujet parvient à maintenir un niveau de performance stable en augmentant cette charge, soit il n'y parvient pas et une baisse de la performance est mesurée. Ainsi la mesure de performance est complémentaire de la mesure de charge cognitive. La baisse de performance est quantifiée par la grandeur Décrément de Performance (DP). En supposant que la charge cognitive et la gêne sont corrélées, la mesure de DP devient une variable d'objectivation de la gêne. Les tâches permettant de mesurer la performance sont nombreuses et variées. Parmi ces tâches, on retrouve des exercices de tri de courrier (VENETJOKI et al. 2006), de calcul mental (BANBURY et BERRY 1998), de raisonnement verbal (SCHLITMEIER et al. 2008), de compréhension écrite (OSWALD et al. 2000), ou encore de rédaction (RANDELL et GILROY 2001) ou de correction de texte (JONES et al. 1990). Le test de Stroop (HOUSTON 1969) est également très utilisé par la communauté acoustique. Les résultats montrent cependant un effet d'apprentissage très sensible qui peut masquer l'effet de surcharge cognitive due à des stimuli (LEMAY et al. 2004).

En 2013, Ebissou a effectué un état de l'art sur l'apport des mesures indirectes de performances dans le cadre de l'étude des bruits de paroles intelligibles (EBISSOU 2013). Il ressort que lorsque l'activité réalisée n'implique pas d'actionner des processus intensifs de mémoire sérielle, les performances ne sont pas sensiblement modifiées par le bruit de parole intelligible. Ainsi, le raisonnement grammatical, le calcul mental, et la compréhension écrite, ou la correction de texte ne seraient pas affectées par l'intelligibilité. Mais Ebissou rend cependant compte par une expérience perceptive que les facteurs "Condition sonore", et "Ordre de passage" agissent significativement sur la performance à la tâche de raisonnement grammatical lorsqu'ils sont évalués conjointement (effet d'interaction). Les différentes conditions sonores consistaient en des bruits de parole plus ou moins intelligibles (Time varying Sound Transmission Index (STIt) compris entre 0,55, et 0,7). L'effet d'ordre est lié à l'apprentissage de la tâche de raisonnement grammatical. Les participants se sont améliorés au cours du test grâce aux répétitions de l'épreuve. Autre exemple, en comparant plusieurs tâches de performances en présence de paroles plus ou moins intelligibles, Haka et ses collègues montrent que les performances des sujets à tâche de mémoire sérielle est sensiblement impactée par le facteur "condition sonore" (HAKA et al. 2009).

Il ressort de l'analyse bibliographique, que même si la mesure de performance n'est pas toujours sensible aux stimuli sonores, lorsque cette mesure est couplée avec une mesure indirecte de surcharge cognitive et/ou avec une mesure directe de gêne, des résultats significatifs sont obtenus. Le choix de l'activité à réaliser est déterminant. Il faut qu'elle soit suffisamment difficile pour

qu'un effet soit mesuré, mais il ne faut pas non plus qu'elle soit trop complexe auquel cas l'effet de fatigue mentale dominerait. L'effet d'apprentissage ne doit pas être non plus trop important sans quoi l'effet d'ordre risquerait de masquer l'effet des stimuli sonores.

Mesure physiologique La mesure physiologique a l'avantage de fournir des mesures aussi objectives que possible. La surcharge cognitive peut influencer sur différentes grandeurs physiologiques : l'activité cardio-vasculaire, l'activité respiratoire, l'activité oculaire, l'activité cérébrale, et l'activité du langage. Plus précisément, l'activité oculaire peut être quantifiée en termes de mouvement des yeux au cours du temps, de dilatation de la pupille, ou bien de vitesse de clignement. L'activité cardio-vasculaire peut se mesurer en termes de rythme cardiaque, ou de pression artérielle. Un éventail de méthodes de mesures physiologiques visant à mesurer la surcharge cognitive s'est développé (MILLER 2001 ; CAIN 2007). L'appareillage intrusif souvent nécessaire pour accéder aux grandeurs physiologiques est en opposition avec les critères nécessaires à garantir pour satisfaire un haut niveau de validité écologique en raison du caractère perturbateur de ces appareils. D'autre part, Cain affirme qu'au regard de la littérature, les mesures physiologiques ne devraient pas être recommandées pour mesurer la charge cognitive jusqu'à ce que les chercheurs puissent en développer une théorie formelleⁱ. Une thèse sur l'effet du bruit en cabine d'hélicoptère sur des grandeurs physiologiques inspire la même retenue (JAHANPOUR 2019). Dans le cadre de cette thèse, une batterie de mesures physiologiques a été effectuée (ElectroEncéphaloGramme (EEG), ElectroCardioGraphie (ECG), et oculométrie). Aucun effet de l'exposition courte au bruit d'hélicoptère (stationnaire et fluctuant) sur les mesures psychophysiologiques n'a été mis en évidence. En raison de ces incertitudes sur ces interactions entre grandeurs physiologiques et charge cognitive, et en raison du caractère souvent intrusif des appareils de mesure, aucune mesure physiologique n'a été effectuée pour mesurer la gêne sonore dans le cadre de ces travaux de thèse.

i. (CAIN 2007) : "Based on this review of the literature, psychophysiological measures should not be recommended for applied problems until researchers can develop a formal, unifying theory that explains the interactions of various physiological phenomena and the relationship to workload, despite the recent technological advances made"

Chapitre 3

Le laboratoire d'écoute

3.1 Description

Cette partie vise à décrire le laboratoire dans lequel se sont effectués tous les tests perceptifs.

3.1.1 Introduction

La MIR de CY Cergy-Paris université possède un ensemble de logements résidentiels destinés à l'accueil des professeurs invités. L'un d'entre eux a été fléché pour devenir le laboratoire d'acoustique perceptive en 2017. Ce laboratoire est constitué d'un salon d'écoute d'environ 40 m^2 et d'une régie de contrôle d'environ 15 m^2 visible sur la représentation 3D à la Figure 3.1. Il s'agit

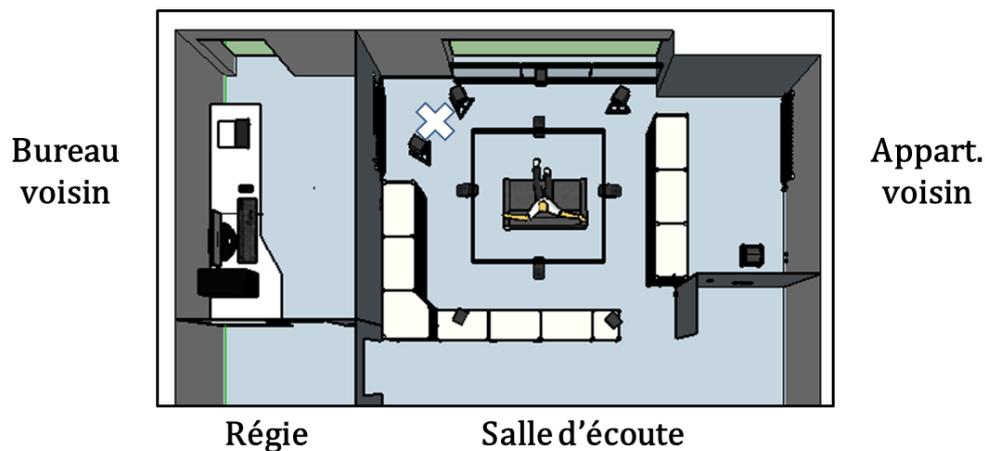


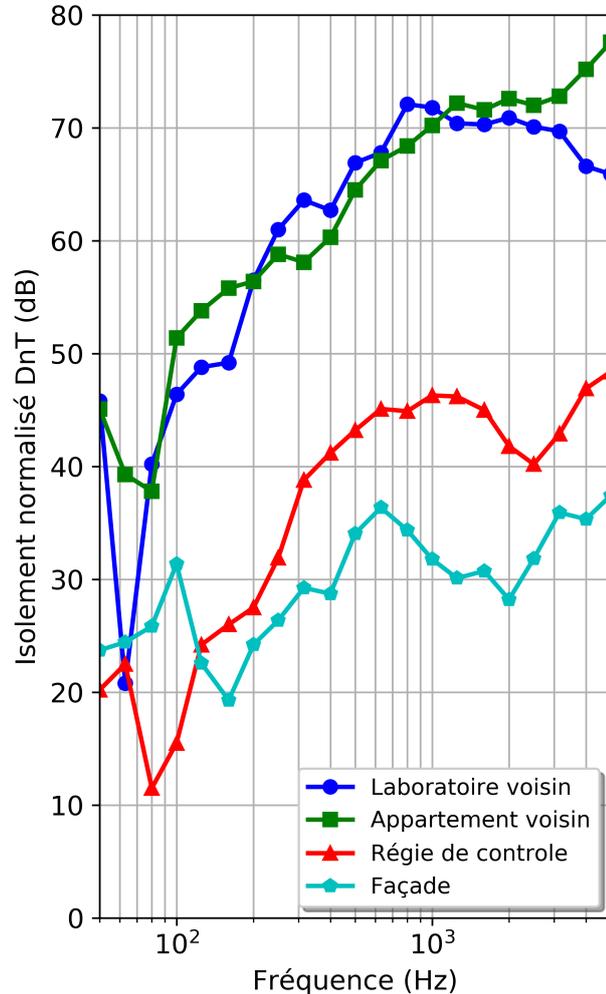
FIGURE 3.1 – Modélisation du laboratoire de restitution sonore spatialisée. La croix correspond à la position de la source omnidirectionnelle utilisée pour mesurer la réponse de la salle au centre de l'espace d'écoute.

donc d'un lieu d'expérimentation pour étudier la qualité des ambiances sonores à l'intérieur des logements. Dans le cadre de cette thèse, l'appartement complètement vide en 2017 a été équipé pour être opérationnel début 2018 (Choix des mobiliers, choix et réglages des systèmes électro-acoustiques, installation du réseau informatique). Il correspond à un contexte de salon représentatif d'une décoration classique du 21^{ème} siècle.

3.1.2 Caractérisation acoustique de la salle

L'objet de cette caractérisation acoustique est de mesurer les propriétés acoustiques pertinentes pour s'assurer des bonnes conditions d'écoute pour la réalisation de tests perceptifs.

Le laboratoire se situe dans un environnement très calme proche de l'Oise et bénéficie donc d'un niveau sonore ambiant faible de 25 dB(A). Il se situe au dernier étage d'un immeuble de deux étages et est adjacent à deux autres espaces : un logement et un bureau comme indiqué à la Figure 3.1. Ce faible niveau de bruit de fond est obtenu à la fois grâce à des conditions sonores extérieures calmes mais aussi grâce aux performances acoustiques globalement élevées des éléments de construction du bâtiment. Les isolements in situ normalisés DnT mesurés selon la norme ISO16283-1 2014 sont présentés sous la forme d'un spectre de tiers d'octaves [50 et 5000] Hz à la Figure 3.2. Ces mesures ont été effectuées pour caractériser les performances d'isolement de trois séparatifs du laboratoire. Les résultats montrent que les isolements acoustiques entre, d'une part, la régie et le bureau voisin, et d'autre part, entre la salle d'écoute et l'appartement voisin sont tous deux supérieurs aux exigences réglementaires (GAYSSOT et al. 1999). L'isolement entre la salle d'écoute et la régie son est plus faible mais reste satisfaisant pour un isolement intérieur entre pièces d'un même logement (voir Figure 3.2). L'isolement de façade entre l'extérieur du bâtiment et le salon d'écoute est également plus faible en raison de l'importante surface vitrée d'environ 8 m². La présence d'une entrée d'air contribue aux modestes performances de ce vitrage en moyennes et hautes fréquences (Voir Figure 3.2). Avec un niveau d'isolement $D_{nTA,tr}$ de 31 dB, le critère réglementaire est respecté à 1 dB près. Cet isolement de façade qui est juste suffisant au regard de la réglementation, l'est également au regard de l'environnement sonore extérieur. En effet, le niveau sonore extérieur est faible (50-55 dB(A)).



	Régie	Laboratoire voisin	Appartement Voisin
$D_{nT,w}$	41	68	68
(C, C_{tr})	(-2; -8)	(-2; -7)	(-1; -5)
	Façade		
$D_{tr,2mw}$	34 (-1; -3)		
(C, C_{tr})	(-1; -3)		

FIGURE 3.2 – Isolements acoustiques mesurés selon la norme ISO16283-1 2014 et indicateurs globaux calculés selon la norme ISO717-1 2013 : entre la salle d'écoute et l'appartement voisin [■ vert], entre la salle d'écoute et la régie [▲ rouge], entre la régie et le laboratoire voisin [● bleu], et entre l'extérieur et la salle d'écoute [◆ bleu ciel].

Des mesures de Temps de Réverbération (TR) effectuées selon la norme ISO3382-2 2008

participent à la caractérisation de la salle d'écoute. Les résultats sont présentés à la Figure 3.3. Avant la pose d'absorbant sur les murs de la pièce, le temps de réverbération dans la salle d'écoute

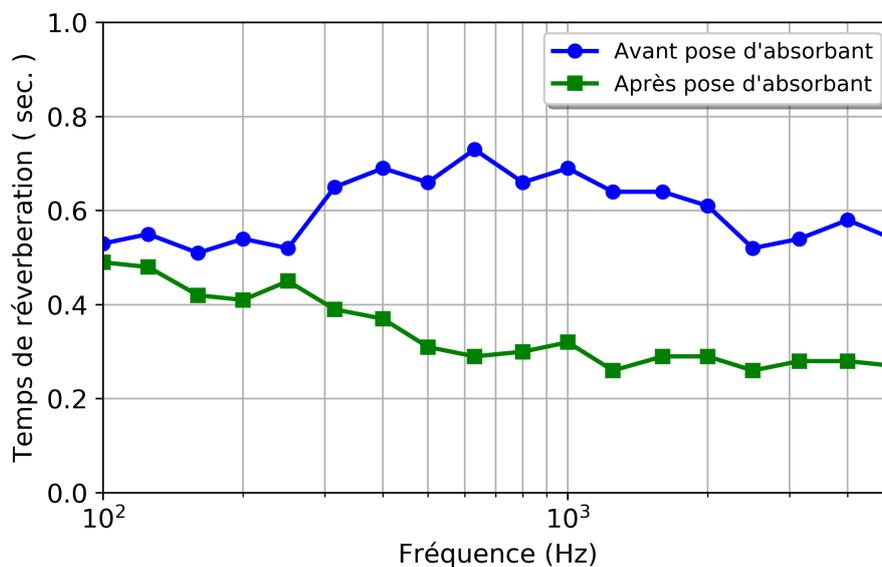


FIGURE 3.3 – Temps de réverbération mesuré dans la salle d'écoute avant et après pose de panneaux absorbants.

dépassait 0.6 s dans certaines bandes de tiers d'octaves (voir la Figure 3.3). Ce critère de salle n'était donc pas encore satisfait vis-à-vis des recommandations de l'AES pour une salle d'écoute sonorisée (AES 1996). L'ajout de 19 m^2 d'absorbant suffit à baisser le TR entre 0.3 et 0.5 s entre [250 et 2000] Hz. Le placement des panneaux absorbant dans le studio d'écoute a été effectué pour couvrir une large surface de murs intérieurs. Au total, quatre panneaux absorbants ont été placés dans le studio (voir Figure 3.4).

Afin de caractériser les chemins acoustiques entre les haut-parleurs et la zone centrale d'écoute, les réponses impulsionnelles correspondantes ont été mesurées. Ces grandeurs ont été obtenues en suivant la méthode de Farina (FARINA 2000). Les fonctions de transfert sont ensuite calculées par transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle temporelle. Elles ont été mesurées en positionnant une source omnidirectionnelle 01-dB DO12 entre deux haut-parleurs voisins du réseau (voir la Figure 3.1) et en positionnant le récepteur de classe 1 au point central d'écoute. Le sinus



FIGURE 3.4 – Visualisation 3D du placement des panneaux absorbants dans le studio d'écoute.

glissant utilisé balaye l'intervalle [20 – 20000] Hz sur 60 secondes. La Figure 3.3 montre un exemple de fonction de transfert obtenue. Il semble qu'on observe des effets modaux sur la fonction de transfert normalisée avec quelques pics et creux d'amplitude qui apparaissent entre 200 et 1200 Hz. La pose des panneaux absorbants dans la salle d'écoute a permis de réduire ces effets.

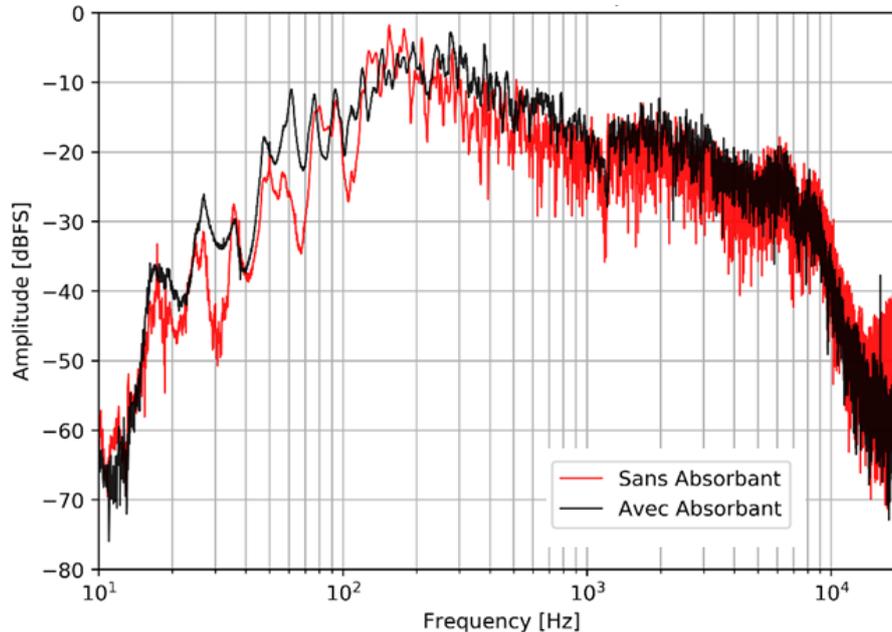


FIGURE 3.5 – Mesures au point d'écoute central de la salle de restitution sonore : Fonction de transfert normalisée obtenue en effectuant la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle avant et après la pose d'absorbant dans la salle d'écoute.

3.1.3 Le système de reproduction sonore spatialisée

3.1.3.1 Description

Le système de reproduction sonore est composé de :

- 16 haut-parleurs [Yamaha HS7-I Blancs](#) préamplifiés
- 1 caisson de basses [Genelec 7070A](#)
- 1 station [DELL Précision T7810](#) avec carte son [Audinate AIC128-D Dante](#)
- 1 processeur audio [Yamaha DME 64N](#) composé de 4 interfaces :
 - 2 cartes MY8-DA96
 - 1 carte MY8-ADA96
 - 1 carte DANTEMY16AUD2

Les 16 haut-parleurs sont répartis pour former un maillage en 3D dans la salle d'écoute (voir la Figure 3.6). Ce maillage peut varier en fonction des environnements sonores à reproduire et la présence d'étagères formant une bibliothèque tout autour du point central d'écoute permet un positionnement modulable des haut-parleurs. Dans sa configuration standard, la salle d'écoute comprend 4 haut-parleurs au sol, 8 à 1.10 m du sol dans un plan horizontal. Les 4 derniers haut-parleurs sont à environ 2.4m de hauteur du sol et sont positionnés sur une structure carrée de 2 m de côté.



(A) De l'arrière



(B) De face

FIGURE 3.6 – Photographies du laboratoire de restitution sonore spatialisée (la MIR, Neuville sur Oise).

Chaque canal de transmission suit un parcours spécifique et est défini comme suit : le signal audio numérique transitant par la carte son de l'ordinateur, est ensuite conduit au processeur-convertisseur audio pour son traitement et sa conversion Numérique / Analogique (N/A). Le processeur audio délivre ensuite 17 signaux analogiques aux 16 haut-parleurs et au caisson de basses. Chaque coffret (moniteur, ou caisson) possède un étage pour amplifier le signal reçu à la commande. Le rayonnement acoustique de chaque coffret est ensuite mesuré au point central d'écoute. L'objectif est d'obtenir une neutralité de l'ensemble des 17 chaînes de transmission. De plus, un "crossover" doit être défini pour déterminer quelle part fréquentielle du signal est conduite aux haut-parleurs et quelle autre part est dirigée vers le caisson de basses. Pour parvenir à la neutralité visée, le câblage analogique en connexion eXternal Line Return (XLR) à faible pertes est identique sur chaque canal (seule la longueur peut varier au maximum de 4m). Les haut-parleurs sont identiques et le fabricant certifie une courbe de réponse unique pour ce modèle. En revanche, puisque les coffrets ne sont pas positionnés au même endroit dans l'espace, et puisqu'il ne s'agit pas d'un environnement anéchoïque, des effets de salle significatifs et spécifiques à chaque chaîne de transmission sont induits. En plus de fournir le crossover, le processeur audio Yamaha DME-N est utilisé pour corriger la courbe de réponse de chaque canal afin d'atteindre une neutralité perceptive de chaque chaîne. Un filtrage sur chaque chaîne de transmission est opéré afin de tendre vers une réponse plate en fréquence de chaque haut-parleur. Enfin, le processeur sert à appliquer des retards ou "delays" aux chaînes de transmissions pour assurer que les temps d'arrivée de chaque front d'onde soient synchronisés. Un diagramme décrivant les étages du processeur audio est présenté à la Figure 3.7.

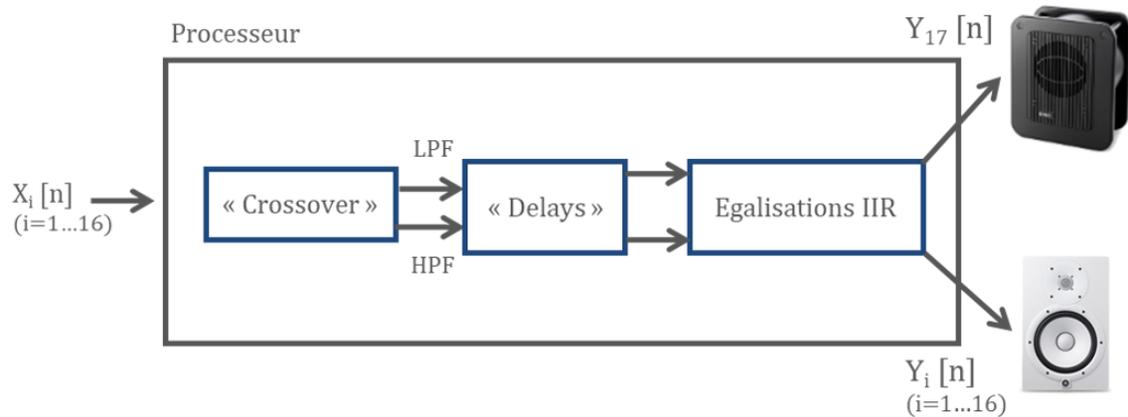


FIGURE 3.7 – Schéma de fonctionnement du processeur audio Yamaha DME 64N
- Crossover défini comme l'association de deux filtres LPF, et HPF.

3.1.3.2 Définition du "crossover"

La présence du caisson de basses [Genelec 7070A](#) requiert la définition d'un filtre pour séparer le contenu fréquentiel dirigé vers les hauts parleurs [Yamaha HS7-I](#) du contenu fréquentiel destiné à être diffusé par le caisson de basses. Un tel filtre paramétrable est noté filtre "crossover". Au sein du processeur audio, le module crossover disponible a été utilisé pour séparer le flux audio en deux voies pour chacun des 16 canaux de transmission. Le crossover est défini comme l'association d'un filtre passe-haut HPF et d'un filtre passe-bas LPF. Les flux audio basses fréquences des 16 canaux de transmission sont ensuite sommés et envoyés au caisson de graves créant ainsi le 17^{ème} canal. Deux paramètres doivent définir le crossover : 1) La fréquence de coupure ; 2) La pente (6, 12, ou 24 dB/octave).

Des critères d'aide à la décision ont été définis. Le premier critère est perceptif. Kelloniemi et ses collègues montrent qu'en dessous de 120 Hz, la localisation des graves émis par un caisson de basses est perdue dans une salle de taille $635 \times 558 \times 271 \text{ cm}^3$ comparable à celle du studio d'écoute de la MIR. Le contenu grave d'une source sonore est restitué par le caisson de grave sans créer de confusion de localisation à condition que la fréquence de coupure soit inférieure à 120 Hz (KELLONIEMI et al. 2005). Le second critère de décision est donné par la courbe de réponse du moniteur audio Yamaha HS7 donnée à la Figure 3.8. L'objectif est de profiter du moniteur HS7 tant que sa réponse est plate. La fréquence de 70 Hz a été retenue comme fréquence de coupure du crossover embarqué dans le processeur. Le second paramètre de pente du crossover est défini pour limiter le recouvrement fréquentiel et donc une pente de 24 dB/octave Linkwitz a été choisie (LINKWITZ 1976).

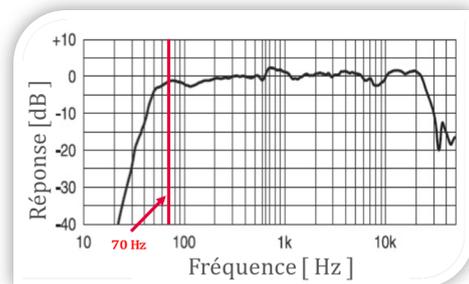


FIGURE 3.8 – Courbe de réponse du moniteur audio Yamaha HS7 (Données fabricant).

3.1.3.3 Définition des retards

Tous les Haut-Parleurs (HPs) ne sont pas à égale distance du centre d'écoute. En conséquence, un signal envoyé en même temps à tous les moniteurs audio n'arrivera pas au même moment au centre d'écoute. Pour pallier cette différence temporelle, un module "Delay" par chaîne de transmission a été employé dans le processeur pour synchroniser les temps d'arrivée. En connaissance des distances de chaque moniteur HS7 au point central d'écoute, le retard en *ms* à appliquer aux 15 haut-parleurs les plus proches du centre d'écoute pour les synchroniser avec le plus lointain est donné par :

$$\tau_{i\{1...15\}} = \frac{\Delta L_i}{c} \quad (3.1)$$

Avec :

- ΔL_i , la différence entre les distances du haut-parleur le plus lointain au centre d'écoute, et du haut-parleur i au même centre d'écoute ;
- c , la célérité du son dans l'air ambiant à 22°C soit $c = 344.5 \text{ m.s}^{-1}$.

Les retards appliqués à chacun des haut-parleurs sont fournis dans le Tableau 3.1. Les différences de distance entre HPs étant faibles, les retards appliqués sont tous inférieurs à 1.5 ms.

Retards par chaîne de transmission [ms]							
HP 1	0.10	HP 5	0.00	HP 9	0.13	HP 13	1.13
HP 2	0.00	HP 6	0.16	HP 10	0.15	HP 14	1.29
HP 3	0.13	HP 7	0.18	HP 11	0.52	HP 15	1.29
HP 4	0.13	HP 8	0.22	HP 12	0.00	HP 16	1.33

TABLEAU 3.1 – Valeurs de retard temporel (en *ms*) appliquées à chacune des 16 chaînes de transmissions.

3.1.3.4 Égalisation des moniteurs

La section 3.1.3.1 décrit l'objectif de neutralité perceptive de chaque chaîne de transmission. Pour amortir les effets de salles, une égalisation de chaque chaîne de transmission a été effectuée. Cette égalisation est déterminée à partir d'une caractérisation de la fonction de transfert (en temporel, et fréquentiel) de chaque chaîne de transmission. Nous faisons l'hypothèse que la fonction de transfert est égale à la réponse impulsionnelle du système. La réponse impulsionnelle est la réponse d'un système donné à une impulsion de Dirac $\delta(t)$. Soit $h(t)$, la réponse impulsionnelle d'une chaîne de transmission et $H(f)$, sa fonction de transfert dans le domaine fréquentiel associé. Par définition de la réponse impulsionnelle :

$$\delta(t) * h(t) = h(t) \quad (3.2)$$

Méthode de caractérisation de la réponse impulsionnelle Une méthode a été développée par Farina pour caractériser cette réponse de salle (FARINA 2000). Une excitation en sinus glissant est envoyé à un canal de transmission. Ce sinus glissant est défini comme suit :

$$x(t) = \sin \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} - 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

avec :

- t , le temps en secondes ;
- T , la durée totale du signal ;
- ω_1 , la pulsation de départ du signal en $rad.s^{-1}$;
- ω_2 , la pulsation de fin de signal, en $rad.s^{-1}$.

Il s'agit d'une fonction sinus dont la fréquence augmente exponentiellement avec le temps. En émettant ce signal sur une voie de transmission, et en mesurant la réponse avec un microphone, la réponse impulsionnelle de la chaîne de transmission peut être caractérisée car la fonction $x(t)$ a été construite de telle sorte que :

$$h(t) = y(t) * x(-t) \quad (3.4)$$

Par convolution de l'enregistrement de sortie $y(t)$ avec la fonction de sinus glissant "retournée", on obtient la réponse impulsionnelle de la chaîne de transmission. Pour obtenir cette réponse impulsionnelle sous la forme fréquentielle, on applique la transformée de Fourier sur la réponse impulsionnelle mesurée :

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Le calcul s'est effectué sous le langage Python. Pour générer et lire des fichiers audio au format .wav, les fonctions [scipy.io.wavfile.read](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.io.wavfile.read.html), et [scipy.io.wavfile.write](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.io.wavfile.write.html) ont été utilisées. Le sinus glissant dure 60 secondes par canal, possède 16 canaux, balaye un intervalle fréquentiel allant de 20 à 20000 Hz. Pour calculer la réponse impulsionnelle en application de l'Équation 3.4, le produit de convolution a été effectué avec la fonction [scipy.signal.fftconvolve\(\)](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.fftconvolve.html), la transformée de Fourier pour le calcul de la fonction de transfert $H(f)$ a été effectuée en utilisant la fonction [numpy.fft.rfft\(\)](https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.fft.rfft.html). Les signaux .wav sont générés et enregistrés à la fréquence d'échantillonnage de 48 kHz sous 16 bits. L'enregistrement s'effectue avec un microphone de mesure de classe 1.

Pour chaque chaîne de transmission, 5 mesures de réponses impulsionnelles ont été effectuées autour du centre d'écoute (voir Figure 3.9). Le premier récepteur est au point central d'écoute. Les 4 autres sont placés à 50 cm du centre d'écoute formant un maillage décrivant une forme de croix. Une moyenne des modules est ensuite calculée dans le domaine fréquentiel.

Les fonctions de transfert sont présentées à la Figure 3.10. Les modules des fonctions de transfert $H_i(f)$ ($i = 1 \dots 16$) sont très fluctuantes avec des variations de près de 10 dB selon les bandes de tiers d'octaves. La région indiquée en transparence de noir représente la bande fréquentielle pour laquelle le caisson de basses contribue seul à la réponse (pour $f < 50Hz$). L'intervalle [50 - 100] Hz pour lequel à la fois le caisson et les moniteurs HS7 contribuent est représenté par transparence de bleu à la Figure 3.10, et la région en transparence de vert correspond à la bande de fréquence [100 - 20000] Hz pour laquelle seuls les haut-parleurs contribuent. L'égalisation s'effectue donc séparément pour chaque bande fréquentielle en fonction de leurs contributions respectives.

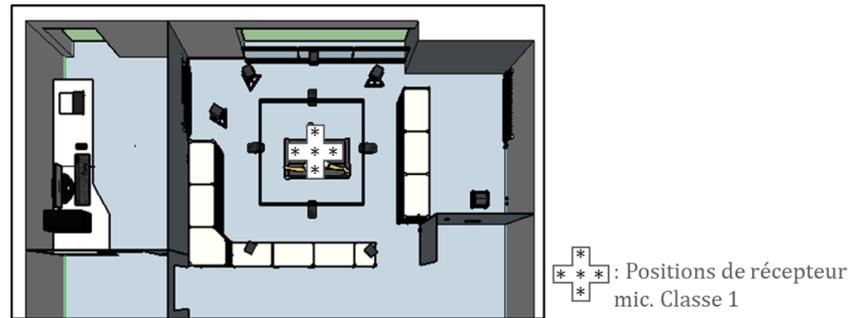


FIGURE 3.9 – Représentation 2D du salon d’écoute avec positionnement des points de mesure pour la caractérisation de la réponse impulsionnelle.

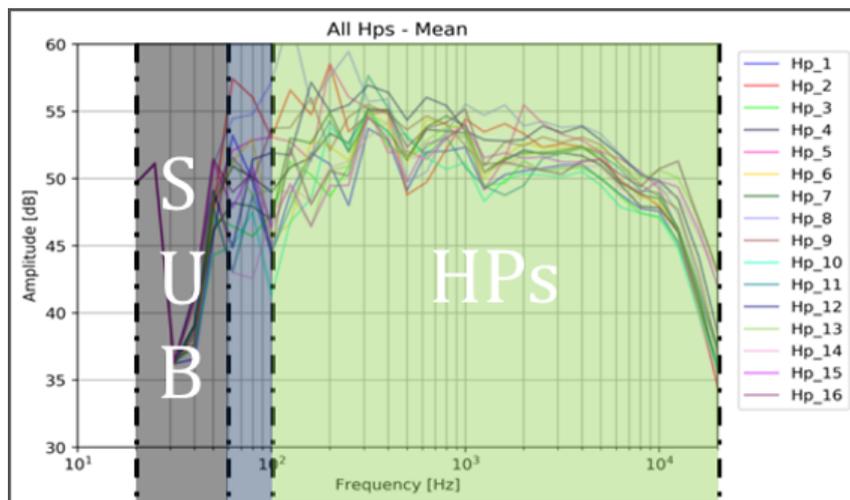


FIGURE 3.10 – Fonctions de transfert des 16 chaînes de transmissions, par application de la méthode de caractérisation de FARINA (2000).

Méthode d’égalisation Les égalisations sont effectuées pour corriger des variations de niveaux des fonctions de transferts. En milieu anéchoïque parfait, la fonction de transfert est une fonction porte $a \cdot \Pi$, avec a une constante en dB. La réponse idéale recherchée pour assurer la neutralité de chaque chaîne de transmission serait d’obtenir des fonctions H_i ($i = 1 \dots 16$) s’approchant de la fonction porte Π . Le diagramme présenté à la Figure 3.11 rend compte de l’approche d’égalisation envisagée pour chaque chaîne de transmission.

La méthode d’égalisation choisie s’inspire des travaux de Vidal, et de Ramos (VIDAL 2017 ; RAMOS et LOPEZ 2006). Au sein du processeur DME 64N, un seul type de filtre causal linéaire est disponible, le filtre IIR. L’équation aux différences finies définies dans le cadre d’un filtre IIR est donné par :

$$y[n] = \sum_{k=0}^q a_k \cdot x(n-k) - \sum_{k=1}^p b_k \cdot y(n-k) \quad (3.6)$$

Le principe de cette méthode consiste à mettre en cascade plusieurs filtres IIR pour minimiser la fonction erreur définie à l’équation 3.7 :

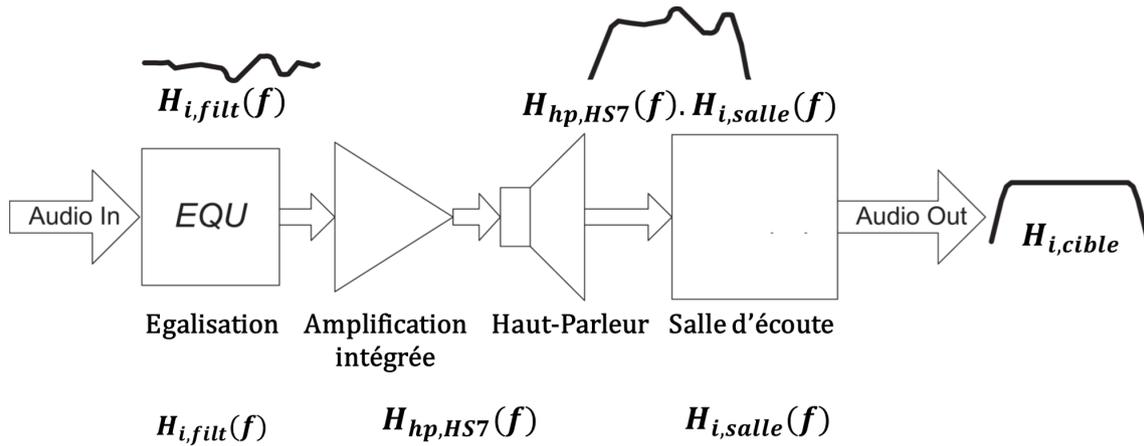


FIGURE 3.11 – Diagramme de la méthode d'égalisation de chaque chaîne de transmission. Source : (RAMOS et LOPEZ 2006).

$$e(f) = H_{i,cible}(f) - H_{hp_HS7}(f) \cdot H_{i,salle}(f) \cdot H_{i,filt}(f) \quad (3.7)$$

Avec :

- $e(f)$, la fonction erreur à minimiser ;
- H_{hp_HS7} , la courbe de réponse du moniteur Yamaha HS7 ;
- $H_{i,salle}$, l'effet de salle pour une position i de haut-parleur, $i = 1 \dots 16$;
- $H_{i,filt}$, la fonction de transfert du filtre IIR.

La méthode d'égalisation est itérative, en corrigeant les défauts par ordre d'importance en commençant par les plus grandes aires. Le critère de tolérance d'erreur de 2 dB entre deux tiers d'octaves successives est choisi pour déterminer si la correction du filtrage est acceptable. Ce critère perceptif est issu des études de Pedersen (K. PEDERSEN et al. 1998), et Moore (MOORE et GLASBERG 1997), indiquant que l'oreille humaine détecte des écarts dans le spectre de $\pm 1,2 \text{ dB}$ relatif au niveau des bandes voisines.

Égalisation du caisson de basses La mesure de la fonction de transfert du caisson de basses rend compte d'une faiblesse dans la courbe de réponse à restituer les graves autour de 35 Hz comme illustré à la Figure 3.13.

Cette faiblesse est liée au premier mode de salle parallélépipédique illustré à la Figure 3.12. La fréquence du premier mode propre est défini par l'équation :

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} + \frac{p^2}{L_z^2}} \quad (3.8)$$

avec :

- L_x , L_y , et L_z , les dimensions de la salle ;
- c , la célérité du son dans l'air ambiant ;
- m , n , et p , les indices des modes.

Par application de l'équation 3.8, on trouve $f_{100} = 30 \text{ Hz}$. Le centre d'écoute est décalé d'environ 1 m du centre de la salle suivant l'axe (Ox). Ce léger décalage par rapport au nœud de pression lié au premier mode de salle rend possible un ajustement de la courbe de réponse en appliquant une égalisation. L'effet de l'égalisation est présenté à la Figure 3.13 et rend compte de l'amélioration de la fonction de transfert même si des variations par rapport à la réponse cible sont toujours notables. Le critère perceptif n'est pas satisfait malgré les tentatives d'égalisations fines mais l'erreur a été réduite de $\pm 20 \text{ dB}$ à $\pm 5 \text{ dB}$.

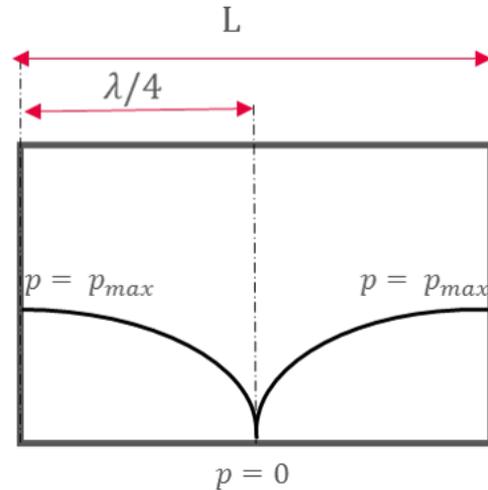


FIGURE 3.12 – Schéma représentant le premier mode d'une salle parallélépipédique aux murs rigides.

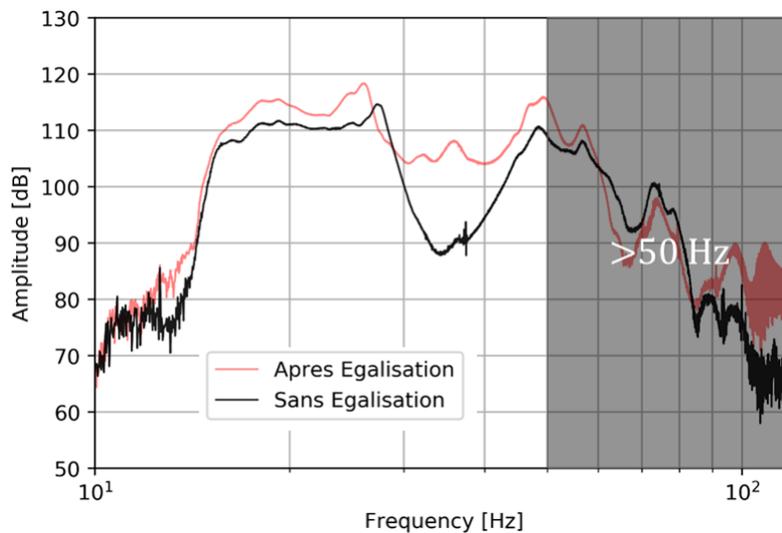


FIGURE 3.13 – Fonction de transfert du caisson de basses Genelec 7070A sans et avec égalisation par filtres en cascades IIR.

Égalisation des moniteurs Yamaha HS7 La Figure 3.14 présente les résultats obtenus des fonctions de transfert des 16 chaînes de transmissions avant et après égalisation suivant la méthode en cascade de filtres IIR (RAMOS et LOPEZ 2006).

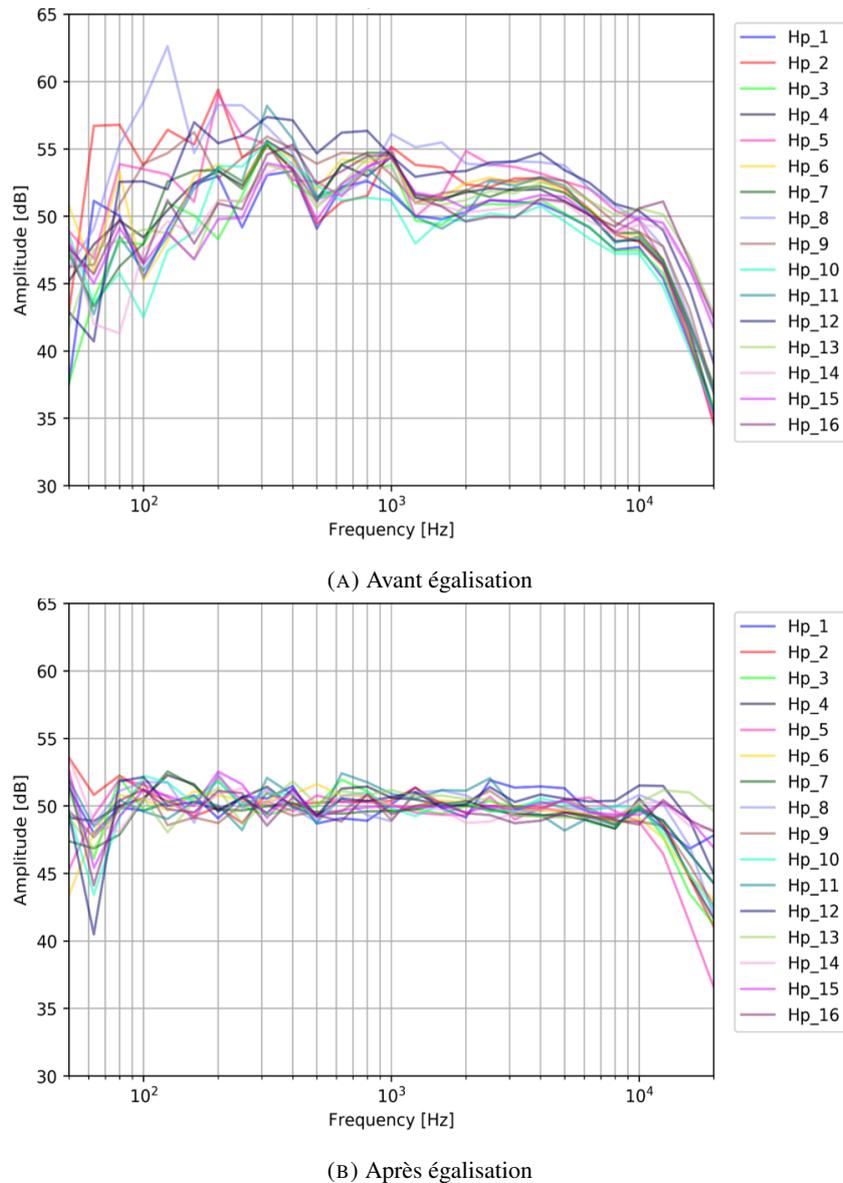


FIGURE 3.14 – Fonctions de transfert de chaque chaîne de transmission - (A) Avant égalisation, et (B) Après égalisation.

L'égalisation induit une amélioration pour chaque chaîne de transmission sur tout le spectre. Le critère perceptif de $\pm 1,2\text{dB}$ est satisfait sur l'intervalle $[100, 10000]$ Hz. Des défauts dans l'égalisation apparaissent autour de 60 Hz. Ils sont semble-t-il liés au premier mode de salle suivant la dimension (Oz) $f_{001} = 60\text{ Hz}$. Au dessus de 10000 Hz une chute sur la fonction de transfert apparaît également pour toutes les chaînes de transmission et n'a pas pu être corrigée.

3.1.3.5 Les modèles de restitution

Afin de reproduire à la fois des sources étendues et/ou localisées, en mouvement ou fixes, trois stratégies de reproductions sont envisagées :

1. Le modèle d'ambisonie (à l'ordre 1) initié par GERZON (1975);
2. Le modèle VBAP développé par PULKKI (1997);
3. La Wave Field Synthesis (WFS) initiée par BERKHOUT (1988).

Ces stratégies de reproductions peuvent être conçues et commandées via MAX/MSP 7. Le choix d'une égalisation spécifique par chaîne de transmission empêche l'utilisation des méthodes d'ambisonie et de WFS puisque chaque filtre produit un décalage de phase inadapté à la reconstruction de champs sonores spatialisés suivant ces méthodes. Si l'une des deux méthodes avait été retenue pour la suite, une modification dans la stratégie d'égalisation aurait été nécessaire avec par exemple, une égalisation moyenne unique pour les 16 haut-parleurs.

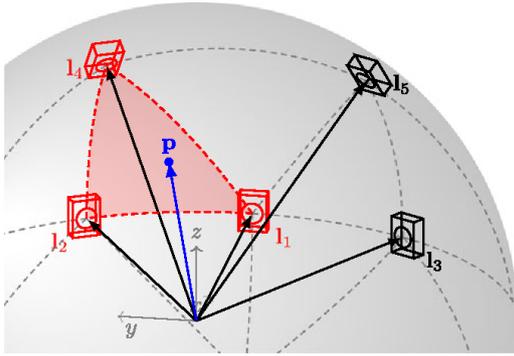


FIGURE 3.15 – Schéma de fonctionnement de la méthode de restitution sonore spatialisée VBAP développée par PULKKI (1997).

Dans le cadre des tests perceptifs envisagés, la méthode de restitution sonore en VBAP a été préférée aux deux autres méthodes. La WFS requière un maillage très fin de haut-parleurs pour la synthèse de champs sonores qui n'aurait pas été possible avec le réseau de 16 haut-parleurs de la MIR. Cette stratégie de restitution ne pouvait donc pas être retenue. Le modèle vbap a donc été préféré au modèle de restitution ambisonique pour sa robustesse de la position perçue et du timbre de la source virtuelle (PULKKI 1997). L'objet « vbap » développé sous Max/MSPⁱ est employé pour le positionnement spatial de sources sonores virtuelles comme illustré à la Figure 3.15. Soit p , le vecteur positionnant la source virtuelle ponctuelle dans l'espace. À partir des coordonnées de p , l'algorithme VBAP sélectionne le

triplet de haut-parleurs le plus proche de cette position, ici les haut-parleurs I_1 , I_2 , et I_4 . Un ajustement en gain est ensuite opéré à chacun des haut-parleurs selon l'équation :

$$p = g_1 I_1 + g_2 I_2 + g_4 I_4, \quad (3.9)$$

avec g_1 , g_2 , et g_4 , les facteurs de gains à appliquer aux 3 haut-parleurs respectifs sélectionnés. Ces facteurs de gains sont calculés suivant l'équation :

$$g = p^T L_{124}^{-1}, \quad (3.10)$$

avec :

- $g = [g_1 \ g_2 \ g_4]^T$, les facteurs de gains calculés et appliqués aux hauts-parleurs après normalisation, ie. $\|g\| = 1$
- $L_{124} = [I_1 \ I_2 \ I_4]$

i. Objet « vbap » sous Max/MSP : développé par Ville Pulkki pour la restitution spatialisée de sources sonores virtuelles et dont la méthode est décrite [ici](#)

3.2 Stratégie d'utilisation du système de restitution

3.2.1 Choix des sources

Toute source sonore utilisée pour ces travaux de thèse est issue d'un enregistrement sonore dont la prise de son est mono, ou stereo. Ces enregistrements sont extraits de bases sonores (BBC sound library ⁱⁱ, Free sound ⁱⁱⁱ, Urban sound ^{iv}, et Universal sound bank ^v ou ont été effectués dans le cadre de l'étude avec un appareil Zoom H5 avec les capsules XY croisées ainsi qu'avec le couple de microphone Office de Radiodiffusion Télévision Française (ORTF) CCM SCHOEPS connecté à la carte son RME fireface UC. À partir d'un enregistrement stereo, un mixage des deux canaux est effectuée sous Reaper ^{vi} en utilisant le channel mode Mono (Mix L+R). Ce choix de réduire une source enregistrée en stereo en un seul signal mono se justifie par souci d'uniformisation du format des signaux. De plus, on part de l'hypothèse qu'un système constructif réduit l'effet de perception du mouvement des sources ponctuelles. Or, un signal stereo peut donner une impression de mouvement de source caractérisé par une variation Gauche Droite des niveaux sonores au cours du temps. Cet effet de source en mouvement n'est pas souhaité dans le cadre de l'hypothèse de rayonnement homogène de paroi. En conséquence, pour rester en cohérence avec cette hypothèse d'atténuation par le bâtiment de l'effet de mouvement des sources, seuls des mixages mono sont conservés et spatialement restitués. L'enregistrement doit être effectué proche de la source. Pour les sons extérieurs au bâtiment, idéalement les enregistrements sont effectués fenêtres ouvertes, à 1 m à l'extérieur du bâtiment.

3.2.2 Filtrage du bâti

3.2.2.1 Méthode

Une source qui émet soit depuis l'extérieur de bâtiment, soit depuis l'intérieur du bâtiment chez le voisin ou depuis les parties communes, se propage et peut rencontrer un élément constructif. Cet élément constructif est excité par la source sonore en fonction de l'énergie incidente reçue. L'excitation peut être aérienne (éclats de voix du voisin) ou issue d'une stimulation solidienne (bruit d'impact de perceuse). Une partie de cette énergie acoustique reçue par l'élément constructif est directement transmise au local de réception, et le reste se répartit selon les chemins de transmissions indirects. Un exemple est présenté à la Figure 3.16 pour rendre compte des chemins de transmissions dans le cas d'une excitation aérienne. La physique qui régit la transmission entre éléments constructifs peut être approchée par la méthode énergétique appelée Statistical Energy Analysis (SEA). En connaissance des courbes d'affaiblissement acoustique R , soit par la mesure en laboratoire selon la norme ISO10140-2 2010 ou bien par la simulation (Transfer Matrix Method (TMM)), ou éléments finis), et en connaissance de données géométriques du bâtiment (dimensions, types de liaisons, etc.), la simulation de l'isolement in situ DnT entre locaux, et de façade est rendue possible. Ces simulations par calcul SEA ont donné lieu au développement de normes décrivant les équations pour l'estimation de l'énergie acoustique transmise suivant chacun des chemins de transmission (direct, et indirect via les latéraux). La norme ISO12354-1 2017 est dédiée à l'estimation de l'isolement aérien in situ entre locaux, et la norme ISO12354-3 2017 décrit le calcul de l'isolement in situ de façade vis à vis des bruits extérieurs. Les données géométriques utilisées dans ces travaux pour décrire le bâtiment à simuler sont décrites à la Figure 4.3.

ii. [BBC sound library](#)

iii. [Free sound](#)

iv. [Urban sound library](#)

v. [Universal sound library](#)

vi. [Reaper: Station de production audio numérique](#)

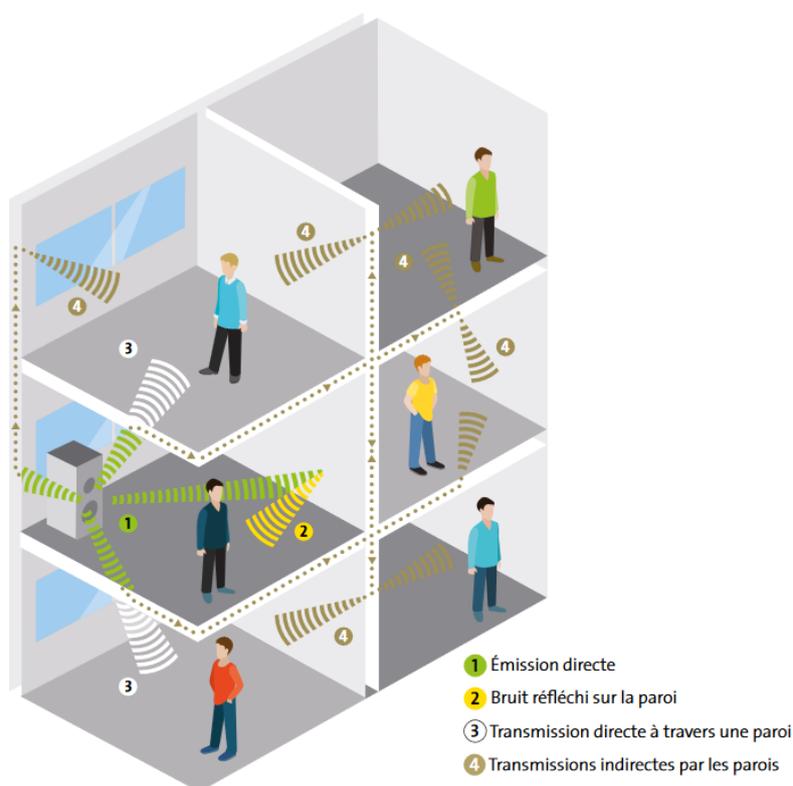


FIGURE 3.16 – Représentation des chemins de transmission de bruit aérien entre locaux - Source : ISOVER Saint-Gobain.

Les limites métrologiques comme numériques rendent difficiles l'évaluation de l'affaiblissement d'élément constructif au delà de 5000 Hz, et en dessous de 50 Hz. Pourtant le spectre audible s'étend de 20 à 20000 Hz. Des décisions ont été prises pour estimer l'isolement DnT dans ces intervalles fréquentiels.

3.2.2.2 Prolongement en hautes fréquences

Une règle de 6 dB par doublement de fréquence a été appliquée de 5000 à 20000 Hz. Dans ces bandes fréquentielles, le niveau sonore des sources est déjà très atténué par les éléments constructifs. Le contenu Hautes Fréquences (HF) des signaux après filtrage devient faible voire inaudible selon les configurations. Par exemple, en appliquant le filtrage du séparatif le moins performant utilisé pendant l'étude ($DnT = 34$ dB à 5000 Hz) sur la source sonore au niveau sonore le plus élevé à 5000 Hz (mesuré à 50 dB), un niveau de source perçu de 26 dB est obtenu. Il découle de cette règle un niveau de source de 4 dB à 10000 Hz (Niveau de la source à 10 kHz avant filtrage = 44 dB).

Cette règle correspond à la loi de masse qui est une approximation valide en dessous de la fréquence critique dans le cas d'un monolithique homogène. Au delà de 5000 Hz, et dans le cadre des systèmes constructifs qui ont été simulés pour ces travaux, on se place au delà de la fréquence critique, mais cette règle des 6 dB par doublement de fréquence a tout de même été appliquée.

3.2.2.3 Extrapolation basses fréquences

En dessous de 50 Hz, il devient difficile d'estimer l'isolation d'un système. Pour évaluer l'influence de différentes stratégies d'extrapolation basses fréquences, un test perceptif a été élaboré dans le laboratoire avec 6 sujets experts. 2 stratégies d'extrapolations ont été évaluées :

1. Le palier
2. L'extrapolation linéaire

Les courbes d'isolements in situ évaluées sont présentées à la Figure 3.17.

La courbe "Palier" est obtenue en répliquant la valeur de la courbe DnT à 50 Hz aux trois tiers d'octaves inférieures. La courbe "Extrapolation linéaire" trace une droite linéaire à partir des des deux premières valeurs du DnT à 50 et 63 Hz. Pour évaluer les différences entre ces courbes, deux sources ont été utilisées : un bruit de trafic routier, et un bruit rose. Les deux filtrages sont ensuite appliqués aux deux signaux ce qui fait un total de 4 stimuli audio à évaluer. L'évaluation perceptif s'est effectuée sous la forme d'un entretien collectif avec les encadrants et des membres de l'équipe du laboratoire. Les échanges ont fait ressortir deux résultats. Aucune différence n'a été perçue entre les deux stimuli de trafic routier. En raison des fluctuations de timbre et de niveau au cours du temps, les légères différences d'isolements sous 50 Hz n'ont pas été perçues. Des différences entre les deux stimuli de bruit rose ont elles bien été perçues, bien que très légères.

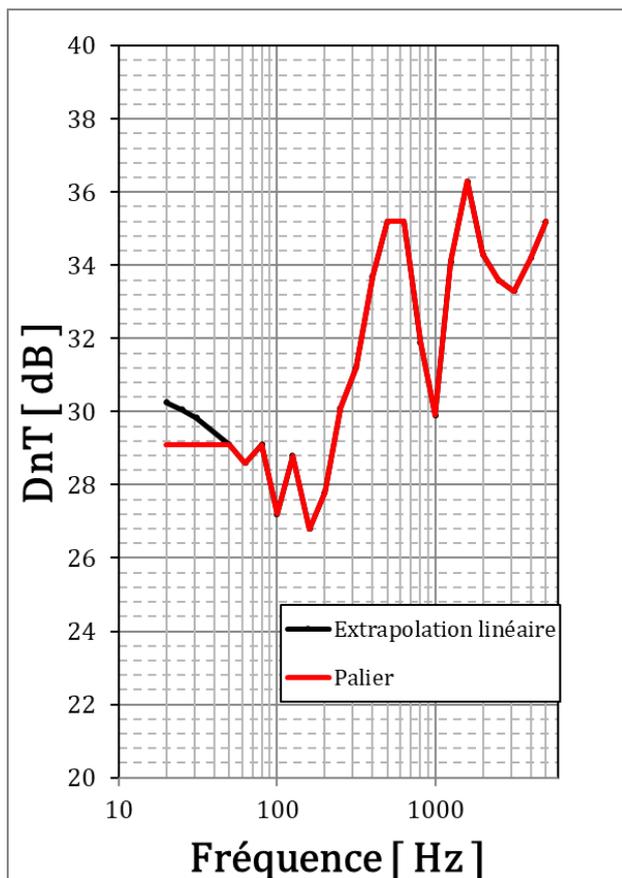


FIGURE 3.17 – Isolement in situ DnT d'une façade vitrée composée d'un simple vitrage 1.45 x 1.40 m - Deux options d'extrapolations basses fréquences sont évaluées.

Il suit de ce résultat qu'en l'absence d'effet perceptif notable entre les deux stratégies d'extrapolations basses fréquences pour un signal instationnaire, le choix arbitraire du palier est retenu pour la suite de l'étude. Ce choix est défavorable pour l'isolement dans les graves.

3.2.3 Spatialisation sonore

3.2.3.1 Rayonnement de paroi

Dans le contexte de logement, les sources émettrices étant filtrées par les éléments constructifs, le rayonnement acoustique vient de la transmission de paroi soit sous la forme de transmission directe ou bien par les latéraux. Il ne s'agit pas d'une source ponctuelle, mais d'une surface radiative. Puisque l'algorithme VBAP restitue seulement les sources ponctuelles, un maillage de 9 sources

virtuelles par paroi a été placé dans l'espace comme représenté à la Figure 3.18 pour simuler le rayonnement de paroi. Il est supposé que le rayonnement de paroi est homogène et qu'il peut être représenté par un réseau de sources virtuelles ponctuelles rayonnant en phase.

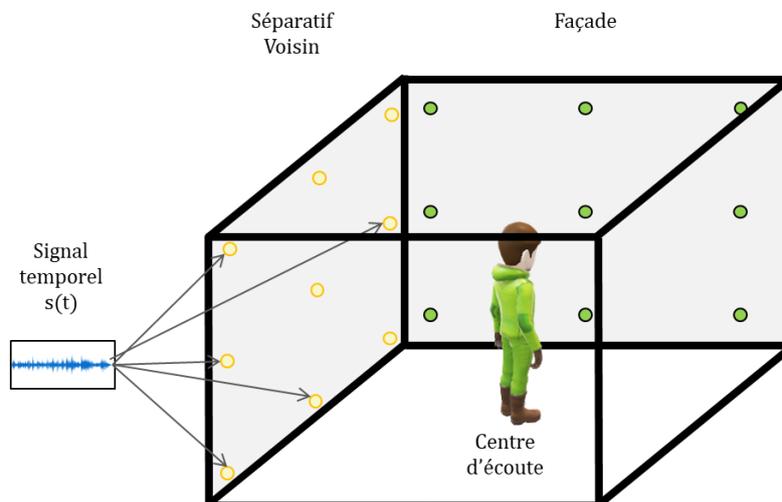


FIGURE 3.18 – Schéma du modèle simplifié d'auralisation employé.

3.2.3.2 Auralisation des contributions directes et indirectes

L'isolement DnT simulé en application des normes ISO12354-1 2017, et ISO12354-3 2017 est calculé à partir des contributions des transmissions directes et indirectes. Chaque chemin de transmission est caractérisé par une courbe d'isolement comme présenté à la Figure 3.19. La stratégie de restitution des divers chemins de transmissions a été déterminée par un test perceptif avec 6 sujets experts. L'objet de ce test vise à comparer deux méthodes de restitution :

1. Le filtrage correspondant à la courbe de DnT global est appliqué au signal et la restitution s'effectue en faisant rayonner uniquement la paroi en transmission directe. Dans cette configuration, toute l'énergie est transmise par le direct grâce au maillage des 9 sources ponctuelles virtuelles émettant en phase ;
2. Les courbes caractérisant les isolements de chaque chemin de transmission sont utilisées pour rendre compte du rayonnement des transmissions (directes et indirectes) des quatre latéraux. Chacune des parois est représentée par un maillage de 9 sources virtuelles. Le signal est filtré en fonction des courbes d'isolements de chaque contribution.

Ces deux stratégies de restitutions ont été évaluées dans deux cas de simulation de systèmes constructifs. Deux isolements entre locaux ont été évalués, l'un constitué d'un séparatif en briques creuses, l'autre constitué d'une cloison légère SAD 160 dont les courbes d'isolement par chemin de transmission sont présentées à la Figure 3.19.

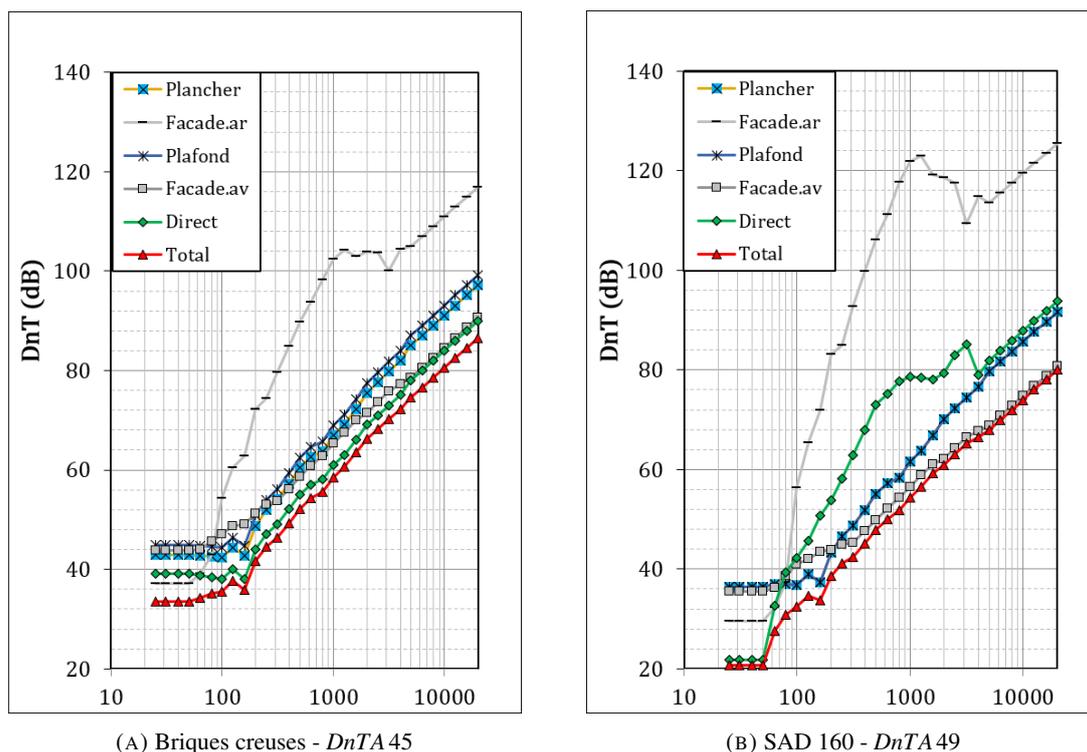


FIGURE 3.19 – Courbes d’isolations in situ par chemin de transmission estimées selon la norme ISO12354-1 2017 pour deux types de séparatifs voisin : (A) Briques creuses ; (B) Cloison SAD160.

La contribution des latéraux à l’isolement global DnT est faible dans le cas des briques creuses et est importante dans le cas de la cloison SAD 160, puisqu’il s’agit d’un système léger. Dans le cas des briques creuses (Figure 3.19a), l’isolement global est dominé par les transmissions directes (à l’exception des basses fréquences sous 50 Hz) alors que dans le cas de la SAD 160 (Figure 3.19b), l’isolement DnT global est dominé par les transmissions latérales provenant de la façade avant dans les medium et HF.

Pour évaluer perceptivement les deux systèmes constructifs suivant les deux méthodes de restitution, une source de fête chez le voisin a été retenue comme stimulus. Les informations sur cette source sont présentées à la Figure 6.2a, disponible à la Section 6.1.2 p.105. Au total, 4 stimuli ont été écoutés correspondant aux deux méthodes de restitution croisées avec les deux systèmes constructifs simulés. Les sujets ont écouté collectivement les stimuli et s’en est suivi un entretien collectif libre. Plusieurs écoutes en comparaisons par paires ont été effectuées. De ces écoutes, plusieurs éléments sont ressortis. Dans le cas de la paroi en briques creuses, des différences entre les deux méthodes de restitution ont été perçues, les deux stimuli ont été évalués réalistes, et l’origine de la source (en provenance du voisin adjacent) a été localisable pour tous les sujets. Dans le cas de la simulation de la SAD 160, les différences entre les deux méthodes sont fortement perceptibles, car la perception de la localisation des contributions directes et latérales change de manière significative selon la méthode. Dans le cas où la source est filtrée selon la courbe de DnT globale puis restituée pour simuler le rayonnement de paroi en transmission direct avec le voisin, l’origine de la source est toujours clairement localisée par les sujets. En revanche, lorsque chaque paroi latérale est simulée pour restituer l’énergie acoustique transmise selon leurs contributions respectives à l’isolement global, la localisation est plus confuse, les sujets perçoivent davantage de volume sonore provenir de la façade en avant. Le sensation d’immersion est meilleure selon la

seconde méthode mais la localisation précise est perdue.

Dans le cadre de ces travaux, le critère majeur est d'empêcher toute confusion dans la perception de localisation. Le sujet ne doit pas douter de l'origine du son, pour qu'il n'y ait pas de confusion entre les sources provenant du voisin et celles provenant de l'extérieur. Pour garantir une localisation de source facilitée, la première méthode d'application d'un filtrage global sur la paroi en contact direct est retenue.

3.2.3.3 Méthode de filtrage des signaux sonores

Dans ce paragraphe, la méthode utilisée pour filtrer les signaux sonores est décrite. Le filtrage est déterminé par l'isolement DnT estimé selon les normes ISO12354-1 2017, et ISO12354-3 2017. Pour appliquer un filtrage en tiers d'octave à un signal sonore temporel, le filtrage Finite Impulse Response (FIR) est choisi. Soit $x(t)$ un signal sonore temporel avant filtrage, avec t la variable temporelle, $y(t)$ le signal de sortie après filtrage. Ces deux variables s'écrivent sous la forme discrète $x[n]$ et $y[n]$, $n \in \mathbb{N}$. Un filtre numérique est défini par sa réponse impulsionnelle $h(n)$. La sortie du filtre est donnée par la convolution entre la réponse impulsionnelle et l'entrée temporelle :

$$y(n) = x(n) * h(n), \quad (3.11)$$

Dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert s'écrit alors :

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = TF[h(n)](f), \quad (3.12)$$

avec $TF[h(t)]$, la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle h , et f la fréquence en [Hz]. On retrouve la formulation exprimée à l'Équation 3.5. Dans le cadre de filtres linéaires invariants, le signal de sortie $y[n]$ peut s'écrire comme une combinaison linéaire des échantillons $x[n]$ et $y[n-1]$ pondérés par les coefficients a_k , et b_k qui sont les coefficients caractérisant le filtrage appliqué :

$$y[n] = a_0 \cdot x[n] + a_1 \cdot x[n-1] + a_2 \cdot x[n-2] + \dots + a_q \cdot x[n-q] + \dots \\ \dots + b_1 \cdot y[n-1] - b_2 \cdot y[n-2] - \dots - b_p \cdot y[n-p] \quad (3.13)$$

En supposant le filtre linéaire, invariant, et causal, l'équation 3.13 se réécrit comme présenté à l'Équation 3.6. Une chaîne de transmission peut être vue comme un filtre caractérisé par sa réponse impulsionnelle. Dans le cas du filtrage FIR, tous les coefficients b_k sont nuls, cela induit que la sortie $y[k]$ ne dépend pas de la sortie de filtre à l'échantillon précédent $y[k-1]$, il s'agit d'un filtre non récursif. Cela implique que si $y[k-1]$ est modifié, cela n'a aucune incidence sur $y[k]$. Le filtrage a été effectué sous le langage de programmation Python en utilisant les bibliothèques `scipy.signal` pour le traitement du signal, `scipy.io.wavfile` pour le traitement de fichiers audio au format wav, et `acoustic.bands`, pour le calcul de bandes de tiers d'octaves. Les coefficients a_k sont d'abord calculés en utilisant la fonction `scipy.signal.firwin2()`, en suivant [ce lien](#). Plusieurs arguments sont donnés en entrée :

- Le nombre de coefficients en sortie $q = 8192$;

- La fréquence de Nyquist définie comme la moitié de la fréquence d'échantillonnage $f_s = 48000$ soit 24000 ;
- Le type de fenêtrage : Hamming ;
- La symétrie de la réponse impulsionnelle : Antisymétrique.

La réponse impulsionnelle décrivant le filtre et caractérisant l'isolement DnT souhaité est ainsi calculée. Le produit de convolution décrit Équation 3.11 sous la forme temporelle est ensuite effectué numériquement en appliquant les équations aux différences déduites de l'équation 3.13 en utilisant la fonction `scipy.signal.lfilter()` expliquée en suivant [ce lien](#).

3.3 Conclusion

Les conclusions de l'état de l'art rendent compte de la nécessité de maîtriser l'objet d'étude, l'environnement sonore et d'être en capacité de mesurer les ressentis variés des individus en fonction de facteurs subjectif, et socio-démographique. La solution choisie pour l'étudier est l'approche de laboratoire. C'est pourquoi un laboratoire de restitution spatialisée d'environnements sonores intérieurs a été mis en place au sein de la MIR de CY Cergy-Paris université. Ce studio d'écoute satisfait aux critères définis par l'AES 1996. La taille du studio de 35 m^2 est satisfaisante, le bruit de fond est suffisamment faible autour de 27 dB et le temps de réverbération RT_{60} est bien compris entre 0.3 et 0.6 secondes sur la région fréquentielle [250-2000] Hz. Le studio a été élaboré, et équipé afin que tout type d'environnement sonore intérieur puisse être spatialement reproduit par l'intermédiaire d'un réseau de 16 haut-parleurs Yamaha HS7i couplé avec un caisson de basses Genelec 7070A. Ce réseau de haut-parleurs est modulaire afin d'adapter le maillage en fonction de l'origine des sources sonores à reproduire, et de la méthode de reproduction sonore choisie (VBAP, ou ambisonie). Sur ces chaînes de transmission audio trois types de réglages ont été opérés :

1. **Définition du "cross-over" (fréquence, et pente)** : filtre couplé passe-bas / passe-haut entre les haut-parleurs et le caisson de basses : 70 Hz avec une pente Linkwidth de 24 dB/octave suivant le critère perceptif défini par Kelloniemi et ses collègues (KELLONIEMI et al. 2005) ;
2. **Retards** : Les hauts-parleurs n'étant pas tous à égale distance du centre d'écoute, des retards ont été appliqués à certains haut-parleurs en fonction de leur distance au point central d'écoute ;
3. **Égalisation de chacune des chaînes de transmissions** : Utilisation des filtres IIR pour corriger la fonction de transfert de chacune des chaînes de transmission suivant le critère perceptif de Ramos (RAMOS et LOPEZ 2006).

Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'algorithme de spatialisation de PULKKI (1997) a été employé grâce à l'objet Max/Msp 7 « *vbap* ». Un maillage de sources virtuelles a été simulé pour imiter le rayonnement en phase des parois : celui de la façade vitrée, ainsi que les séparatifs voisins (plafond, et cloison séparative). L'auralisation des signaux sources pour rendre compte de filtres définis par des performances acoustiques simulées du bâtiment s'effectue en sommant tous les chemins de transmission pour obtenir l'isolement in situ DnT . Tous les chemins de transmission sont pris en compte mais virtuellement localisés suivant un chemin direct. Ce choix a été retenu pour garantir une localisation aisée des sources par les sujets puisqu'il devient alors plus facile d'identifier l'origine des intrusions sonores lorsque seul le séparatif en direct rayonne.

Chapitre 4

La sémantique des sources

4.1 Contexte de l'étude

En milieu résidentiel, de nombreuses sources sonores peuvent être perçues sans contrôle ni acceptation. Ces sons peuvent avoir différentes origines (issu du voisin, de l'extérieur, des parties communes, du domicile) et peuvent être de différentes natures (mécaniques, du vivant, de la nature, etc.). L'agrément sonore de ces sources dépend des préférences individuelles, et de facteurs socio-culturels. Chaque source typique perceptible dans un logement peut être décrite en termes d'attributs du signal mais aussi en fonction de leur contenu sémantique. L'objectif de ce chapitre est de rendre compte de l'influence de la sémantique sur la sensation d'agrément pour un ensemble de sources typiques perceptibles dans un logement résidentiel. Ainsi, les préférences individuelles des sujets seront mieux comprises. Certaines sources feront peut-être consensus (appréciées par tous, ou rejetées par tous), et d'autres susciteront des avis plus contrastés. L'objectif de ce test est donc de caractériser les goûts individuels pour ensuite choisir et maîtriser le potentiel d'agrément des sources sonores qui seront utilisées pour les tests perceptifs suivants. Ce travail a fait l'objet d'une publication en congrès à l'International Commission for Acoustics (ICA) (DEDIEU, LAVANDIER, CAMIER et BERGER 2019)

4.2 Le perçu

4.2.1 Les sources sonores

4.2.1.1 Introduction

Sur la base de l'étude bibliographique dédiée à l'étude des sources sonores et décrite à la Section 2.2, p. 15, un ensemble de 35 sources sonores ont été composées suivant 5 origines :

1. Le voisin :
 - (a) Adjacent ;
 - (b) Du dessus ;
 - (c) Des parties communes.
2. L'extérieur du bâtiment par la façade vitrée ;
3. Le logement lui-même.

Ces provenances de sources sont directement inspirées des questionnaires de gêne sonore au domicile dont les sources évaluées sont explicitées dans les Tableaux 2.1, 2.2, et 2.3, à la Section 2.2.1.2 page 18. Le choix des sources individuelles évaluées dans le cadre de ce premier test d'écoute est détaillé dans le Tableau 4.1. Ces scènes ont chacune été composées pour représenter le prototype de leur catégorie sémantique et pour couvrir la grande variété de sources sonores pouvant être perçues dans un logement résidentiel en milieu urbain. Les scènes ont été composées à partir de

matériaux sonores extraits de bases sonores (BBC sound libraryⁱ, Free soundⁱⁱ, Urban soundⁱⁱⁱ, et Universal sound bank^{iv}) et d'enregistrements effectués avec un appareil Zoom H5 avec les capsules XY croisées ainsi qu'avec le couple de microphones ORTF CCM SCHOEPS connecté à la carte son RME Fireface UC. Chacun des stimuli est écouté à un niveau de pression équivalent L_{Aeq} de 35 dB(A) afin que le niveau sonore ne puisse pas influencer la perception d'agrément du sujet. Chacun des extraits sonores dure 30 secondes et est diffusé en boucle pour que le sujet prenne le temps souhaité avant de l'évaluer.

4.2.1.2 L'intérieur du logement

Une seule source issue de l'intérieur du logement est évaluée dans le cadre de cette étude, la ventilation intérieure. Les sources sonores domestiques intérieures au logement sont des sources ayant trait au personnel, à l'intime. Dans l'approche de laboratoire choisie, les ambiances de l'intérieur du logement perdent leur dimension affective car les sources ne pourraient pas être suffisamment familières pour des participants.

4.2.1.3 Bruit d'impact

Les bruits de pas, de chute ou de mouvement d'objets qu'elles soient issues des parties communes, ou des voisins sont au premier ordre de la gêne (Voir analyse bibliographique Section 2.2.1.2). Pourtant ils sont peu traités dans le cadre de ces travaux de thèse. Seuls trois représentants sont évalués dans ce premier test. L'effet des isollements aux bruits d'impacts sur la perception ne seront en outre pas du tout évalués sur l'ensemble de ces travaux de thèse. La décision de ne pas étudier l'une des premières sources de gêne chez les usagers des logements (BALANANT et al. 2014; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013b) se justifie par deux aspects, l'un lié à des limitations techniques, et le second en raison d'un choix d'orientation. L'auralisation des bruits d'impacts est un sujet de recherche actuel et d'un niveau de complexité plus important que celui de l'auralisation des isollements aux bruits aériens (VORLAENDER 2008). L'interaction entre la source d'impact et le sol est un facteur crucial pour déterminer la puissance vibratoire transférée de la source vers le récepteur. Une source d'impact commune comme les bruits de pas par exemple doit encore être étudiée de façon plus approfondie pour pouvoir restituer l'interaction entre cette source et le plancher (VORLAENDER et DIETRICH 2008). La première justification tient donc d'un choix de simplification de l'étude. D'autre part, une thèse sur le confort acoustique a été initiée en parallèle par Saint-Gobain Weber. Cette thèse, publiée en 2019, avait dans son approche l'étude du bruit d'impact comme priorité (N. VARDAXIS 2019). Le choix de ne pas traiter les isollements aux bruits d'impacts s'est donc aussi justifié pour garantir une complémentarité entre nos travaux respectifs.

4.2.1.4 Parties communes

Les sources sonores issues des parties communes ressortent comme des sources particulièrement gênantes (HONGISTO, MÄKILÄ, HAAPAKANGAS et al. 2013b; BALANANT et al. 2014; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013b). Une scène sonore constituée de bruits de pas dans les escaliers et du son d'une porte d'entrée de hall qui claque a donc été choisie pour être la source prototypale de cette catégorie. Elle a été enregistrée sous Reaper dans un hall d'entrée parisien, à l'aide d'une carte son RME Fireface UC et d'un couple de microphones stereo CCM SCHOEPS.

i. [BBC sound library](#)

ii. [Free sound](#)

iii. [Urban sound library](#)

iv. [Universal sound library](#)

Désignation	Description	Type	Origine
Traf.	Trafic routier sur avenue dans Paris	Mécanique	Façade
Traf. Constant	Trafic continu sur voie rapide	Mécanique	
Hum. & Traf.	Trafic dans petite rue avec voix humaines et pas (femme et enfant)	Mix*	
Hum. & Traf. 2	Trafic dans petite rue avec voix humaines et bruits de pas	Mix*	
Traf. & Nat.	Trafic, orage et pluie	Mix*	
Traf. & Nat. 2	Trafic, et chants d'oiseaux	Mix*	
Nat. & Hum.	Enfants jouant et chants d'oiseaux	Mix*	
Nat. & Hum. 2	Chants d'oiseaux, individus parlant, marchant	Mix*	
Hum.	Individus parlant	Vivant	
Nat.	Chants d'oiseaux, cours d'eau	Nature	
Nat. 2	Cours d'eau	Nature	
Hum. & Traf. & Nat.	Chants d'oiseaux, Passages de voitures, enfant parlant, et bruits de pas	Mix*	
Travaux Ext.	Travaux avec sons de marteau-piqueur	Mécanique	Voisin adjacent
Avion	Passage d'avion	Mécanique	
Aspi. Adjacent	Aspirateur	Mécanique	
Machine à Laver	Machine à laver en mode essorage	Mécanique	
Canalisations	Chasse d'eau	Mécanique	
Diner	Voisins parlants, riants	Vivant	
Fête	Musique et voisins parlants, riants	Mix*	
Dispute	Énervements de voisine	Vivant	
Enfants Adjacent	Enfants jouant avec raclements d'objets	Vivant	
Enfants Adjacent 2	Voix d'enfants qui jouent	Vivant	
TV Doc.	Télévision diffusant un documentaire animalier de la BBC	Vivant	
TV Film	Télévision diffusant le film The Dark Knight	Vivant	
Mus. BF Adjacent	Système 2.1 HI-FI diffusant du Hip-Hop Kendrick Lamar - Humble	Musique	
Mus. Pop.	Système 2.1 HI-FI diffusant de la musique Pop. Ed Sherann - Shape of you	Musique	
Mus. Guitare	Voisin jouant de la guitare Erik Satie Gnossienne No. 01	Musique	
Mus. Piano	Voisin jouant du piano Chopin Nocturne No. 20 in C-Sharp Minor	Musique	
Pleurs	Femme qui pleure	Vivant	
Travaux Int.	Perceuse du voisin	Mécanique	
Aspi. du Dessus	Aspirateur	Mécanique	Voisin du dessus
Enfants du Dessus	Enfants jouant avec raclements d'objets	Vivant	
Musique BF du Dessus	Système 2.1 HI-FI diffusant du Hip-Hop Kendrick Lamar - Humble	Musique	
VMC	Système de ventilation	Mécanique	Intérieur au salon
Cage Esca.	Pas, Porte qui claque dans la cage d'escaliers	Vivant	Parties communes

TABLEAU 4.1 – Description des stimuli sonores.

4.2.1.5 Les voisins adjacents ou de dessus

Parmi la liste exhaustive de sources sonores proposées dans la littérature, 17 sources typiques en provenance du voisin ont été sélectionnées, composées et enfin restituées spatialement dans le laboratoire. Ces 17 sources sont réparties en quatre familles sémantiques : Mécanique, Vivant, Musique, et un mélange entre les sons du vivant et de la musique. Peu de travaux traitent des catégories sémantiques des sons domestiques. Le choix de ces familles s'inspire donc des travaux

sur la catégorisation sémantique des sons environnementaux (A. BROWN et al. 2011 ; LAFAY 2016). Une simplification de la taxonomie aux trois grandes familles principales a été nécessaire pour traiter un nombre raisonnable de stimuli.

Le choix définitif de sources est justifié par les principaux résultats de l'analyse bibliographique et synthétisés à la Section 2.2.1.4, page 27. Puisque les bruits d'impacts ont été exclus de l'étude, parmi les sources gênantes de voisinage, les bruits de voix ont été retenus comme stimulus sous la forme d'une ambiance sonore de dîner avec des éclats de voix. Les éclats de voix de rire ou de pleurs sont également représentés avec les stimuli de fête, de pleurs, et de dispute.

Les études in situ ont aussi mis en évidence la gêne induite due à la télévision, et de la musique Hifi en provenance du voisin. Deux extraits de programmes télévisuels ont été sélectionnés, un extrait de film d'action, et un extrait de documentaire animalier. Pour les échantillons de musique amplifiée, deux études ont spécifié la composante basses fréquences de la musique dans leur description (BALANANT et al. 2014 ; LJUNGGREN, SIMMONS et HAGBERG 2013a). Pour rendre compte de ce contraste, deux sources de musique amplifiée ont été composées, l'une avec un fort contenu basses fréquences (musique Hip-Hop), l'autre avec un contenu spectral plus équilibré (Musique Pop.). Ces deux titres ont été sélectionnés car ils se sont classés premiers au Billboard de 2018 respectivement dans les catégories Album, et Single. Ensuite, puisqu'une différenciation de perception entre la musique naturelle jouée ou rediffusée via un système amplifié a été mise en évidence par GUASTAVINO (2007), deux stimuli d'enregistrements de musique jouée ont été sélectionnés. Il s'agit de stimuli de musique classique l'un joué par un piano soliste, l'autre joué par un duo de guitares sèches. Enfin dans la famille sémantique des sons mécaniques, 4 sources ont été retenues : l'aspirateur, le lave-linge, la chasse d'eau, et le bruit de perceuse. Ces sources ont été sélectionnées parmi la liste exhaustive de sources détaillées dans les études in situ décrite à la Section 2.2.1.2.

4.2.1.6 L'extérieur

Une littérature riche sur le thème des sources sonores environnementales est disponible grâce aux nombreux travaux de recherche sur l'environnement sonore urbain (Voir analyse bibliographique à la section 2.2.1.2). Deux grandes familles sémantiques d'ambiances sonores urbaines ont été mises en évidence (GUASTAVINO 2007). Les ambiances urbaines avec une prédominance de trafic, et celles avec une prédominance de voix humaines. De ces deux grandes familles, la catégorie des sons de nature a été ajoutée pour ce test d'écoute pour obtenir une plus grande variété dans les ambiances. Les sons de nature contribuent à l'évaluation d'agrément sonore d'une ambiance sonore urbaine (DELAITRE 2013 ; AUMOND et al. 2017). Les scènes sonores issues de l'extérieur du bâtiment ont été composées en fonction de trois grandes familles sémantiques : les sons mécaniques, les sons du vivant, et les sons de nature (Voir Figure 4.1).

Au total, 14 sources sonores ont été composées. 5 scènes sonores dans ce corpus sont constituées de sources n'appartenant qu'à l'une des trois familles (passage d'avion, trafic routier avec passages à faible vitesse, trafic continu sur voie rapide, voix humaines de passants, et chants d'oiseaux avec bruit de cours d'eau). Pour les 9 restantes, elles ont été composées pour être des mélanges de 2 ou des trois catégories sémantiques. Ainsi, deux scènes sont constituées d'un mélange de sons de nature et de bruit de trafic, deux autres sont constituées d'un mélange de sons de nature avec des sons du vivant, deux autres sont constituées de sources des familles vivant, et trafic et enfin une dernière source se compose d'éléments (événements, textures) des trois catégories sémantiques. Cette dernière scène sonore comprenant des sources des trois catégories sémantiques est directement issue des travaux de thèse de Lafay (LAFAY 2016). Dans le cadre de ses travaux,

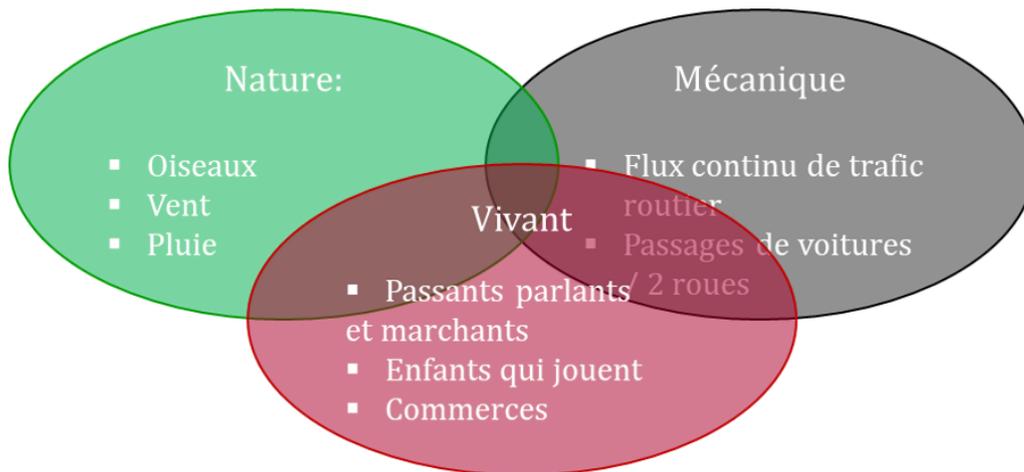


FIGURE 4.1 – Schéma des catégories sémantiques utilisées pour composer les scènes sonores issues de l'extérieur.

des scènes d'environnements sonores urbains idéales ont été composées par les participants de son test. L'une d'entre elle (scène idéale 10) est constituée d'une diversité de sons intéressante : sons de voix d'enfants, d'abolements de chien, de bruit mécaniques de transports, de bruits de pas, et de chants d'oiseaux. Cette scène a donc été retenue puisqu'elle correspondait à la composition visée d'un mélange des trois familles sémantiques. Pour les sources de trafic, les scènes sonores composées ont été inspirées des catégories définies par Morel pour couvrir un large spectre de typologies de sources de trafic (2 roues à allure accélérée, véhicule léger à allure accélérée, et enfin bus, poids lourds, et véhicules légers à allure décélérée)(MOREL 2012).

4.2.2 Les performances du bâtiment

Dans un logement, les performances acoustiques du bâtiment influent sur le signal perçu par l'habitant comme décrit Chapitre 3, Section 3.2.3, p. 54.

	Façade		Séparatif voisin	Séparatif parties communes	
	Béton 12 cm	Vitrage 4mm (1.45 x 1.40) m	Partition alvéolaire 72	Porte à âme pleine	Partition alvéolaire 72
$R_w(C;C_{tr})$ (dB)	52(-1; -6)	22(0; -1)	29(-1; -1)	22 (-1; -4)	29(-1; -1)

TABLEAU 4.2 – Performances acoustiques des éléments constructifs utilisés pour le test perceptif. L'indicateur global R_w a été calculé selon le standard ISO 717/1.

Même si pour ce premier test perceptif, l'influence du bâtiment n'est pas étudiée, il est nécessaire de rendre compte à minima du filtrage induit par les performances simulées du bâtiment décrit Tableau 4.2. Les performances du bâtiment sont faibles afin que chacune des sources puisse plus facilement être interprétée et comprise. Les performances présentées Tableau 4.2 sont ensuite intégrées dans un calcul SEA prenant en compte les différents chemins de transmissions des ondes sonores en fonction de la géométrie du bâtiment et des performances des matériaux qui le constituent. La géométrie du bâtiment est décrite à la Figure 4.3 et les résultats de simulations sont présentés au Tableau 4.3 et à la Figure 4.2. Tous les signaux sont ensuite égalisés en niveau sonore équivalent $L_{Aeq,30s}$ à 35 dB(A). L'effet des différents filtrages de bâti n'impacte ici que le timbre du signal sonore. En comparant les différents isolements obtenus, on observe que l'isolement entre les parties communes et le salon est plus faible que celui entre le salon et le logement voisin. Les deux séparatifs sont constitués d'une partition alvéolaire mais la présence d'une porte à âme pleine réduit l'isolement au dessus de 800 Hz.

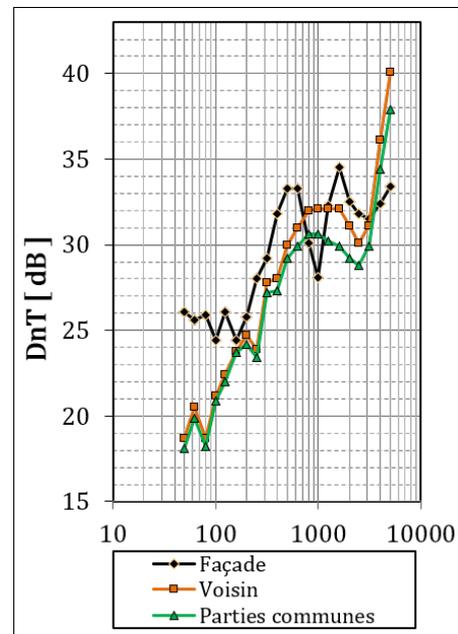


FIGURE 4.2 – Courbes d'isolements aux bruits aériens entre locaux et de façade déterminées en application des normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017.

Séparatif	Indicateur	Performance acoustique
Voisin adjacent	$D_{nT,w}$ $(C, C_{tr}, C_{50-3150}, C_{tr,50-3150})[dB]$	31 (-1 ; -2 ; -1 ; -2)
Façade	$D_{2m,nT,w}$ $(C, C_{tr}, C_{50-3150}, C_{tr,50-3150})[dB]$	32 (-1 ; -2 ; -1 ; -2)
Parties communes	$D_{nT,w}(C, C_{tr})$ $(C, C_{tr}, C_{50-3150}, C_{tr,50-3150})[dB]$	30 (-1 ; -2 ; -1 ; -2)

TABLEAU 4.3 – Indicateurs globaux calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isolements aux bruits aériens venus de l'extérieur, et entre deux locaux ; les coefficients C et C_{tr} sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.

4.3 La procédure, la mesure

4.3.1 Évaluation subjective et questionnaire

Les participants devaient écouter attentivement chacun des sons pendant au minimum 30 secondes avant de répondre sur une tablette tactile contrôlée avec le logiciel Max/MSP 7^v. L'interface utilisateur (notée GUI) présentée à la Figure 4.5 est constituée de 6 barres tactiles de défilements ("sliders") allant de la valeur -50 à +50 (-50 = Désagréable ; +50 = Agréable). Chaque son est écouté individuellement. Cette interface est inspirée des travaux de Parizet et ses collègues qui mirent en évidence l'avantage d'avoir les échelles d'évaluation des stimuli sur un même écran (PARIZET et al. 2005). Une photo de l'une des participantes est présentée à la Figure 4.4 pour rendre compte de l'utilisation de la tablette de contrôle pendant le test d'écoute. Pour des raisons d'ergonomie, les 35 stimuli ne peuvent pas être affichés sur le même écran. Seuls 6 stimuli sont évalués sur une même page et les sujets sont libres de naviguer sur l'une des 6 pages. Ils peuvent revenir en arrière à tout moment pour réécouter des stimuli et modifier les notes d'agréments associées.

D'autre part, un questionnaire a été élaboré pour principalement évaluer les facteurs non-acoustiques pouvant influencer les sujets. Le questionnaire est organisé en cinq grandes parties et est fourni en Annexe A

1. Informations générales de contact ;
2. Retours d'expériences sur le test d'écoute :
 - (a) Évaluation de la décoration du salon ;
 - (b) Évaluation du réalisme des ambiances sonores ;
 - (c) Fréquence de reconnaissance des provenances des sons ;
3. Description du logement du sujet ;
4. Évaluation de la sensibilité au bruit suivant le questionnaire de GRIEFAHN (2008) ;
5. Évaluation de la qualité de vie du participant (ROCHA et al. 2012).

4.3.2 Procédure

Les participants sont d'abord informés de la nature de l'expérience (ie. évaluation de l'agrément de différents stimuli sonores). Ils doivent s'imaginer chez eux en soirée dans leur salon. Par cohérence avec la mise en situation, les rideaux et volets de la façade vitrée sont fermés, et les lumières

v. Max/MSP : Language de programmation audio-visuel

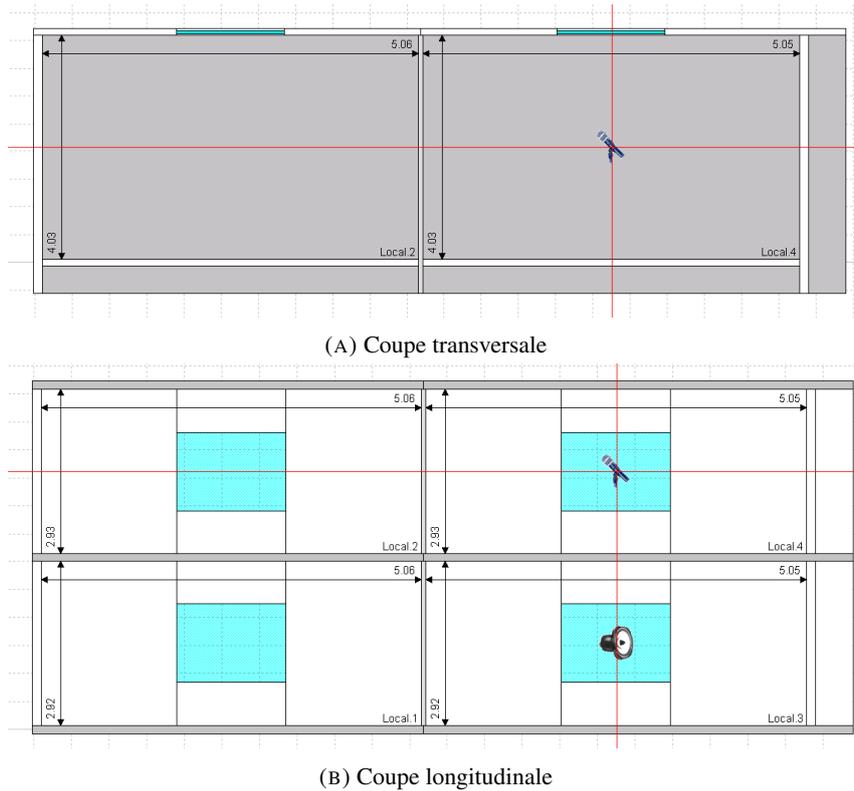


FIGURE 4.3 – Plans de coupes du bâtiment utilisé pour les calculs d’isollements acoustiques (Source : Acoubat, CSTB) (A) Transversale ; (B) Longitudinale.



FIGURE 4.4 – Photo d’une participante au premier test d’écoute.

du salon du laboratoire sont allumées, de sorte que le contexte visuel soit constant quel que soit l’horaire de passage du participant. Tous les sujets signent un consentement pour valider qu’ils ont bien compris la procédure expérimentale, et qu’ils sont d’accord pour effectuer l’intégralité de l’expérience.

L’expérience commence avec une session d’entraînement consistant en une écoute de quatre stimuli. Les sujets se familiarisent avec l’interface utilisateur et ainsi perçoivent la variété des sons à évaluer qu’ils soient déplaisants (Travaux dans la rue, soirée chez le voisin) ou au contraire

Partie 1/6

Imaginez que vous êtes dans votre salon.
 Vous allez entendre des extraits de bandes sonores. Vous devez dire si ces situations sont agréables ou au contraire désagréables.
 Pour commencer:
 1) Appuyez sur "Lecture"
 2) Placez le curseur en fonction de votre ressenti (-50 = Désagréable ; 50 = Agréable)

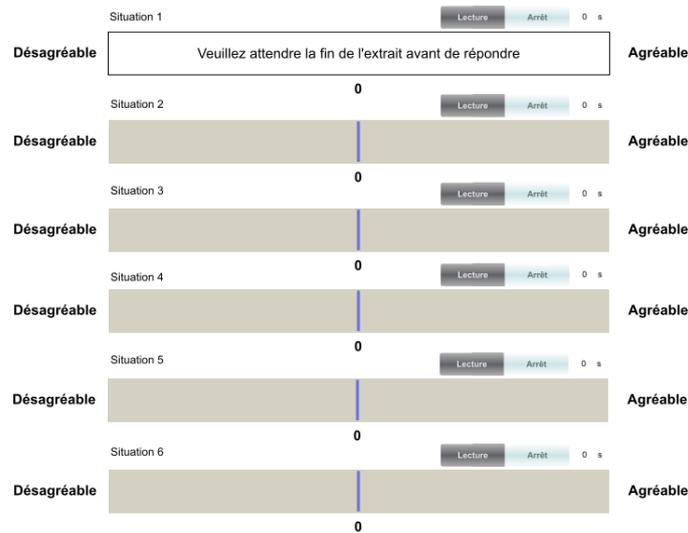


FIGURE 4.5 – Capture d'écran de l'interface utilisateur sur tablette tactile utilisée pour effectuer le premier test d'écoute.

plaisants (Sons de nature venant de la façade, musique classique jouée chez le voisin). Avec cet entraînement, les sujets peuvent calibrer leur échelle d'agrément. Ces données d'entraînements ne sont pas exploitées dans l'analyse.

Le test d'écoute est ensuite effectué. Chaque page de l'interface permet l'évaluation de 6 stimuli sonores. Une fois les 6 premiers évalués, le participant peut aller à la page d'après pour continuer le test d'écoute. À tout moment, le sujet peut revenir en arrière pour modifier une ou plusieurs évaluations et réécouter des stimuli déjà évalués en suivant les recommandations de Parizet et ses collègues (PARIZET et al. 2005). Dès que l'ensemble des 35 sons a été noté, il leur est demandé de remplir le questionnaire décrit en Annexe A. Enfin, un audiogramme est réalisé pour évaluer si le sujet souffre de troubles auditifs.

Au total, 69 participants ont participé à ce test perceptif. Pour l'un d'entre eux (participant P14), les résultats de l'audiogramme ont révélé une déficience auditive moyenne (BIAP 2002). Les résultats de ce sujet ont donc été exclus de l'analyse. Deuxièmement, 3 sujets ont abandonné l'étude avant son terme en ne se présentant pas aux second et troisième test perceptif. Les résultats de ces trois sujets (participants P1, P2, et P39) ont également été exclus afin de conserver un panel cohérent sur l'ensemble de l'analyse des trois tests. En définitive, les résultats de 65 participants ont été analysés.

4.4 Résultats

4.4.1 Origine des sons

Comme décrit dans le Tableau 4.1, trois sources sonores ont été écoutées à deux reprises dans deux directions différentes, une fois provenant du côté droit du sujet correspondant au voisin adjacent, une fois provenant du dessus correspondant au plancher du voisin du dessus. Ces trois écoutes dupliquées visent à évaluer si l'origine des sons influence la perception d'agrément. Les résultats des évaluations d'agrément pour chaque paire de sons sont présentés à la Figure 4.6 et montrent que malgré des différences entre chacune des paires de distributions, les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes.

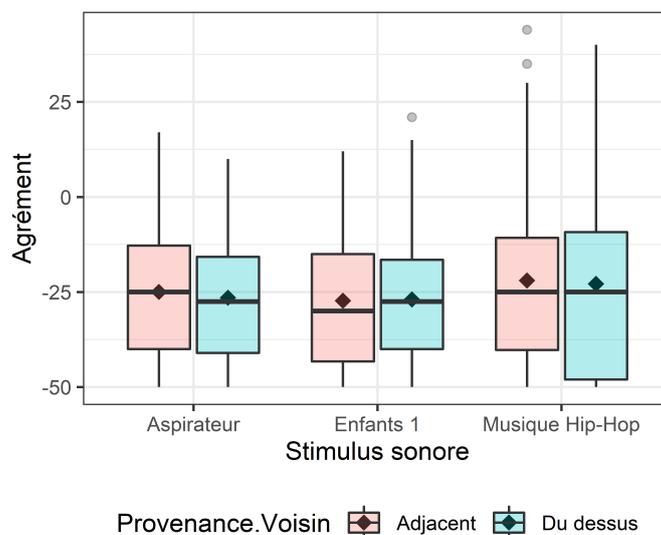


FIGURE 4.6 – Distributions d'agrément sonores pour les stimuli écoutés à deux reprises de deux provenances différentes. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. ♦ : Valeur moyenne; – : Valeur médiane.

Désignation de la paire	Moyenne adjacent	Moyenne dessus	Test de Student apparié		
			t-test	df	p-value
Aspi.	-24.9	-26.1	0.75		0.450
Enfants	-27.4	-27.2	-0.12	65	0.901
Musique BF	-22.4	-22.9	0.71		0.483

TABLEAU 4.4 – Différences moyennes pour les paires de stimuli sonores : Test de Student apparié.

Pour confirmer cette analyse graphique, le test de Student apparié est effectué et les résultats présentés dans le Tableau 4.4 montrent que les différences ne sont pas significatives puisque p-value > 0.05 pour chacun des trois tests statistiques effectués. L'hypothèse « $\mathcal{H}_0 : \mu_0 = \mu_1$ » est acceptée, aucune différence significative d'agrément n'est en moyenne mesurée lorsque la provenance change.

Puisque pour chaque paire, il n'existe aucune différence significative d'agrément, tous les résultats pour les trois stimuli provenant du voisin du dessus sont retirés de l'analyse afin d'empêcher

que le poids de ces sources ne soit augmenté en raison de la duplication. Pour conclure, dans le cadre d'une excitation sonore aérienne rayonnée en direct par la paroi, aucun effet de localisation sur l'agrément n'a été mesuré en laboratoire. Que la source provienne du dessus, ou du côté, l'agrément n'est pas modifié.

4.4.2 Analyse par Composantes Principales

L'ACP est une analyse statistique exploratoire multidimensionnelle. Cette méthode est décrite en Annexe B et définit les principales composantes comme les principales dimensions de variabilité dans le jeu de données. En plus d'une description de la méthode, cette annexe B fournit tous les détails de l'ACP effectuée sur les résultats de ce test perceptif. Seuls les principaux résultats synthétiques sont donc explicités dans cette section. En première approche, L'ACP permet d'obtenir des résultats synthétiques pour estimer comment les participants ont évalué les stimuli sonores. Lorsque le jeu de données contient un grand nombre de variables, l'ACP vient résumer toutes les variables en un nombre réduit de dimensions pour lesquelles l'inertie est maximisée. La notion d'inertie est définie à l'équation B.3, de l'annexe B, page 179 et correspond à la mesure de dispersion du nuage de points dans l'espace des composantes principales. Le tableau de données initial sur lequel l'ACP est effectuée est disponible en annexe C et est sous la forme suivante :

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{Stimulus } i \\
 I = 35 \\
 (\text{Moy.}, SD)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{cccc}
 1 & & & \\
 x_{11} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1K} \\
 \vdots & \ddots & & & \vdots \\
 & & x_{ik} & & \\
 \vdots & & & \ddots & \vdots \\
 x_{j1} & \dots & x_{jk} & \dots & x_{jK} \\
 (\bar{x}_1, s_1) & & (\bar{x}_k, s_k) & & (\bar{x}_K, s_K)
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Sujet } P_k \\
 K = 65
 \end{array}
 \end{array}$$

Les variables x_k sont les profils de réponses des participants. La colonne k de la matrice correspond aux réponses du sujet noté " P_k " pour tous les stimuli qu'il a évalué. Cette matrice est donc constituée des notes d'agrément de chacun des sujets pour tous les stimuli écoutés individuellement. Elle possède donc 65 colonnes (variables) et 35 lignes (observations) correspondant aux 65 individus ayant écouté et évalué les 35 stimuli audio.

Puisque l'ACP est effectuée en prenant les profils d'agrément des participants comme variables, elle tend à révéler les individus les plus corrélés entre eux. En effet, lorsque que les variables sont bien projetées c'est à dire quand le \cos^2 est suffisamment grand, on peut écrire :

$$\cos(\varphi_{x_k, x_l}) \simeq r(x_k, x_l) \quad (4.1)$$

Avec φ_{x_k, x_l} , l'angle entre les deux variables projetées dans le plan de projection de l'ACP. Celle-ci a été effectuée en utilisant la fonction `PCA()` du package `FactoMineR` développé par Lê et ses collègues sous le langage de programmation R^{vi} (Lê et al. 2008).

Les premiers résultats sont présentés dans le diagramme des corrélations à la Figure 4.7. Ce diagramme représente le plan de projection de l'ACP de variabilité maximum. Sur cette figure, chaque flèche décrit les corrélations de chacun des participants sur les deux premières dimensions de l'ACP. Chaque flèche est identifiée par un label décrivant le participant auquel elle fait référence. Le gradient de couleur utilisé révèle la qualité de projection de chaque variable et est mesuré par l'indicateur \cos^2 , tel qu'il est décrit à l'équation B.9, dans l'annexe B, 186. La flèche bleue désigne

vi. [R-project](#) : R, un langage open-source de programmation pour le calcul statistique et la visualisation

par le label "Means" représente la corrélation du vecteur de l'agrément moyen sur l'ensemble des sujets avec les deux principaux facteurs de ACP.

Les deux axes d'inertie maximum représentent 68% de l'inertie totale. Le choix de ne conserver que 2 dimensions est explicité dans l'annexe B, page 179. Le diagramme révèle que la première dimension est consensuelle puisque presque tous les participants sont positivement et grandement corrélés à cette dimension. Cet axe explique la grande majorité de la variabilité des données de départ puisque l'inertie expliquée par la première dimension est de 60%.

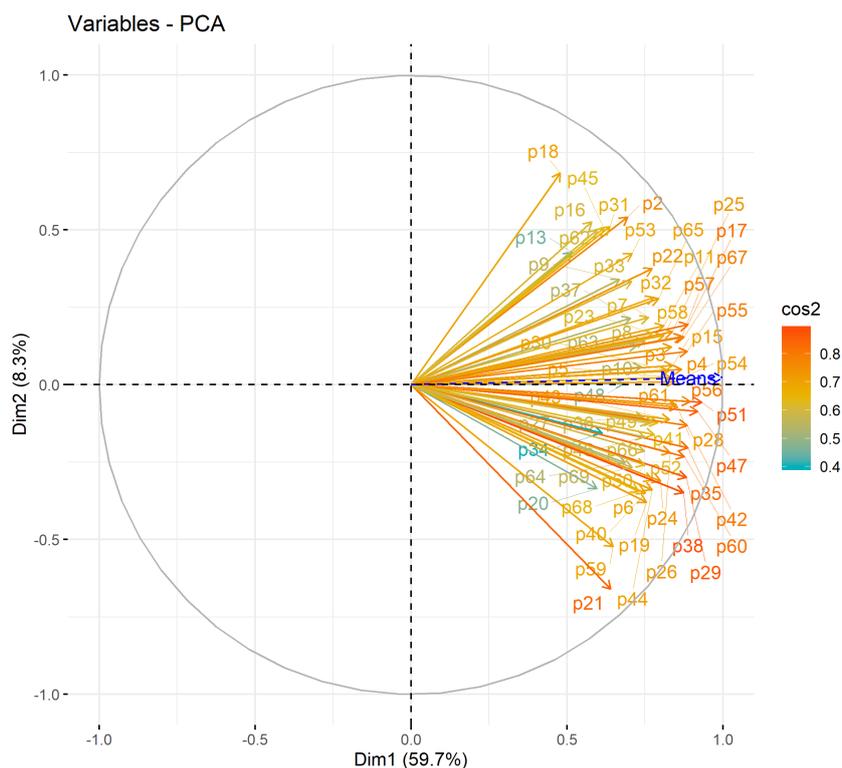


FIGURE 4.7 – Diagramme de corrélation projeté sur les deux plus grandes dimensions de variabilité. Les flèches correspondent aux corrélations des variables par rapport aux deux premiers facteurs de l'ACP. Le gradient de couleur révèle la qualité de projection de chaque variable et est mesuré par l'indicateur \cos^2 , tel qu'il est décrit à l'équation B.9, dans l'annexe B, page 186. La flèche bleue désignée par le label "Means" représente la corrélation du vecteur de l'agrément moyen sur l'ensemble des sujets avec les deux principaux facteurs de ACP.

La Figure 4.8 présente le nuage de points des stimuli sonores projeté sur ce plan de variabilité maximale (Dimensions 1 & 2). Des consensus sont obtenus aussi bien pour les sons intrusifs venant du voisin que pour ceux venant de l'extérieur. Pour les sons intrusifs venant de l'extérieur, les participants préfèrent les sons de nature et rejettent les sons de travaux sur la voie publique. Et pour ceux en provenance du voisin, les participants préfèrent la musique classique et rejettent les activités humaines. De plus, le vecteur constitué des valeurs moyennes sur l'ensemble des participants pour chacun des stimuli est calculé : la mesure de corrélation entre ce vecteur des réponses moyennes et la première dimension de l'ACP est égal à 0.9994 (voir Figure 4.7). La première dimension de l'ACP correspond au comportement moyen d'évaluation d'agrément des sources sonores. Autrement dit, les sons qui ont une coordonnée négative faible sur cette dimension

sont perçus en moyenne comme déplaisants et au contraire ceux avec une coordonnée positive élevée sont en moyenne évalués plaisants.

Ensuite, pour interpréter ce que la dimension 2 de l'ACP représente, la Figure 4.8 montre à la fois les contributions des stimuli sur les deux premières dimensions de l'ACP et les corrélations des deux participants extrêmes sur la dimension 2. Il découle de l'analyse que la dimension 2 émerge surtout en raison des stimuli musicaux du voisin et en particulier du stimulus de musique commerciale de genre Pop.

Pour confirmer cette première interprétation, deux groupes sont formés, le premier groupe constitué de participants tous positivement corrélés à la seconde dimension, et le second au contraire tous négativement corrélés à cette même dimension. La Figure 4.9 présente les profils de réponses d'agrément moyens pour ces deux groupes et montre que les plus grands écarts d'agrément sont obtenus avec les stimuli de musique actuelle : la fête, la musique Hip-Hop avec un contenu basses fréquences, et la musique Pop. Les deux groupes formés sont constitués de respectivement 33, et 32 participants chacun dont la répartition est présentée au Tableau 4.5.



FIGURE 4.8 – Représentation des stimuli sur le diagramme de corrélation de l'ACP.

La dimension 2 est donc principalement influencée par la perception des individus des stimuli de musique comparés aux stimuli de nature. Par exemple, les participants 18 et 21 sont opposés sur

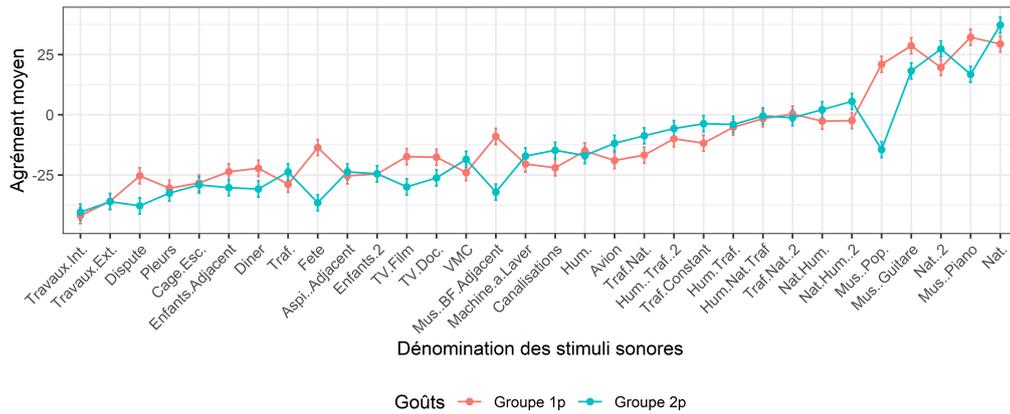


FIGURE 4.9 – Profil d'agrément sonore pour les deux groupes d'individus dont les goûts musicaux diffèrent.

Groupe 1p	Groupe 2p
P6, P19, P20, P21, P24, P26, P27, P28, P29, P34, P35, P36, P38, P40, P41, P42, P43, P44, P46, P47, P49, P50, P51, P52, P54, P56, P59, P60, P61, P64, P66, P68, P69	P2, P3, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P13, P15, P16, P17, P18, P22, P23, P25, P30, P31, P32, P33, P37, P45, P48, P53, P55, P57, P58, P62, P63, P65, P67

TABLEAU 4.5 – Répartition des sujets en fonction de leurs préférences musicales déterminées à partir du calcul de corrélation de chaque sujet avec la seconde dimension de l'ACP présentée à la Figure 4.7.

la dimension 2. Le participant 21 perçoit plaisant tous les types de stimuli de musique venant du voisin. Sa préférence est davantage portée sur les extraits de musique plutôt que ceux de nature. La perception du participant 18 est opposée, préférant les sons de nature venant de l'extérieur plutôt que n'importe quel type de musique venant du voisin. Aucun facteur non-acoustique ne caractérise significativement ces groupes.

Même si la variabilité inter-individus est élevée, la source principale d'inertie dans le jeu de données est l'agrément moyen des sources (60% de la variabilité totale). Classifier ces sources en fonction de cet agrément moyen est donc justifié et est présenté à la Figure 4.10. En moyenne, seulement 7 stimuli sonores ont été évalués positivement (sons de nature avec ou sans présence humaine et sons de musique classique). Les sons les plus désagréables en moyenne sont les travaux sur la voie publique, le trafic routier, la perceuse du voisin, et toutes les activités humaines dans le bâtiment tels que la soirée, la femme qui pleure, des bruits de pas du voisin ou dans la cage d'escalier. Enfin la source de ventilation seule source intérieure au logement a été perçue en moyenne désagréable.

4.4.3 Formation de 2 groupes d'individus

Une analyse statistique de CAH (LÉ et al. 2008) est effectuée afin de montrer les similitudes entre participants en fonction de leur profil d'agrément. La similitude est mesurée sur la base d'un calcul de distance euclidienne suivant la méthode de Ward (minimisation de la variabilité intra-classe et maximisation de la variabilité inter-classe). Les résultats de la CAH sont présentés

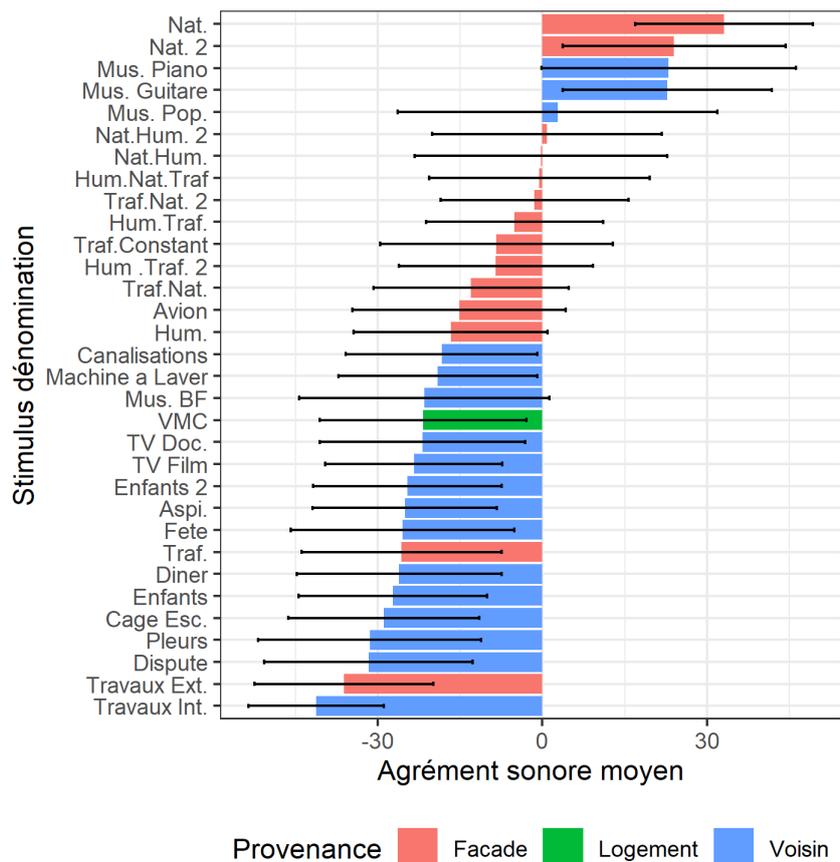


FIGURE 4.10 – Classement d'agrément moyen des stimuli et écarts-types associés (-50 = Très désagréable ; +50 = Très agréable).

dans un dendrogramme à la Figure 4.11. Pour déterminer le nombre de groupes à conserver, 3 tests statistiques ont été effectués. Le résultat du nombre de groupes à conserver dépend de la méthode utilisée ("elbow", silhouette, ou écart statistique) et varie de 1 jusqu'à 4. Le choix s'arrête à 2 groupes pour faciliter l'interprétation. Les groupes 1, et 2 comprennent respectivement 32, et 33 sujets. Ces deux groupes sont constitués d'autres participants que ceux formés à partir de l'ACP et déduits des préférences musicales. La nouvelle répartition des sujets est présentée au tableau présenté à la Figure 4.12.

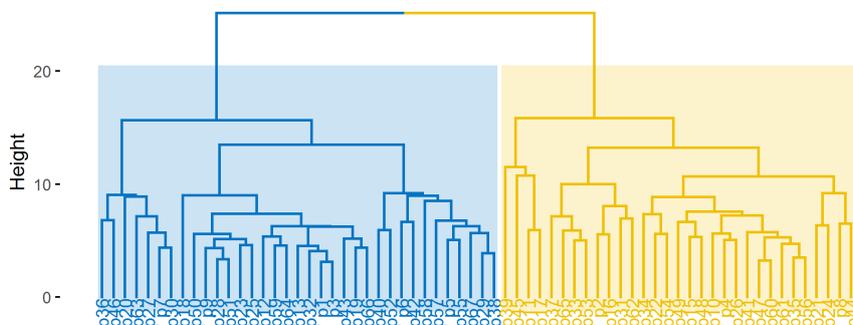


FIGURE 4.11 – Dendrogramme des participants issu de la CAH suivant la méthode de Ward.

Deux types de tests ont été effectués afin de caractériser ces deux groupes sur la base des

réponses au questionnaire décrit Section 4.3.1 p.65. Afin d'évaluer si une variable quantitative caractérise l'un des deux groupes, le "v-test" est calculé tel qu'il est défini Section 3.3 du document décrivant la librairie FactoMineR (Lê et al. 2008). L'objet de ce test est de comparer les valeurs prises par la variable d'un groupe donné comparé à celles prises par une variable aléatoire. Si l'hypothèse H_0 supposant que les valeurs de la variable étudiée décrivent une distribution aléatoire est vérifiée, alors celle-ci ne décrit pas bien le groupe. En revanche, s'il est peu probable ($p - value < 0.05$) que ces valeurs soient aléatoirement distribuées, alors la variable quantitative testée est susceptible de bien décrire le groupe. Les résultats du "v-test" ^{vii} sont présentés Tableau 4.6. Le Tableau 4.6 présente les 12 variables significatives pour lesquelles le "v-test" est plus grand que la valeur recommandée 1.96. Les résultats des tests sur les variables dont la valeur de p est supérieure au seuil des 5 % ne sont pas présentés dans le tableau. Au total, 7 variables quantitatives complémentaires ont été testées : deux variables de sensibilité (auto-évaluée en une question, et issue des résultats au questionnaire de Griefahn (GRIEFAHN 2008)), deux variables de QoL (auto-évaluée en une question, et issue des résultats au questionnaire de Da Rocha (ROCHA et al. 2012), la variable d'âge, celle de satisfaction à l'égard du confort acoustique au domicile, et les variables d'évaluation de l'expérience, en termes de réalisme visuel (décoration), et sonore. De ces 7 variables, seulement 2 caractérisent nos groupes.

Description	v.test	p.value		Moyenne (\pm SD)		Moyenne globale
				Groupe 1	Groupe 2	
Sensibilité au bruit	2.91	3.60e-03	**	7.03 \pm 1.41	5.94 \pm 1.38	6.47 \pm 1.50
Confort acoustique	-2.11	3.50e-02	*	2.81 \pm 1.18	3.47 \pm 1.24	3.15 \pm 1.26
Enfants Adjacent	-6.01	1.88e-09	***	-40.12 \pm 9.65	-14.76 \pm 12.73	-27.06 \pm 17.01
Cage d'escaliers	-5.29	1.21e-07	***	40.62 \pm 11.08	-17.97 \pm 14.59	-28.95 \pm 17.25
Diner	-4.81	1.48e-06	***	-37.28 \pm 12.82	-15.15 \pm 16.56	-25.88 \pm 18.52
TV Film	-4.72	2.35e-06	***	-32.84 \pm 13.20	-14.03 \pm 12.85	23.15 \pm 16.06
Hum.	-4.25	2.15e-05	***	-26.00 \pm 16.14	-7.53 \pm 13.60	-16.48 \pm 17.52
TV Docu.	-4.14	3.39e-05	***	-31.34 \pm 15.95	-12.21 \pm 15.95	-21.48 \pm 18.60
Fête	-4.41	3.39e-05	***	-31.34 \pm 15.95	-15.15 \pm 19.39	21.48 \pm 18.60
Dispute	-3.95	7.72e-05	***	-41.31 \pm 12.40	-22.82 \pm 19.47	-31.79 \pm 18.85
Travaux	-3.79	1.52e-04	***	-47.15 \pm 12.24	-35.64 \pm 14.24	-41.23 \pm 12.24
Enfants Adjacent 2	-3.75	1.75e-04	***	-32.94 \pm 14.24	-17.02 \pm 15.90	-24.74 \pm 17.08

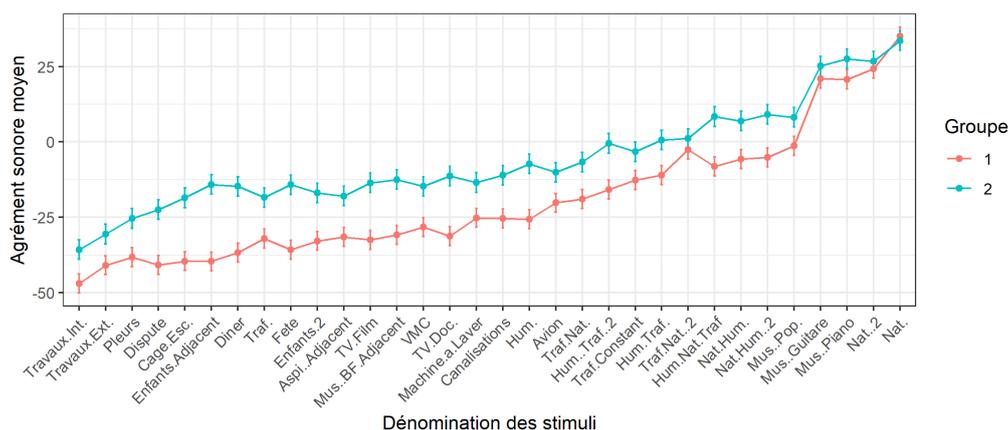
Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 4.6 – Description des groupes de la CAH par des variables quantitatives.

Deux variables descriptives (ie. non utilisées dans le calcul de la CAH) sont l'évaluation de sensibilité au bruit et l'évaluation de la satisfaction du confort acoustique au domicile. L'analyse statistique montre que les participants du groupe 1 sont plus sensibles au bruit, moins satisfaits à l'égard du confort acoustique dans leur domicile, et perçoivent les sons intrusifs liés aux activités humaines du voisin plus déplaisants (Enfants qui jouent, Pas dans la cage d'escaliers, Diner, Film etc.). Les participants du groupe 2 sont quant à eux moins sensibles au bruit, davantage satisfaits à l'égard du confort acoustique dans leur domicile, et perçoivent les sons intrusifs liés aux activités humaines du voisin plus plaisants. Les deux autres variables descriptives (Évaluation de la qualité de vie, et Age) ne caractérisent pas bien ces deux groupes.

Les tests de χ^2 n'ont pas permis de décrire ces deux groupes à l'aide de variables descriptives qualitatives. Par exemple, il n'y a significativement pas plus d'actifs de 30-50 ans et moins d'étudiants 18-30 ans dans l'un des groupes. La Figure 4.12 présente les évaluations moyennes

vii. Les valeurs du "v-test" ne sont présentées que pour le groupe 1. Pour le groupe 2, il s'agit des mêmes valeurs absolues mais elles sont de signes opposés



Groupe 1	Groupe 2
P2, P4, P6, P8, P10, P11,	P3, P5, P7, P9, P13, P18,
P15, P16, P17, P21, P22, P24,	P19, P20, P23, P25, P27, P28,
P26, P31, P33, P35, P37, P41,	P29, P30, P32, P34, P36, P38,
P42, P44, P47, P48, P49, P53,	P40, P43, P45, P46, P50, P51,
P54, P55, P56, P60, P61, P62,	P52, P57, P58, P59, P63, P64,
P65, P69	P66, P67, P68

FIGURE 4.12 – Comparaison des groupes issus de la CAH - Agrément moyen par groupe en fonction de la scène sonore et répartition des sujets.

d'agrément de chacun des groupes formés et pour chacun des sons. De manière générale, les participants du groupe 1 ont évalué tous les stimuli comme moins agréables et les différences moyennes sont significatives.

4.4.4 Conclusion

Ce premier test d'écoute a fait ressortir des consensus. Le classement de l'agrément moyen pour les 35 sources évaluées (Figure 4.10) rend compte des sons faisant consensus positivement (nature, musique classique), et celles à l'opposé faisant consensus négativement (travaux extérieurs et chez le voisin, trafic routier, etc.). Des points de vue typés sont cependant ressortis. Deux types de regroupements se sont constitués en fonction de la tolérance aux nuisances sonores et en fonction des goûts (musicaux notamment).

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la manière dont les participants perçoivent la superposition de ces sources en milieu résidentiel. Il serait intéressant de questionner les résultats du premier test d'écoute dans cette nouvelle expérience. Est-ce que les préférences musicales influenceront sur les réponses individuelles ? Les groupes de goûts musicaux révélés au premier test seront-ils retrouvés au second ? Le choix des sources utilisées au second test devra intégrer ces sources clivantes pour confirmer ou infirmer ce résultat. D'autre part, des liens entre sensibilité, satisfaction à l'égard du confort acoustique au domicile, et évaluation d'agrément sonore ont été relevés par l'analyse des résultats de ce premier test d'écoute. La question de savoir si ces variables ressortiront à nouveau comme des facteurs influant la perception se posera et sera étudiée par la suite dans le cadre de l'étude des mélanges de sources aux provenances variées.

Chapitre 5

Superposition des sources

5.1 Contexte de l'étude

Dans un logement, de nombreuses sources sonores peuvent être perçues simultanément. Des effets de masquages sonores peuvent alors apparaître conduisant à des modifications de la perception. Pour évaluer si ces effets de masquages influent significativement sur la sensation d'agrément, un test d'écoute a été développé afin de rendre compte de l'effet de la superposition de sources variées venant à la fois du voisin adjacent, de l'extérieur du bâtiment, et de l'intérieur du logement. Ces stratégies de masquages sont évaluées par l'intermédiaire d'une interface interactive grâce à laquelle les sujets ajustent le niveau sonore relatif entre les sources afin d'obtenir un environnement sonore optimisé. Deux optimisations successives sont demandées, la première visant à obtenir l'environnement sonore le plus agréable et la seconde, le moins agréable. Cette approche de design sonore s'inspire des travaux de BROCOLINI, LAVANDIER et al. (2019) et vise à rendre compte des optimisations possibles lorsque des moyens de contrôle de l'environnement sonore sont donnés aux individus. Les différences entre groupes de sujets vont-elles s'exprimer ? Des stratégies différenciées selon les environnements sonores testés vont-elles être mises en évidence en raisons de préférences individuelles ? Ce chapitre fera l'objet d'un article en conférence au Forum Acusticum de Lyon en Décembre 2020.

5.2 Filtrages de bâti

Les mêmes filtrages qu'au premier test ont été choisis pour les besoins de cette étude. Les filtrages de simple vitrage pour la façade ainsi que de la cloison alvéolaire en séparatif voisin ont été appliqués aux signaux audio selon leurs courbes d'isollements associées. Ces isollements acoustiques ont été présentés au Chapitre 4, dans la Section 4.2.2, p.64.

5.3 Sélection de sources typiques

Cette expérience nécessite de réduire le nombre de sources par rapport au test précédent pour maintenir un temps de passage du test inférieur à 1h30 afin de limiter la fatigue des sujets. Les choix des scènes sonores conservées au second test s'effectue en fonction de trois critères. D'une part, les préférences musicales mises en évidence au premier test seront évaluées au second pour analyser si le clivage entre les deux groupes formés Section 4.4.2 induit des stratégies différentes de masquages sonores. C'est pourquoi les stimuli musique commerciale ont été conservés. Ensuite, des sons plus consensuels ont été choisis pour couvrir un large spectre d'agrément allant des plus désagréables (travaux chez le voisin, trafic routier de l'extérieur), au plus agréables (sons de nature, musique classique). Des sons relativement désagréables selon les résultats moyens d'agrément présentés à la Figure 4.10 sont choisis pour compléter la sélection :

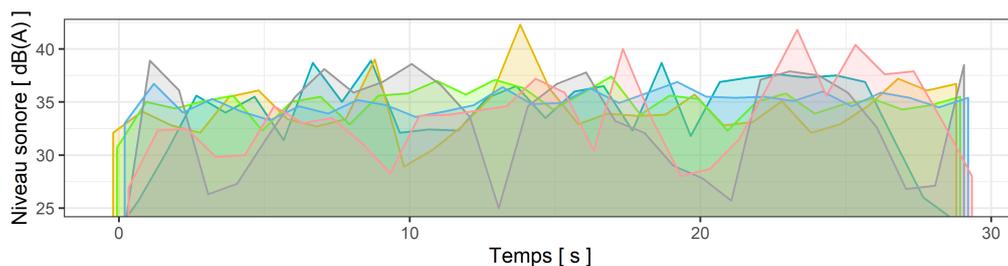
- En provenance du voisin :

- Enfants adjacent
- TV Doc.
- En provenance de l'extérieur par la façade vitrée :
 - Nat. & Hum.
 - Hum. & Traf.
 - Avion

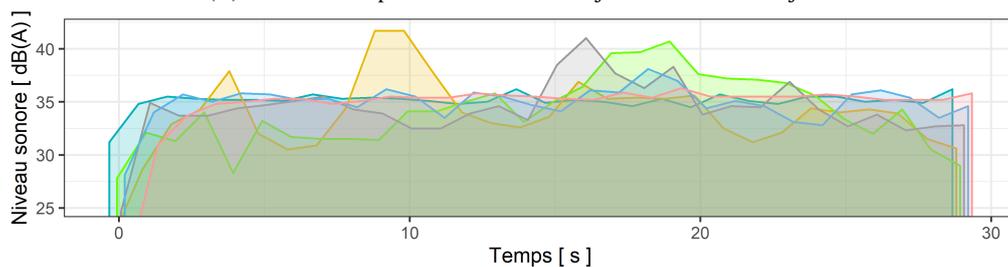
Une seule source intérieure au logement est choisie pour le test, il s'agit d'un bruit de ventilation d'extraction d'air typique en provenance de la cuisine ouverte. Au total, 12 sources sonores ont été choisies dont 6 sources en provenance du voisin, 5 en provenance de l'extérieur du bâtiment, et une intérieure au logement. Chaque source de voisin sera évaluée mélangée avec chacune des sources de l'extérieur du bâtiment. Au total, 30 combinaisons de sources seront composées et testées. La caractérisation acoustique de ces signaux est présentée à la Figure 5.1 pour l'évolution temporelle et à la Figure 5.2 pour les spectres de niveaux équivalents pondérés A en tiers d'octaves. Cette caractérisation a été effectuée par un enregistrement sonore au point central d'écoute de chacun des stimuli diffusé individuellement sur la chaîne de reproduction spatialisée du salon d'écoute. Cette prise de son a été effectuée avec une carte son RME Fireface UC, et un microphone à condensateur Schoeps CMC6-U avec capsule MK6 en position omnidirectionnelle.

Les évolutions temporelles rendent compte de différences entre stimuli. Des stimuli présentent une évolution temporelle assez stable avec de faibles variations (Fête, Mus. Pop., VMC, Hum. & Traf., Nat. & Hum., et Nat.) et d'autres au contraire plus fluctuantes (Travaux.Int., Enfants Adjacent, TV.Doc., Mus.Guitare, Trafic, Avion, et Hum. & Traf.). Cela s'explique par la nature même des stimuli qui se caractérise par des émergences plus ou moins marquées. En comparant les spectres des stimuli du voisin à la Figure 5.2a à ceux de la façade présentés à la Figure 5.2b, des différences significatives apparaissent au delà de 800 Hz avec un contenu milieu et hautes fréquences plus important pour les sources de façade.

Enfin, les sons caractérisés par un contenu basses fréquences significatif sont la Fête contenant de la musique Hip-Hop, les travaux intérieurs, le documentaire animalier, la ventilation, le passage d'avion, et le bruit de trafic routier. Le spectre du bruit de travaux de perceuse contient en plus du contenu en basses fréquences, un contenu hautes fréquences important comparé aux autres stimuli du voisin. Les stimuli Nat. et Nat. & Hum. se distinguent aussi par ce contenu hautes fréquences et s'explique par la présence d'oiseaux.

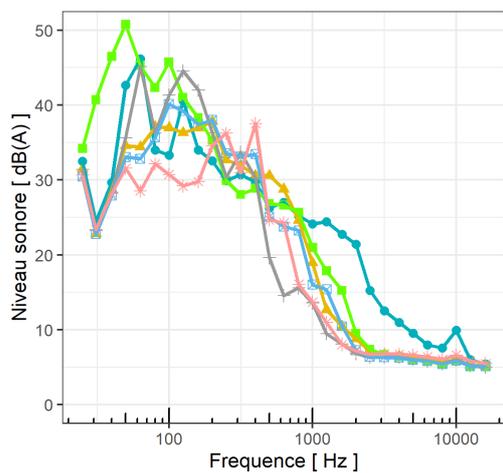


(A) Les 6 stimuli provenant du voisin adjacent à droite du sujet.

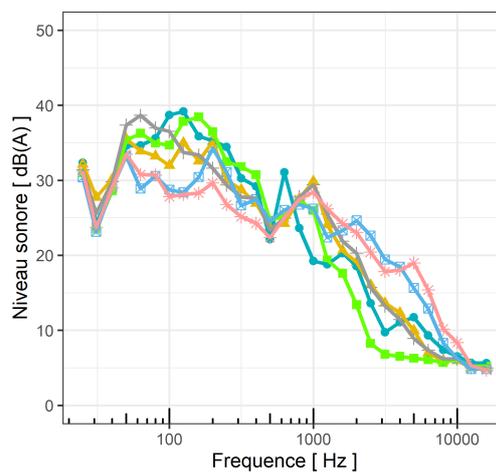


(B) Les 5 stimuli provenant de la façade vitrée et celui intérieur au logement, la ventilation.

FIGURE 5.1 – Évolutions temporelles (en secondes par pas de 1 sec.) des niveaux sonores en dB(A) pour les 12 stimuli utilisés au test 2.



(A) Les 6 stimuli provenant du voisin adjacent à droite du sujet.



(B) Les 5 stimuli provenant de la façade vitrée et celui intérieur au logement, la ventilation.

FIGURE 5.2 – Spectres en tiers d'octaves des niveaux sonores équivalents sur 30s notés $L_{eq,30s}$ en dB(A).

Les stimuli ont été composés pour être les représentants types des catégories sémantiques choisies dans la cadre d'une étude sur le logement résidentiel en milieu urbain ce qui a pour conséquence d'obtenir des spectres et évolutions temporelles diversifiées.

5.4 Méthode

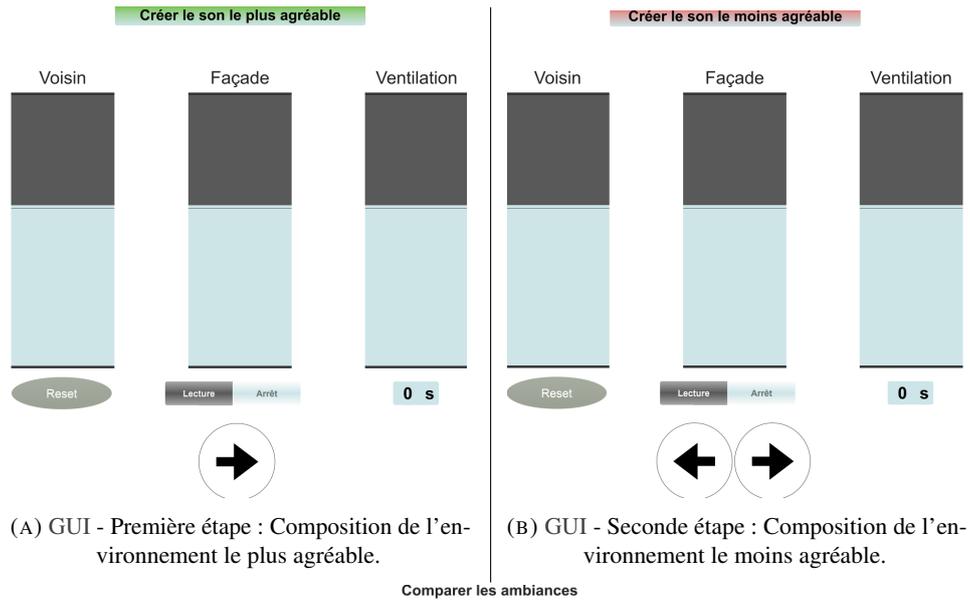
Pour ce second test perceptif, la même chaîne de restitution sonore spatialisée est exploitée grâce à un GUI développé sous Max\MSP 7. Cette interface est présentée à la Figure 5.3 et se déroule en quatre étapes pour chaque combinaison de sources. Cette interface est contrôlée par une tablette tactile que le sujet pose sur ses genoux toute la durée de l'expérience. L'interface présente dans un premier temps trois pistes sonores. Chaque piste joue en boucle un stimulus sonore de 30 secondes d'un niveau équivalent $L_{Aeq,30s}$ de 35.25 dB(A) de sorte que le niveau global constitué de la somme des trois scènes soit égal à 40 dB(A). La première piste correspond au stimulus sonore provenant du voisin adjacent situé à la droite du sujet, la seconde correspond à la source provenant de la façade vitrée en face du sujet et donc issue de l'extérieur du bâtiment et enfin la troisième correspond à une source de ventilation intérieure au logement située en haut à l'arrière droit du sujet. Le sujet doit tout d'abord régler le niveau sonore de chaque piste afin d'obtenir l'environnement sonore le plus agréable possible (voir Figure 5.3a). Puisque le programme est conçu pour que le niveau sonore équivalent $L_{Aeq,30s}$ reste constant égal à 40 dB(A), alors si le sujet augmente une piste sonore de 1 dB(A) alors le niveau des deux autres est diminué de 0.6 dB pour que le niveau sonore équivalent reste constant. Chaque piste peut avoir un niveau sonore au maximum égal à 38.75 dB(A) ce qui correspond à une augmentation de 3.5 dB(A) par rapport à la situation de départ.

Pour garantir un niveau sonore équivalent constant en dB(A), le programme ajuste le niveau des deux autres pistes suivant l'équation 5.1. Soit L_1 , L_2 , et L_3 les niveaux sonores respectivement des pistes du voisin, de la façade, et de la ventilation. En supposant que le sujet ajuste le gain d'une valeur x ($x \in [-5, 3.5]$ dB(A)) pour l'une des pistes et par exemple la piste 1 du voisin. Alors, pour déterminer la valeur y à ajouter aux niveaux L_2 , et L_3 , le programme applique la formule suivante :

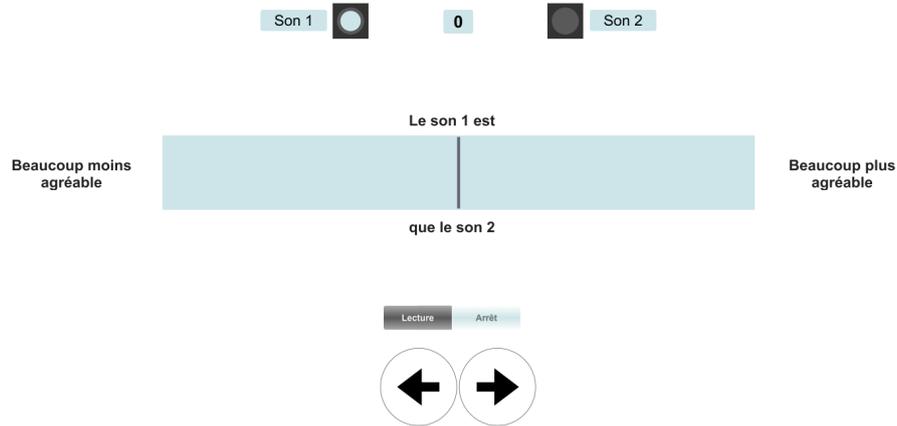
$$y = -10 \log_{10} \left[1 + \frac{10^{\frac{L_1}{10}} - 10^{\frac{(L_1+x)}{10}}}{10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}}} \right] \quad (5.1)$$

Une fois le sujet satisfait avec son mixage le plus agréable il passe à la seconde étape présentée à la Figure 5.3b. Dans cette seconde étape, le sujet doit ajuster le niveau sonore de chaque piste afin d'obtenir l'ambiance sonore la moins agréable, soit l'exacte opposée de la première étape. Une fois la seconde ambiance sonore composée, le sujet continue ensuite vers la troisième étape présentée à la Figure 5.3c. À cette étape, le sujet doit écouter les deux ambiances qu'il vient de mixer individuellement pour les comparer et répondre si le son 1 est plus ou moins agréable que le son 2. Le sujet y répond sur une échelle sémantique de 101 points allant de -50 (beaucoup moins agréable) à +50 (beaucoup plus agréable). Les sons 1 et 2 ont une probabilité de 0.5 de suivre l'ordre chronologique c'est dire que le son 1 soit l'ambiance la plus agréable, et le son 2 l'ambiance sonore la moins agréable. La présentation des sons 1 et 2 est inversée pour 50% des évaluations. Cette alternance est nécessaire pour que l'intégralité de l'échelle sémantique soit utilisée. Une fois cette comparaison faite, le sujet peut aller à la quatrième étape décrite à la Figure 5.3d. L'objet de cette dernière étape est de quantifier une amélioration d'agrément par un gain sonore en dB. En effet à cette étape, les mêmes deux ambiances sonores optimisées sont présentées. Il est alors demandé au sujet d'ajuster le niveau sonore de la scène sonore la moins agréable (qui a été composée à l'étape 2) pour qu'elle devienne autant agréable que le son le plus agréable (composé à l'étape 1). Il peut passer de l'un à l'autre autant de fois qu'il le souhaite pour affiner le gain appliqué au

son le moins agréable. Ce cycle de quatre étapes se termine en appuyant sur le bouton "Valider". Tant que ce bouton n'est pas pressé, le sujet peut revenir en arrière jusqu'à la première étape pour modifier les ambiances s'il considère que des changements doivent être apportés. S'il presse le bouton "Valider", le choix est irréversible et le sujet passe à une nouvelle combinaison de sources.



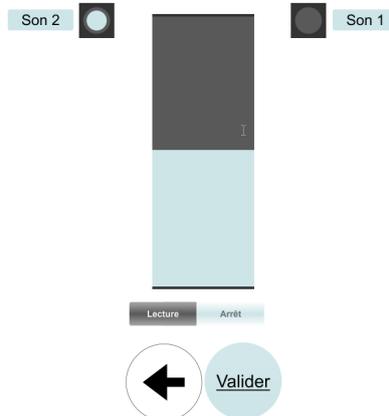
Partie 1 / 33



(C) GUI - Troisième étape : Comparaison des deux scènes sonores créées sur une échelle sémantique d'agrément.

Partie 1 / 33

Ajuster le niveau du son à gauche pour que les sons 1 et 2 soient tous les deux aussi agréables



(D) GUI - Quatrième étape : Évaluation des différences d'agréments entre les deux scènes obtenues à partir d'un ajustement en gain du niveau sonore de la scène la moins agréable pour qu'elle devienne autant agréable que celle la plus agréable.

FIGURE 5.3 – Description de l'interface utilisateur.

5.5 Résultats

L'analyse des résultats doit se faire en fonction des combinaisons de sources qui ont été optimisées. Pour révéler les stratégies d'optimisation choisies par les sujets, des analyses par composantes principales ont été effectuées en choisissant dans un premier temps les sous-jeux de données correspondant à chaque configuration intrusive du voisin. Pour rappel, une description de la méthode d'ACP est proposée en annexe B. Pour quatre des six sources de voisin étudiées, de grandes tendances ressortent. Les résultats pour ces 4 sources de voisinage sont donc présentées ensemble dans la section suivante. Il s'agit des sources de travaux, du documentaire télévisuel, des jeux d'enfants, et de fête. Pour chacun des 30 mélanges de sources évalués sur l'ensemble du test, 6 valeurs de gains sont enregistrées pour chaque participant, correspondant aux résultats pour les trois provenances de sources (Voisin, Façade, et Ventilation intérieure) couplés avec les deux consignes successives (cas le plus agréable, et celui le moins agréable). L'ensemble des résultats bruts sont fournis en annexe D.

5.5.1 Sources du voisin non-musicales

5.5.1.1 Émergence de points de vue

Des ACPs ont été effectuées pour mettre en évidence les principales dimensions de variabilité pour chaque sous-ensemble de données. Pour faciliter la lecture des diagrammes de corrélation qui sont présentés dans cette partie, l'exemple du sous-ensemble des données dans lequel le stimulus des travaux de perceuse chez le voisin est impliqué est proposé à la Figure 5.4. Le tableau de données utilisé pour effectuer cette ACP est sous la forme suivante :

	1	<i>Sujet P_k</i>			<i>K = 65</i>
<i>A.Facade 1</i>	$g_{a.fac 1,1}$	...	$g_{a.fac 1,k}$	...	$g_{a.fac 1,K}$
<i>A.Travaux x Facade 1</i>	$g_{a.voisXfac 1,1}$	...	$g_{a.voisXfac 1,k}$	...	$g_{a.voisXfac 1,K}$
<i>A.VMC x Facade 1</i>	$g_{a.vmcXfac 1,1}$	...	$g_{a.vmcXfac 1,k}$	...	$g_{a.vmcXfac 1,K}$
<i>D.Facade 1</i>	$g_{d.fac 1,1}$	...	$g_{d.fac 1,k}$	...	$g_{d.fac 1,K}$
<i>D.Travaux x Facade 1</i>	$g_{d.voisXfac 1,1}$	...	$g_{d.voisXfac 1,k}$	...	$g_{d.voisXfac 1,K}$
<i>D.VMC x Facade 1</i>	$g_{d.vmcXfac 1,1}$	...	$g_{d.vmcXfac 1,k}$	...	$g_{d.vmcXfac 1,K}$
	⋮		⋮		⋮
<i>A.Facade i</i>	$g_{a.faci,1}$	...	$g_{a.faci,k}$	...	$g_{a.faci,K}$
<i>A.Travaux x Facade i</i>	$g_{a.voisXfac i,1}$	...	$g_{a.voisXfac i,k}$	...	$g_{a.voisXfac i,K}$
<i>A.VMC x Facade i</i>	$g_{a.vmcXfac i,1}$	...	$g_{a.vmcXfac i,k}$	...	$g_{a.vmcXfac i,K}$
<i>D.Facade i</i>	$g_{d.faci,1}$	...	$g_{d.faci,k}$	...	$g_{d.faci,K}$
<i>D.Travaux x Facade i</i>	$g_{d.voisXfac i,1}$	...	$g_{d.voisXfac i,k}$	...	$g_{d.voisXfac i,K}$
<i>D.VMC x Facade i</i>	$g_{d.vmcXfac i,1}$	...	$g_{d.vmcXfac i,k}$	...	$g_{d.vmcXfac i,K}$
	⋮		⋮		⋮
<i>A.Facade I</i>	$g_{a.fac I,1}$	...	$g_{a.fac I,k}$	...	$g_{a.fac I,K}$
<i>A.Travaux x Facade I</i>	$g_{a.voisXfac I,1}$	...	$g_{a.voisXfac I,k}$	...	$g_{a.voisXfac I,K}$
<i>A.VMC x Facade I</i>	$g_{a.vmcXfac I,1}$	...	$g_{a.vmcXfac I,k}$	...	$g_{a.vmcXfac I,K}$
<i>D.Facade I</i>	$g_{d.fac I,1}$	...	$g_{d.fac I,k}$	...	$g_{d.fac I,K}$
<i>D.Travaux x Facade I</i>	$g_{d.voisXfac I,1}$	...	$g_{d.voisXfac I,k}$	...	$g_{d.voisXfac I,K}$
<i>D.VMC x Facade I</i>	$g_{d.vmcXfac I,1}$	...	$g_{d.vmcXfac I,k}$	...	$g_{d.vmcXfac I,K}$

Ce tableau est constitué des valeurs de gains sonores $g_{opt.source i,k}$ qui ont été appliquées à chacune des trois pistes dans chacun des mélanges de sources qui ont été optimisés par les sujets. Les optimisations les plus agréables sont repérées par les indices "a", et "d" signifiant respectivement le cas le plus agréable, et celui le plus désagréable. La colonne d'indice k correspond aux optimisations

effectuées par le participant " P_k ". Tout comme pour le chapitre 4, les variables sont les profils de réponses des sujets. Une description de la nomenclature est proposée. Chaque flèche correspond à

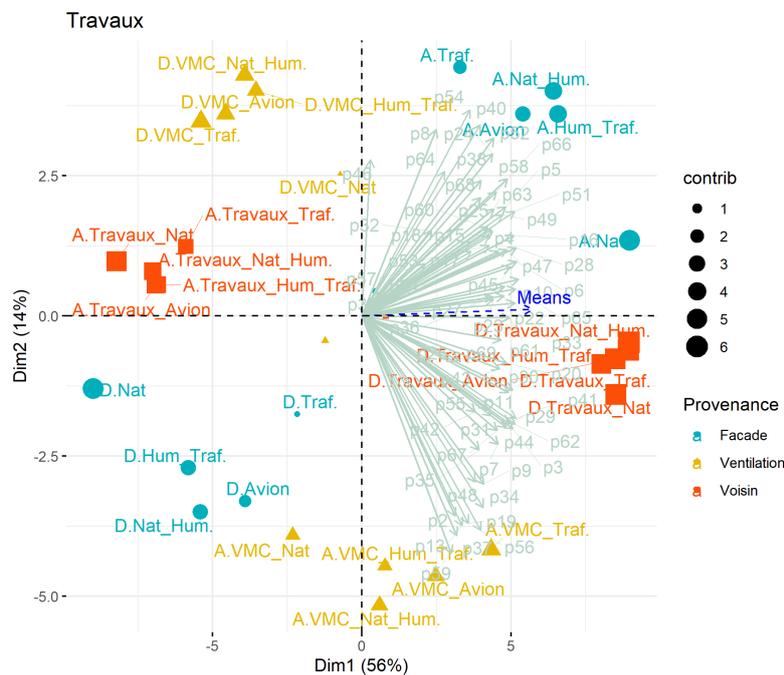


FIGURE 5.4 – Diagramme de corrélation issu de l'ACP effectuée sur le sous-ensemble des réponses ayant comme source de bruit du voisin les travaux de perceuse.

la corrélation de chaque profil d'individu aux deux principales dimensions de l'ACP et est identifiée par un label commençant par "p" et suivi de l'identifiant du participant. Le profil d'individu correspond à l'ensemble de ses réponses pendant les deux premières étapes du test présenté à la Figure 5.3. Il correspond donc aux valeurs de gains choisies par les sujets pour effectuer les deux optimisations (la plus agréable, la moins agréable). Chaque marqueur qu'il soit carré, rond, ou triangle, correspond à la contribution de chaque source en fonction de sa provenance (Voisin, Façade, Intérieure) pour chaque mélange dans lequel le bruit de travaux du voisin est impliqué. La taille du marqueur correspond à la contribution de la source en question à la construction des axes (voir Équation B.11, page 186). Lorsque l'observation correspond à un résultat dans le cas de la consigne "le plus agréable", le label de l'observation commence par "A" pour Agréable, et lorsque l'observation correspond à un résultat de gain dans le cas de la consigne "le moins agréable", le label de l'observation commence par "D" pour Désagréable. Par exemple, la Figure 5.4, le label « A.Travaux.Nat. » correspond aux contributions sur les deux dimensions de l'ACP de la source du voisin « Travaux » lorsqu'elle est superposée à des sons de nature venant de l'extérieur et ce, dans le cas de composition de la scène sonore la plus agréable.

L'ACP montre que la dimension 1 est consensuelle puisque tous les participants ont une corrélation élevée positive. Cette première dimension est caractérisée par le gain appliqué à la piste de travaux de perceuse du voisin. Les participants sont donc unanimes pour augmenter le niveau sonore de la source de travaux afin d'obtenir l'environnement sonore le plus désagréable. A l'opposé, les participants réduisent le niveau sonore de la source de travaux du voisin pour composer l'environnement le plus agréable. Ceci est visible sur le diagramme car les corrélations des participants sur la dimension 1 sont positives, et que les coordonnées des contributions des gains du

voisin sont aussi toutes positives dans les cas désagréables, et toutes négatives dans les cas agréables.

Pour toutes les sources de façade (à l'exception des sons de nature), on observe deux stratégies marquées mises en évidence par la seconde dimension de l'ACP. Les sujets positivement corrélés à cette seconde dimension ont choisi d'augmenter le gain des sources de façade pour composer l'environnement le plus agréable. Inversement, les sujets négativement corrélés à cette même dimension ont préféré masquer la source désagréable des travaux en augmentant le volume sonore de la source de ventilation intérieure au logement. Ces tendances de résultats sont à nouveau observées dans trois autres cas de sources du voisin.

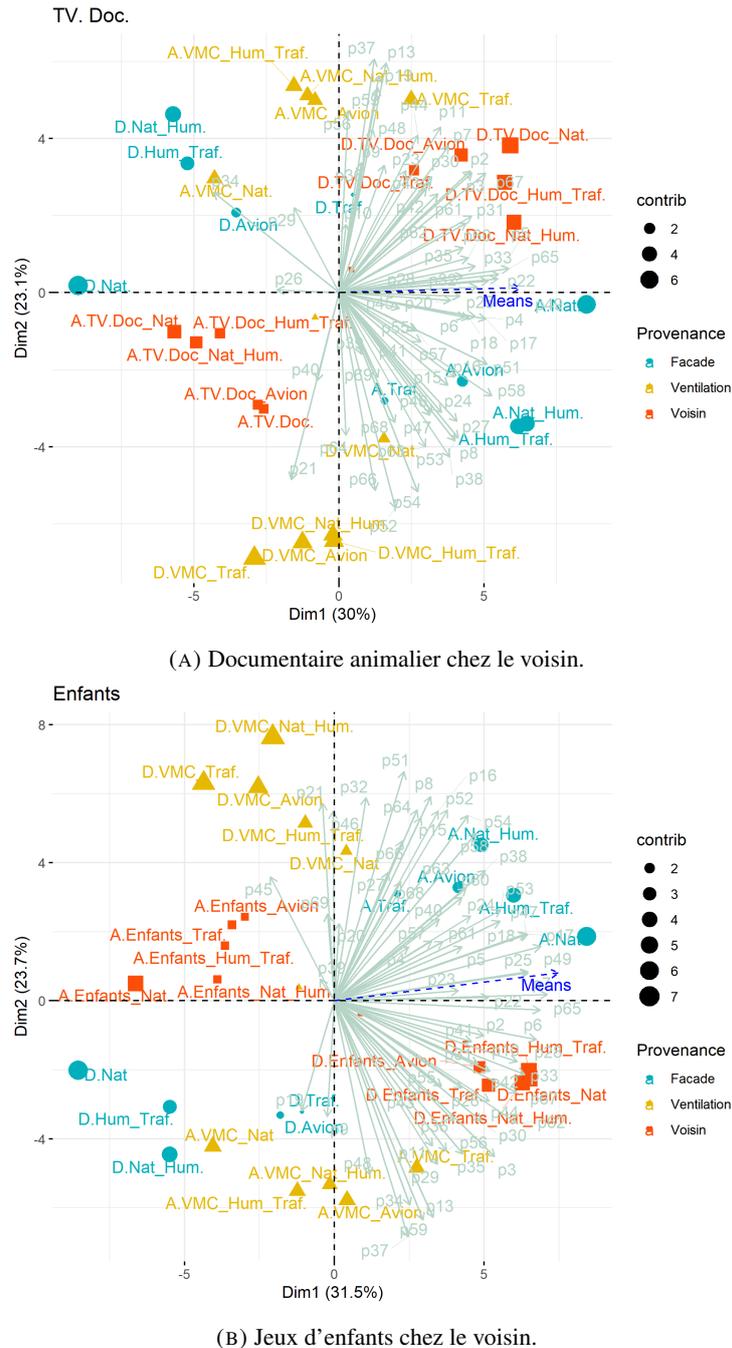


FIGURE 5.5 – Diagrammes de corrélation des résultats de l'ACP.

Lorsque la source issue du logement voisin est un documentaire animalier diffusé à la télévision, ou un scénario de voix d'enfants ou encore, lorsqu'il s'agit d'une fête, on retrouve les mêmes tendances dont les résultats sont présentés aux Figures 5.5, et 5.6. La Figure 5.5a montre que dans le cas de la scène sonore avec un documentaire animalier chez le voisin, lorsque les sujets doivent composer l'environnement sonore le plus agréable, ils choisissent de baisser le niveau sonore de la source du voisin. Deux groupes se forment ensuite concernant le choix de la source utilisée pour masquer le documentaire animalier. Un groupe augmentera la source sonore de façade et l'autre préférera utiliser la ventilation comme source de masquage. On retrouve bien les résultats concernant les sons de perceuse chez le voisin. On obtient les mêmes résultats lorsque dans le cas de

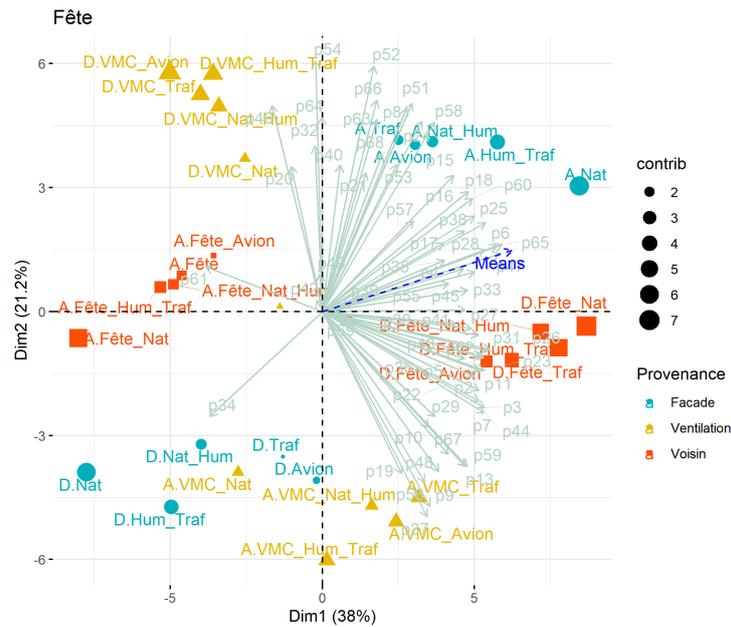


FIGURE 5.6 – Diagramme de corrélation issu de l’ACP effectuée sur le sous-ensemble des réponses ayant comme source de bruit du voisin la fête (musique et éclats de voix) chez le voisin.

la fête à la Figure 5.6 ou des jeux d’enfants à la Figure 5.5b. Il s’agit alors d’évaluer si les groupes sont cohérents c’est à dire s’ils sont toujours constitués des mêmes individus ou si la stratégie de masquage varie pour un même individu selon la source de voisin étudiée. 70% des sujets adoptent une stratégie stable dans les 4 cas présentés aux Figures 5.4 et 5.5. Cela induit que 70% des sujets appartiennent aux mêmes groupes. Quant aux 30% restants, ils choisissent alternativement soit d’augmenter la source de ventilation ou de façade selon la source de voisin étudiée.

À noter toutefois que pour ces quatre sources de voisin, la source de nature issue de la façade contribue peu à la seconde dimension de l’ACP et en revanche contribue beaucoup à la dimension 1. Cela indique que lorsque les sons de nature sont impliqués dans les mélanges, les deux stratégies de masquage mises en évidence par les ACPs ne sont plus pertinentes, en particulier celle qui tend à augmenter le niveau sonore de la source de ventilation pour masquer les sons intrusifs du voisin. Pour étudier cette source particulière de nature, une analyse spécifique sera proposée à la Section 5.5.2.

Au préalable, les stratégies mises en évidence pour les quatre cas de sources de voisin déjà étudiés doivent être traduites en termes des niveaux équivalents moyens par provenance de sources.

5.5.1.2 Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées

La Figure 5.7 présente les mixages sonores moyens pour ces 4 premières sources intrusives. Seules les deux principales stratégies de masquage révélées Section 5.5.1.1 sont présentées ce qui correspond à 80% du panel en sommant l’ensemble des sujets qui ont suivi l’une ou l’autre des deux stratégies. Les résultats moyens et écart-types présentés à la Figure 5.7 sont calculés par sous-groupe de sujets. La proportion d’individus ayant choisi l’une ou l’autre des stratégies est également mise en forme et représentée par la taille variable des marqueurs.

On observe que dans le cas des sous-groupes "1 3 2", les résultats sont très proches pour toutes les configurations de sources. Quelle que soit la source intrusive du voisin mise en jeu, le niveau équivalent $L_{Aeq,30s}$ de la source du voisin est toujours autour de 30 dB(A), celui de Façade autour de 38 dB(A) soit un résultat assez proche du maximum possible de 38.5 dB(A) et enfin celui de ventilation autour de 33 dB(A). Avec un écart de 8 dB(A) entre les niveaux équivalents de façade et du voisin, la source du voisin n'est plus perçue. L'environnement sonore est alors constitué d'un mélange entre la ventilation et l'ambiance issue de la façade vitrée.

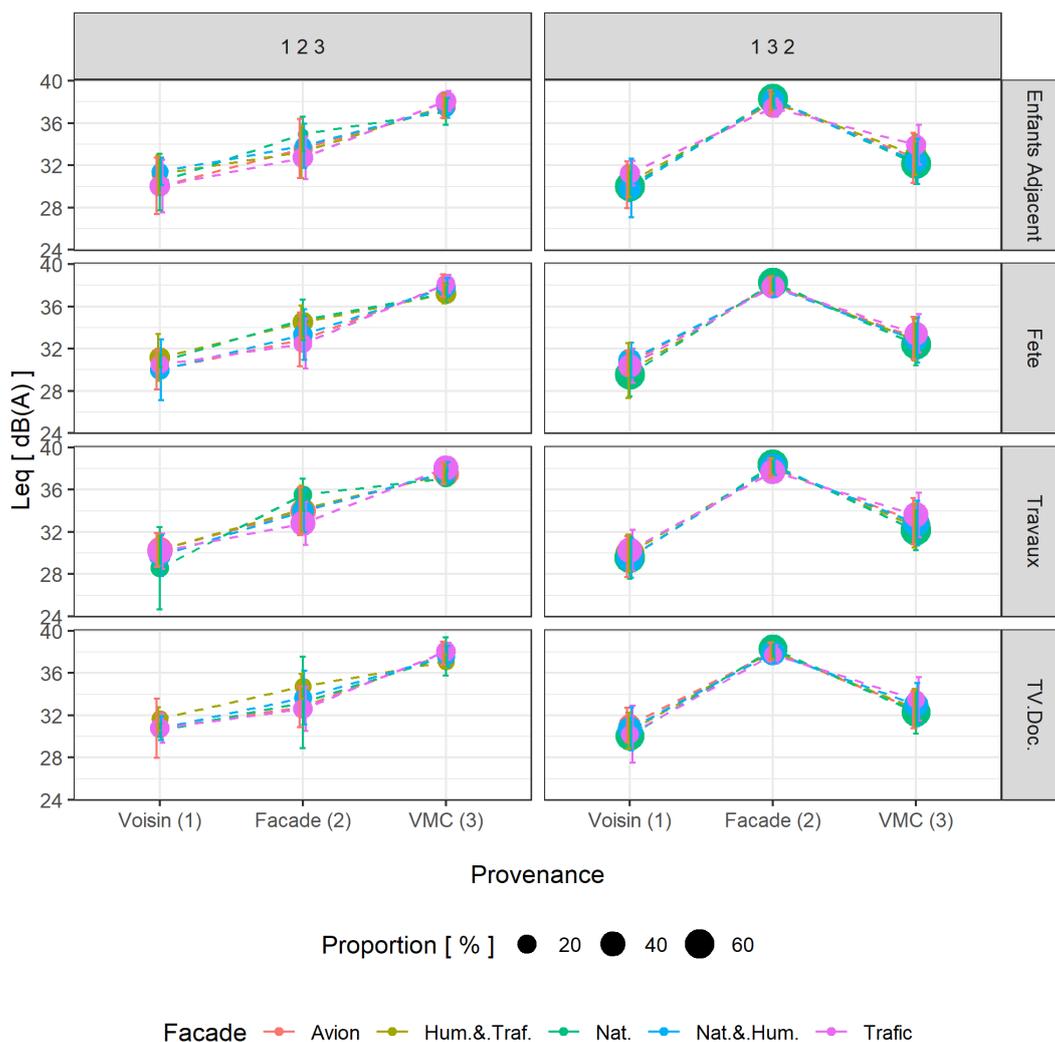


FIGURE 5.7 – Cas de sources intrusives du voisin : Enfants adjacent, Fête, Travaux, et TV Doc. Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les deux points de vues dominants mis en évidence. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées "1 2 3" et "1 3 2" en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.

Enfin, la stratégie alternative mise en évidence vise à utiliser la source de ventilation pour masquer les autres en augmentant son niveau de près de 4 dB(A) en moyenne (Cas "1 2 3" de la

Figure 5.7).

Le cas particulier de la source de façade composée de sons de nature qui a été révélé par les 4 ACPs peut à présent être analysé.

5.5.2 Cas particulier d'une source de façade : Les sons de nature

5.5.2.1 Émergence de points de vue

Pour cette source, une ACP a été effectuée en prenant comme jeu de données le sous-ensemble de tous les résultats dans lesquels ce stimulus intervient ce qui correspond à 6 mélanges de sources. Le diagramme de corrélation synthétisant les résultats est présenté à la Figure 5.8. Pour composer l'ambiance "la plus agréable", le niveau des sons de nature est toujours augmenté sauf très rares exceptions individuelles. Ensuite, deux stratégies de mixage se dessinent. La première vise à mélanger les sons de ventilation avec les sons de nature. L'autre option révèle un mixage des sons de nature avec les sons intrusifs du voisin. Ces deux stratégies sont mises en évidence par l'analyse de la dimension 2 de l'ACP présentée à la Figure 5.8.

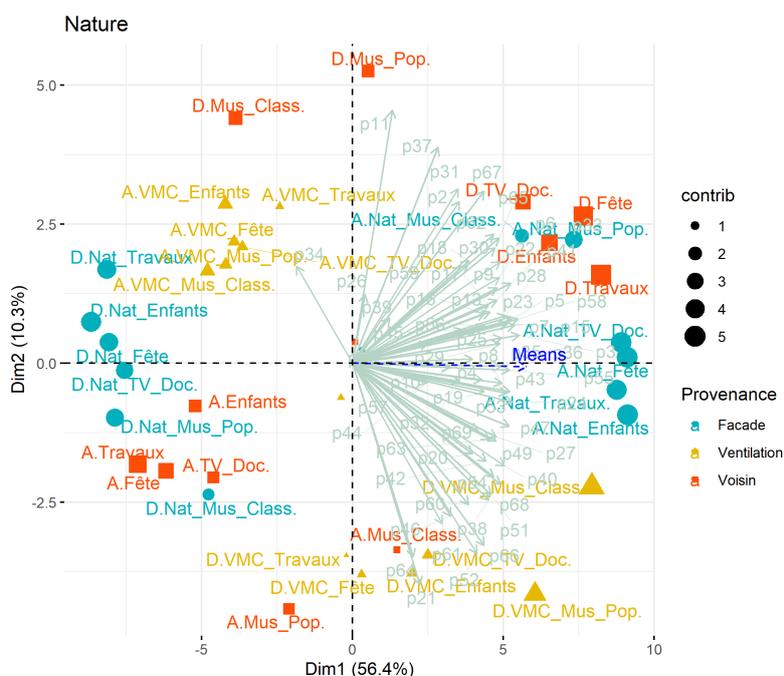


FIGURE 5.8 – Diagramme de corrélation des résultats de l'ACP pour le sous-ensemble des données pour lequel les sons de Nature interviennent.

Grâce à cette seconde dimension, on observe en outre un clivage entre les sujets qui augmentent le gain de la musique chez le voisin (Classique, ou Pop.) pour la mélanger avec la source de nature et ceux qui au contraire préféreront la baisser pour obtenir l'environnement le plus agréable. Ces deux stimuli seront étudiés séparément à la Section 5.5.3. Avant cela, une représentation graphique des mélanges moyens est présentée dans le cas particulier des sons de nature.

5.5.2.2 Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées

Ce stimulus de sons de nature est l'un des rares ayant été apprécié par tous les sujets lors de l'évaluation d'agrément du premier test d'écoute décrit Section 4.4.2. L'analyse graphique des

résultats présentée à la Figure 5.9 a révélé les deux stratégies dominantes lorsque les sons de nature sont impliqués. L'une des stratégies consiste en une augmentation de près de 2.5 dB(A) de la source de façade pour masquer les sons du voisin en suivant l'ordre croissant des niveaux "1 3 2" ce qui signifie $L_{Aeq,voisin} < L_{Aeq,vmc} < L_{Aeq,façade}$. Les sujets qui ont suivi cette stratégie ont préféré mixer les sons de nature avec la source de ventilation intérieure au logement. Cette stratégie est celle la plus partagée au sein des sujets. Cependant, une autre stratégie émerge qui cette fois-ci, suit l'ordre suivant $L_{Aeq,vmc} < L_{Aeq,voisin} < L_{Aeq,façade}$. Dans ce cas, les sons de nature sont mélangés avec les sons issus du voisin et non avec la source de ventilation intérieure au logement. Cela se produit davantage quand les sons de nature sont mélangés avec les sons de musique classique ou de musique Pop. chez le voisin.

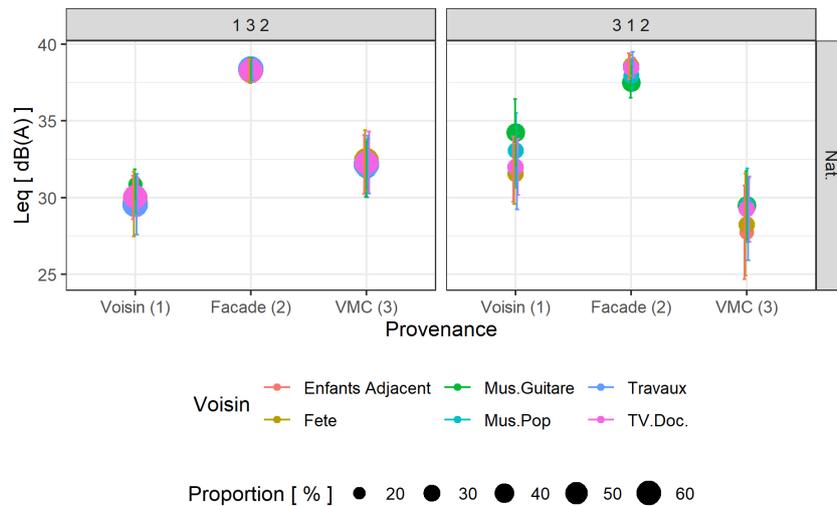


FIGURE 5.9 – Cas des sons de nature : Résultats moyens des niveaux sonores par provenance de source. Mise en évidence des deux stratégies dominantes. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.

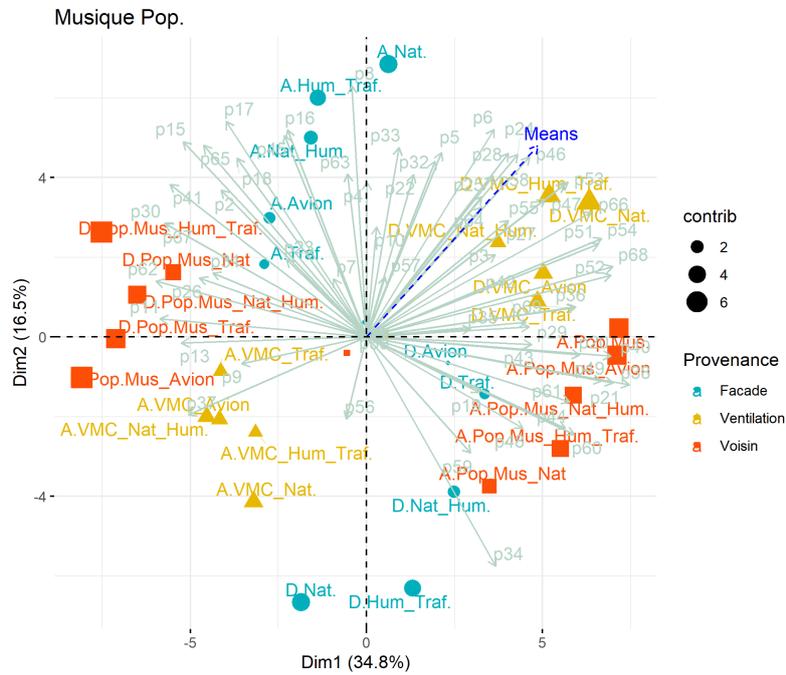
Deux sources du voisin ont été mixées par les sujets différemment des quatre autres (présentées à la Section 5.5.1), il s'agit de deux sources sonores intrusives musicales, les musiques Pop., et classique.

5.5.3 Sources musicales Pop. et classique du voisin : Stratégies d'optimisations

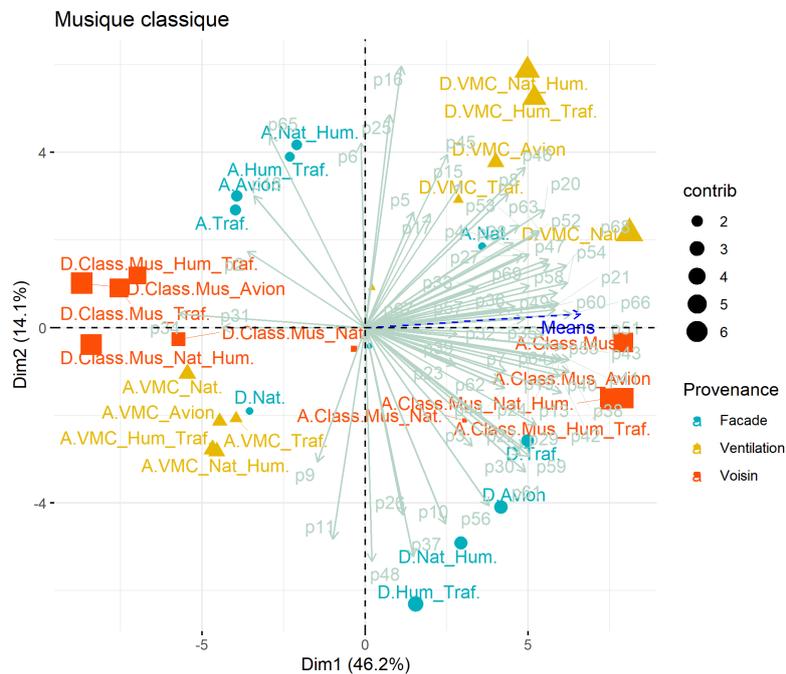
5.5.3.1 Émergence des points de vue

La musique Pop. Le diagramme à la Figure 5.10a rend compte de ces 2 principales stratégies. Un groupe augmente le niveau sonore de la source du voisin pour composer le scénario le plus agréable. Au contraire dans le cas le moins agréable, il le diminue. Il s'agit du groupe constitué des sujets positivement corrélés à la première dimension de l'ACP. Pour ce groupe, environ la moitié des sujets a décidé de mélanger la musique Pop. avec la source de façade, et l'autre moitié préfère la mélanger avec la ventilation intérieure au logement. Cette interprétation s'effectue par l'analyse de la dimension 2 de l'ACP présentée à la Figure 5.10a. Enfin, un dernier groupe constitué des sujets négativement corrélés à la première dimension a tendance à diminuer le niveau de la source

de musique Pop. et à augmenter les sons de façade pour composer l'environnement sonore le plus agréable.



(A) Musique Pop. Ed Sheeran.



(B) Musique classique Erik Satie.

FIGURE 5.10 – ACP : Résultats des diagrammes de corrélations pour les deux sources musicales intrusives du voisin.

La musique classique Pour le dernier cas de source du voisin constituée de musique classique et dont les résultats sont présentés à la Figure 5.10b, 90% des sujets ont décidé d'augmenter le volume sonore du voisin pour créer l'environnement sonore le plus agréable. Le clivage Ventilation / Source de façade est une fois encore observé avec une moitié de sujets préférant mixer la musique classique avec la source de ventilation et l'autre moitié avec la source de façade afin de composer l'environnement sonore le plus agréable.

5.5.3.2 Quantification moyenne L_{Aeq} des stratégies révélées

Musique Pop. Comme révélé par les ACPs, un premier groupe majoritaire augmente le niveau de la musique Pop. d'environ 3 dB(A) en moyenne selon les combinaisons. Ce groupe de sujets est ensuite scindé en deux sous-groupes suivant les ordres "2 3 1", et "3 2 1". Un sous-groupe préfère composer la scène sonore avec davantage de ventilation que de sons de façade tandis que l'autre préfère l'inverse. À noter que les différences de niveaux sont toujours inférieures à 2.5 dB(A) entre ces deux pistes (Façade et Ventilation). Le second groupe de sujets a une stratégie opposée à l'égard de cette musique Pop. Ce groupe baisse le niveau de la source de musique de près de 5 dB(A) en moyenne et préfère (dans 90% des cas) mettre en avant la source de façade plutôt que celle de ventilation. Le niveau sonore équivalent de la source de Façade est en moyenne de 37.5 dB(A).

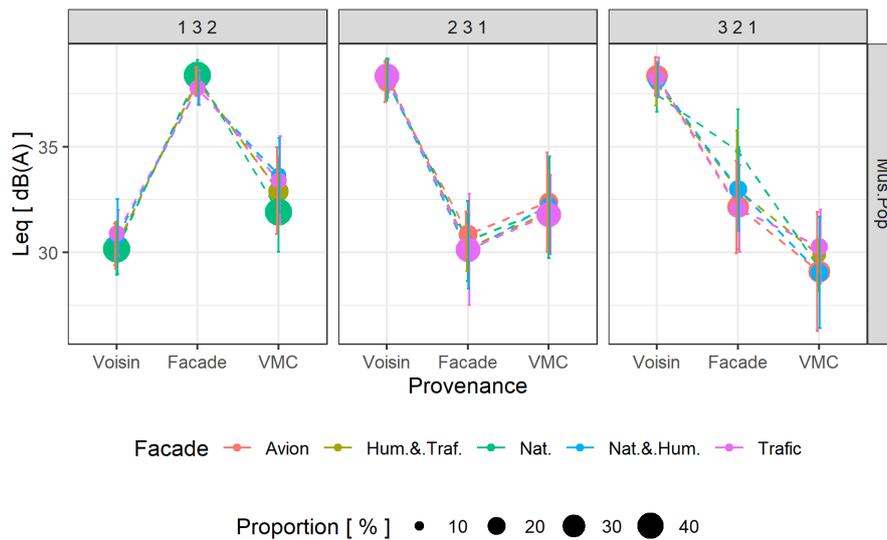


FIGURE 5.11 – Cas de la musique Pop. : Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les trois points de vues dominants mis en évidence. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les trois stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.

Musique classique Pour ce dernier stimulus musical, les résultats des optimisations sont présentés à la Figure 5.12. Le niveau équivalent $L_{Aeq,30s}$ de la piste associée au stimulus de musique classique est toujours augmenté pour atteindre en moyenne 38 dB(A) soit une augmentation moyenne de 3 dB(A) pour cette piste. Ensuite, les deux stratégies émergent dans le choix de la source qui sera la plus présente dans le mixage, soit la source de façade soit celle de ventilation. Le

niveau de la source de ventilation dans le cas où il est préféré à la source de façade est d'environ 32 dB(A). En revanche, lorsque les sons de façade sont préférés, le niveau de ventilation devient plus faible autour de 29 dB(A) et celui de façade passe à 32-33 dB(A) en moyenne.

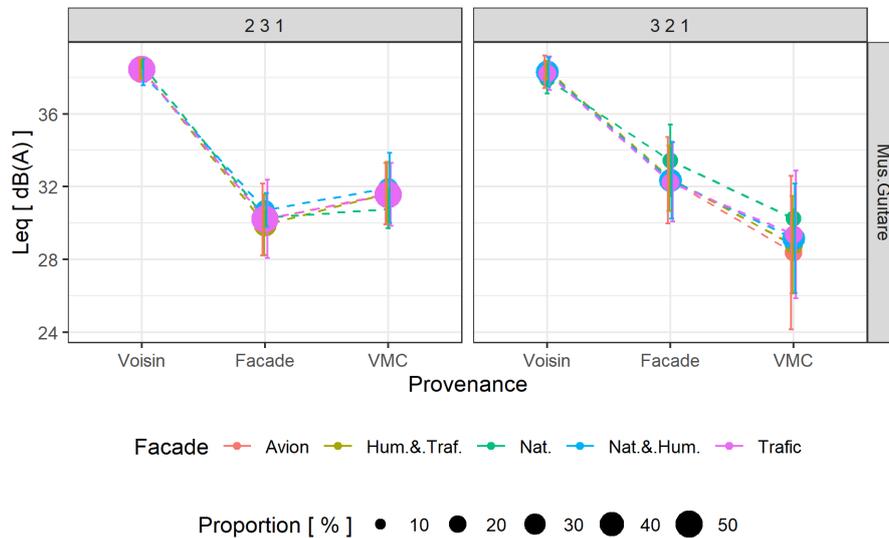


FIGURE 5.12 – Cas de la musique classique jouée à la guitare : Résultats moyens des niveaux sonores équivalents par provenance de source pour les deux points de vues dominants mis en évidence. Les optimisations correspondent à la consigne de composition de l'ambiance sonore "la plus agréable". Les deux stratégies dominantes sont nommées en référence à l'ordre croissant des niveaux sonores en fonction de la provenance de source avec (1) les voisins, (2) la façade, et (3) la ventilation. La taille des marqueurs représente la proportion de sujets ayant opté pour l'une ou l'autre des stratégies.

Pour conclure sur cette partie, il ressort de l'analyse des différentes ACPs que pour 4 des 6 sources sources intrusives du voisin, un choix consensuel émerge avec une diminution du niveau de la source du voisin au profit des autres. Deux stratégies se dessinent ensuite avec des sujets préférant masquer la source du voisin avec une source de ventilation intérieure et d'autres sujets préférant utiliser la source de façade pour effectuer ce masquage. Enfin, Pour les deux sources sonores de voisinage constituées exclusivement de musique (Classique, ou Pop.) les stratégies ont été différentes. Pour la source de musique classique, 90% des individus ont préféré augmenter le gain de cette source et le mixer à 50% avec la ventilation intérieure du logement, et à 50% avec la source sonore de façade.

La question de la cohérence entre les groupes révélés au Chapitre 4 précédent et ceux mis en évidence en fonction des stratégies d'optimisation révélées dans ce test se pose et sera étudiée à la Section 5.5.4 prochaine. Les préférences individuelles mises en évidence au précédent test sont-elles confirmées par les stratégies d'optimisations lors des mixages d'ambiances ?

Groupe VMC+	Groupe VMC-
P2, P3, P7, P9, P10, P11, P13, P19, P22, P23, P26, P29, P30, P31, P33, P34, P35, P37, P41, P42, P43, P44, P48, P50, P55, P56, P59, P62, P67	P4, P5, P6, P8, P15, P16, P17, P18, P20, P21, P24, P25, P27, P28, P32, P36, P38, P40, P45, P46, P47, P49, P51, P52, P53, P54, P57, P58, P60, P61, P63, P64, P65 P66, P68, P69

TABLEAU 5.1 – Répartition des sujets en deux groupes définis en fonction de la corrélation de chaque sujet avec les secondes dimensions des ACPs présentées aux Figures 5.4, 5.5, et 5.6. Le groupe VMC+ correspond au groupe de sujets ayant tendance à augmenter la source de ventilation pour masquer la source du voisin, et le groupe VMC- est constitué de sujets ayant plutôt préféré baisser le niveau de cette source de ventilation.

5.5.4 Compréhension des groupes formés

Dans cette partie, l'objectif est de comprendre si des caractéristiques communes peuvent expliquer les stratégies variées de mixage mises en évidence à la Section 5.5.1.1.

5.5.4.1 Le choix de ventilation

Comme mis en évidence à la Section 5.5.1.1, un groupe d'individus a tendance à augmenter la source sonore de ventilation pour masquer les sons intrusifs du voisin, et l'autre préfère utiliser la source sonore de façade pour opérer cet effet masquant. Ces deux stratégies ont été révélées dans 4 situations de source intrusive de voisin (travaux, documentaire animalier, enfants, fête). Le détail des deux groupes formés est présenté au Tableau 5.1 à titre indicatif.

Ces stratégies peuvent-elles s'expliquer par les résultats du premier test? En comparant ces deux groupes formés avec ceux issus de la CAH et présentés dans le Tableau 4.12, le Tableau 5.2 de contingence est calculé montrant l'absence de lien entre ces deux formations de groupes comme le confirme les résultats du test de χ^2 (voir Tableau 5.3).

Nb. Sujets	VMC- Test 2	VMC+ Test 2
Gp. tol- Test 1	16	16 soit 55%
Gp. tol+ Test 1	20 soit 55%	13

TABLEAU 5.2 – Répartition du nombre de sujets par sous-groupe formé à la CAH du test 1 croisé avec chacun de ceux formés au test 2 et lié au choix de la source masquante.

Valeur test de χ^2	Degrés De Libertés (DDL)	Valeur de p
0.373	1	0.542

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 5.3 – Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part, les groupes formés au premier test d'écoute référent à la tolérance aux sons intrusifs et d'autre part, les groupes formés au second test d'écoute en fonction de leurs choix de source masquante (Ventilation ou source de façade).

Groupe 1p : Pop+	Groupe 2p : Pop-
P3, P4, P5, P6, P10, P19, P20, P21, P22, P24, P25, P27, P28, P29, P32, P33, P34, P35, P36, P38, P40, P42, P43, P44, P46, P47, P48, P49, P50, P51, P52, P53, P54, P55, P57, P58, P59, P60, P61, P64, P66, P68, P69	P2, P7, P8, P9, P11, P13, P15, P16, P17, P18, P23, P26, P30, P31, P37, P41, P45, P56, P62, P63, P65, P67

TABLEAU 5.4 – Répartition des sujets en deux groupes définie en fonction de la corrélation de chaque sujet avec la première dimension de l'ACP présentée à la Figure 5.10a. Les participants indiqués en rouge sont les sujets ayant effectué un transfert de groupe entre les tests 1, à 2. (Groupe 1p : corrélation positive ; Groupe 2p : corrélation négative).

Une seconde façon de regrouper les sujets a été mise en évidence lors du premier test d'écoute révélant des préférences musicales. Est-ce que ces deux autres groupes formés au premier test perceptif et présentés à la Section 4.4.2 aident pour expliquer les stratégies d'optimisation des sujets ?

5.5.4.2 Les préférences musicales

Au Chapitre 4, les résultats montraient que pour la source de musique Pop., deux groupes s'étaient constitués, l'un évaluant positivement cette source, et l'autre négativement. Il est intéressant de vérifier si ces deux groupes se confirment avec un groupe qui, puisqu'il apprécie ce son, augmentera son gain, et l'autre au contraire ne l'aimant pas, le diminuera. En toute cohérence, les deux groupes mis en évidence à ce test (voir Tableau 5.4) devraient être confondus avec ceux révélés au test perceptif précédent (voir au Tableau 4.5). Les participants ayant changé de groupe entre les deux tests sont indiqués en rouge dans le Tableau 5.4. On observe des transferts inter-groupe et une augmentation de la taille du premier groupe (celui ayant tendance à augmenter le gain de la musique Pop. pour composer l'environnement le plus agréable). La consistance des groupes formés aux deux tests reste cependant bonne bien qu'imparfaite puisque 72% des sujets appartenant au groupe 1 du second test faisaient partie du groupe 1 au test 1. Et 91% des sujets appartenant au groupe 2 du test 2 étaient également dans le groupe 2 du premier test comme illustré au Tableau 5.5.

Nb. Sujets	Gp.Pop+ Test 2	Gp.Pop- Test 2
Gp.1p Test 1	31 soit 72%	2
Gp.2p Test 1	12	20 soit 91%

TABLEAU 5.5 – Répartition du nombre de sujets dans les sous-groupes formés au test 1 (en fonction des préférences musicales) croisés avec ceux formés au test 2.

Pour conclure sur les stratégies de mixage du stimulus de musique Pop., les goûts musicaux des sujets sont confirmés en cohérence acceptable avec les résultats du premier test. Le groupe ayant évalué la musique Pop déplaisante a généralement réduit le niveau de cette source et l'a masqué avec les différentes sources provenant de la façade vitrée. Les individus qui lors du premier test d'écoute avaient évalué positivement ce stimulus ont opté pour une stratégie opposée puisqu'ils ont augmenté le niveau sonore de la source du voisin et l'ont mélangé soit avec un son de ventilation (pour la moitié des sujets appréciant cette musique) soit avec les sources de façade (pour l'autre

moitié de ce même groupe). Enfin, les préférences individuelles influent sur les stratégies de masquage sonore. Le masquage de sources intrusives désagréables par la ventilation peut améliorer la perception d'agrément ou bien la dégrader et aucun critère socio-culturel n'a permis d'expliquer ces différences d'évaluations subjectives.

Pour la suite, nous nous intéresserons aux résultats obtenus lors des comparaisons d'ambiances optimisées qui ont été effectuées par les sujets à la troisième étape de la procédure de test présentée à la Figure 5.3c.

5.5.5 Le design sonore impacte-t-il la perception d'agrément ?

Cette étape consiste à comparer les deux compositions sonores créées pour chaque configuration de sources. L'objectif de cette étape est de mesurer si les participants sont parvenus à créer de significatives différences d'agréments entre les deux compositions optimisées ou si malgré leurs tentatives, ces mixages n'ont pas permis de significativement améliorer leur perception.

Les résultats de ces évaluations pour les 30 couples de sources (Voisin / Façade) sont présentés à la Figure 5.13. Un choix arbitraire a été effectué pour représenter les résultats en comparant le son optimisé le moins agréable avec le son optimisé le plus agréable. Si le sujet a bien discriminé les deux compositions, le résultat doit être négatif. En revanche si le résultat est proche de zéro cela indique que malgré les tentatives de mixages, il n'a pas été possible de créer un environnement sonore significativement plus agréable. Enfin, si l'évaluation du sujet est positive, cela indique qu'il s'est trompé dans la reconnaissance des deux compositions. Plusieurs résultats ressortent de l'analyse des distributions présentées à la Figure 5.13.

Premier enseignement, la présence de sons de nature permet aux sujets de bien discriminer les deux optimisations et ce, quelle que soit la source sonore chez le voisin. Les sons de nature, source préférée des sujets (voir Section 4.4.2), améliorent par leur présence la sensation d'agrément. Ce résultat se justifie par l'ACP présentée à la Figure 5.8. Celle-ci montre que le volume des sons de nature est systématiquement diminué pour obtenir la composition la moins agréable et au contraire, systématiquement augmenté pour obtenir l'environnement sonore le plus agréable.

Un résultat similaire est obtenu concernant le stimulus de musique classique jouée à la guitare. Quelle que soit la source de façade avec laquelle elle a été mixée, les distributions ont des médianes et moyennes en valeurs absolues élevées, ce qui signifie qu'en moyenne les sujets sont parvenus à significativement améliorer leur perception d'agrément en augmentant le niveau sonore de cette source de musique classique.

A l'inverse, lorsque le stimulus de trafic intervient dans les mixages, l'amélioration de l'agrément par l'optimisation des équilibres entre sources devient faible avec des écarts moyens $|\Delta| \leq 20$ dans la plupart des cas à l'exception du mélange avec le stimulus de musique classique. Les résultats du premier test aident pour l'interprétation de ce résultat (voir Figure 4.10 p. 73). La source de trafic a été évaluée comme le second stimulus extérieur le plus désagréable. En masquant les sources du voisin avec cette source, la sensation d'agrément ne s'en trouve pas significativement améliorée et en conséquence le scénario optimisé le moins agréable n'est plus si significativement différent du scénario optimisé le plus agréable.

Afin de caractériser les différences significatives entre couples de stimuli sonores, une ANOVA à mesures répétées et à deux facteurs est effectuée en appliquant la fonction "aov_{ez}()" de la librairie

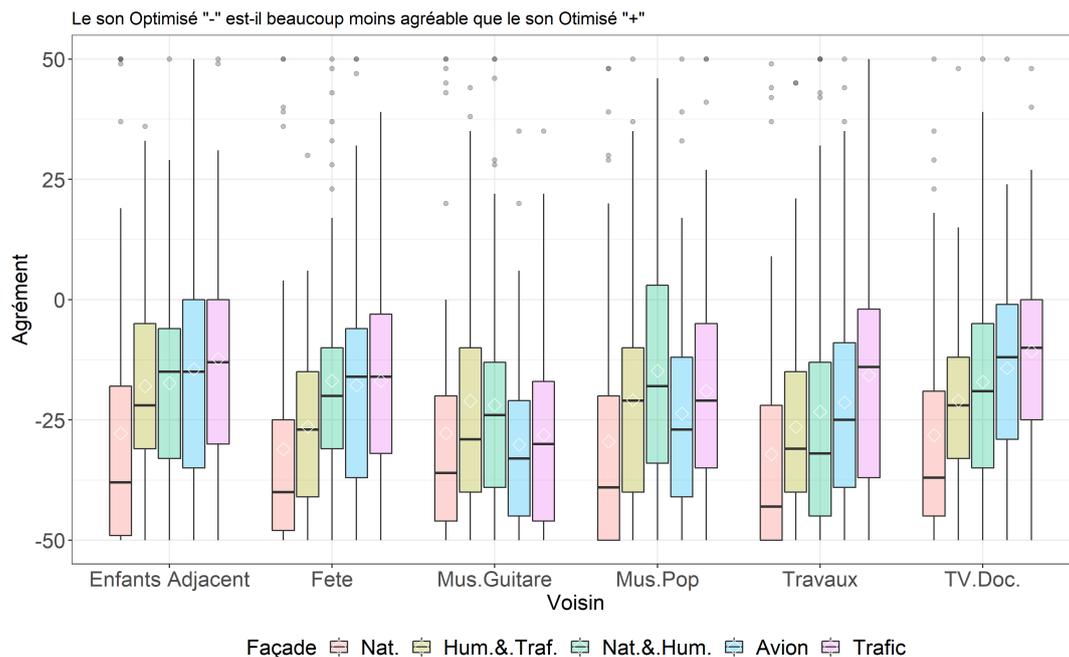


FIGURE 5.13 – Distributions des comparaisons d'agrément sonores entre les deux scénarios optimisés : la scène la moins agréable comparée à celle la plus agréable pour chaque couple de sources sonores étudié. -50 = Beaucoup moins agréable; +50 = Beaucoup plus agréable / \blacklozenge : Valeur moyenne; - : Valeur médiane.

AFEXⁱ développée en \mathcal{R} . Les deux facteurs étudiés sont les deux variables décrivant les sources sonores en fonction de deux provenances : le voisin et la façade donnant sur l'extérieur. L'interaction des deux facteurs est également évaluée. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau 5.6 et montrent que les deux facteurs de provenance ainsi que le facteur d'interaction influent tous trois significativement sur les notes de comparaisons d'agrément (p -value < 0.01). Pour ce Tableau 5.6, les désignations de colonnes sont données suivant les acronymes suivants :

- Somme des Carrés des Écarts (SCE)
- Generalized Eta-Squared (GES)

Effet	DDL	SCE	Valeur de F	GES	Valeur de p
Voisin	4.33	659.47	5.33	.01	.0002 ***
Façade	3.33	633.37	17.13	.03	<.0001 ***
Voisin :Façade	11.93	604.21	2.45	.02	.004 **

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 5.6 – Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur les comparaisons d'agrément par paires de stimuli (Voisin | Façade); Obtenu sous \mathcal{R} via la fonction $aov_{ez}()$ issue de la librairie AFEX.

Puisque l'effet de chacun des deux facteurs de provenance ainsi que celui d'interaction est significatif, un test post-hoc de comparaisons des moyennes marginales via la fonction $emmeans()$ sous \mathcal{R} est effectué pour le calcul des IC à 95% .

i. [Afex](#) : Librairie de fonctions pour l'analyse factorielle d'expériences suivant la méthode ANOVA ou suivant un modèle mixte

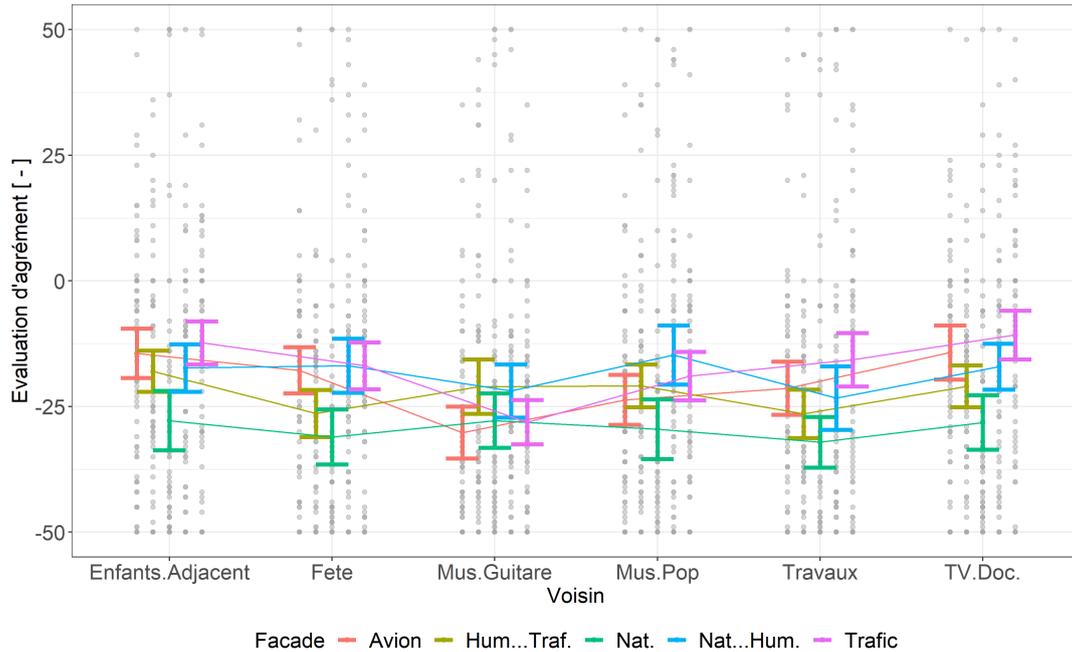


FIGURE 5.14 – Comparaisons d'agréments estimées à partir d'une analyse post-hoc via un calcul des moyennes marginales "emmeans" sur le modèle linéaire défini pour l'ANOVA. -50 = Beaucoup moins agréable ; +50 = Beaucoup plus agréable ; IC à 95% ; les observations individuelles des sujets sont représentées par des cercles en nuances de gris.

La Figure 5.14 confirme l'analyse des résultats bruts. Globalement, les sujets rendent compte d'une détérioration de la sensation d'agrément lors des comparaisons entre scènes sonores optimisées. Les valeurs des estimateurs de moyenne sont toutes inférieures à -10. La présence des sons de nature améliore significativement la sensation d'agrément quelle que soit la source de voisin utilisée. À l'inverse, la présence de sons de trafic en façade rend plus difficile la composition de scènes sonores agréables. De la même manière, lorsque les sons de fête sont impliqués et associés à des sons de passage d'avion, de trafic ou d'un mélange de sons de nature avec présence humaine dans la rue, la différence d'agrément entre les deux optimisations est limitée à -20. Cela implique que pour des sources au potentiel de désagrément plus fort (voir la Figure 4.10), la composition d'environnements sonores optimisés est plus difficile. La différence d'agrément entre les deux optimisations devient alors ténue.

5.5.6 Quantification en gain sonore de l'amélioration d'agrément

La dernière étape de la procédure présentée à la Figure 5.3d vise à quantifier le gain d'agrément obtenu par l'optimisation du contenu sémantique. Pour ce faire, les sujets pouvaient réduire jusqu'à -10 dB le niveau sonore équivalent $L_{Aeq,30s}$ de l'ambiance optimisée la moins agréable et la comparer à l'ambiance optimisée la plus agréable pour laquelle le niveau sonore équivalent reste constant à 40.25 dB(A).

Les résultats présentés à la Figure 5.15 donnent des valeurs de gains très grandes en valeurs absolues quelle que soit la configuration ce qui indiquerait que les différences sémantiques entre paires d'ambiances optimisées sont très importantes. Les sujets ont en effet réduit de plus de 5 dB le niveau de l'ambiance sonore la moins agréable pour qu'elle devienne autant agréable que la scène la plus agréable.

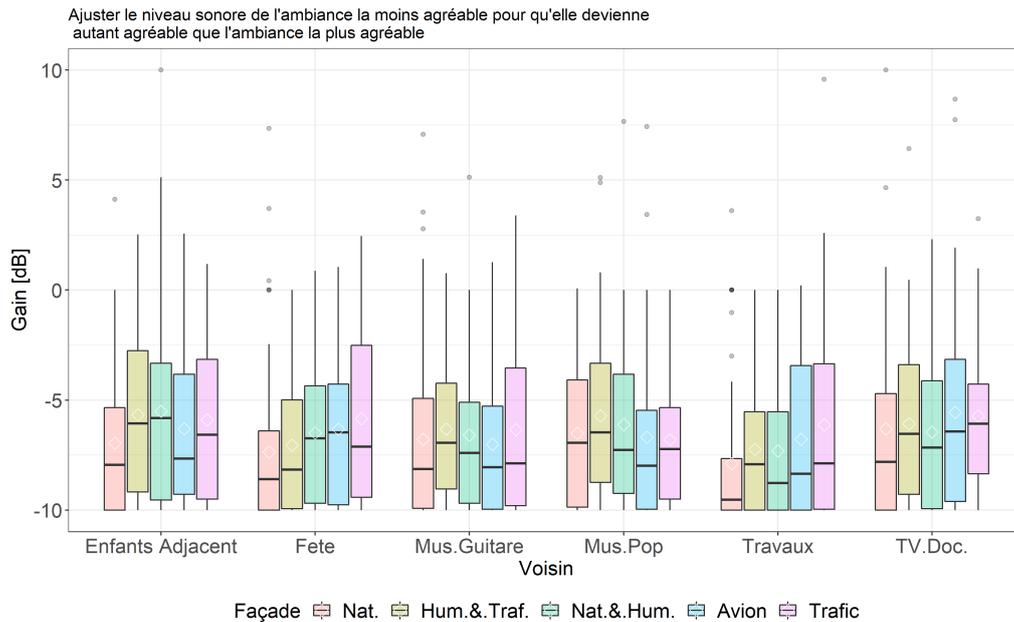


FIGURE 5.15 – Distributions des gains appliqués aux ambiances sonores les moins agréables. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. ♦ : Valeur moyenne ; - : Valeur médiane.

5.5.7 Questionnaire

Pour obtenir des retours d'expériences sur ce test original, un questionnaire a été préparé et articulé autour de six questions restituées en Annexe E. Les résultats présentés à la Figure 5.16 montrent que pour 73% des sujets, le test perceptif d'environ 1h30 n'est ni trop long ni trop court, et qu'il est trop long pour 24 % des sujets. La durée du test semble donc avoir été plutôt bien calibrée.

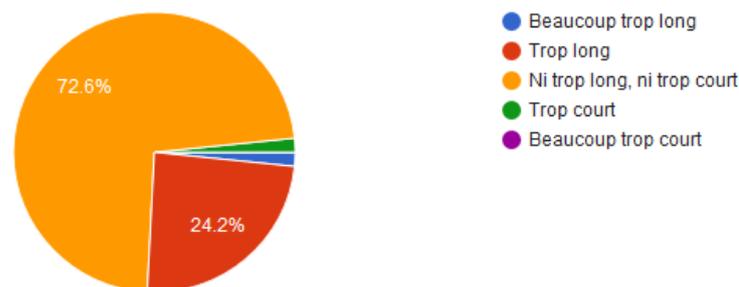


FIGURE 5.16 – Évaluation de la longueur du test par les participants. Question à choix multiples : "Comment évaluez-vous la durée de ce test ?".

L'évaluation de la difficulté pour effectuer les différentes tâches est ensuite proposée, en commençant par une question générale sur l'ensemble du test suivie par 4 questions évaluant la difficulté de chacune des 4 parties du test d'écoute présentées à la Figure 5.3 p.82. Les résultats des réponses à ces questions sont présentés à la Figure 5.17.

La perception de la difficulté varie substantiellement d'une partie à l'autre. La partie la plus difficile est celle concernant la composition de l'ambiance sonore la moins agréable. Vient ensuite

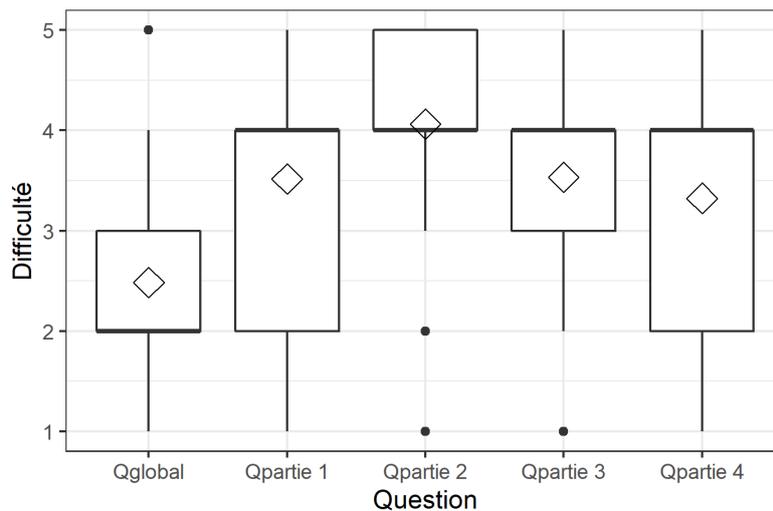


FIGURE 5.17 – Évaluation de la difficulté du test par les participants. (1 = Très facile ; 5 = Très difficile). Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. ◆ : Valeur moyenne ; - : Valeur médiane.

les trois autres parties qui ont approximativement les mêmes valeurs médianes et moyennes. En revanche, la variabilité dans les résultats est plus importante pour les questions référant aux parties 1 et 4 du test ce qui met en évidence des différences de perception des participants sur ces parties. Enfin, chaque partie évaluée individuellement a été perçue plus difficile que lorsque la question porte sur le test dans sa globalité. Même si chaque partie évaluée individuellement a été perçue plutôt difficile en moyenne, dans sa globalité, tout pris ensemble, le test a été en moyenne évalué comme ni difficile, ni facile avec une note moyenne de 2.5 sur une échelle de 1 à 5.

5.6 Conclusion

Il ressort de l'analyse des différentes ACPs que pour 4 des 6 sources sources intrusives du voisin évaluées, un choix consensuel émerge pour la composition des environnements sonores les plus agréables. Ces optimisations s'obtiennent en diminuant le niveau de la source du voisin de 4-5 dB(A) en moyenne au profit des autres (Ventilation ou Façade). Deux stratégies se dessinent ensuite avec des sujets préférant masquer la source du voisin avec une source de ventilation intérieure et d'autres sujets préférant utiliser la source de façade pour effectuer ce masquage. La source préférée pour masquer les sons intrusifs du voisin atteint en moyenne un niveau équivalent L_{Aeq} de 38 dB(A). La source du voisin n'est alors quasiment plus perceptible ($\Delta \geq 6 \text{ dB(A)}$).

Pour les deux sources sonores de voisinage constituées exclusivement de musique (Classique, ou Pop.), des stratégies spécifiques ont été révélées. Ces stratégies confirment les résultats obtenus au premier test révélant les préférences musicales des sujets. Pour la source de musique classique, 90% des individus ont préféré augmenter son gain d'en moyenne 3 dB(A) et le mixer à 50% avec la ventilation intérieure du logement, et à 50% avec la source sonore de façade. Pour la source sonore de musique Pop, les goûts musicaux des sujets sont à nouveau ressortis en cohérence acceptable avec les résultats du premier test d'écoute. Le groupe ayant évalué la musique Pop. déplaisante a réduit son niveau de 5 dB(A) en moyenne et l'a masquée avec les différentes sources provenant de la façade vitrée. Les individus qui au contraire apprécient ce stimulus ont augmenté d'environ 3 dB(A) en moyenne le niveau sonore de la source de musique chez le voisin et l'ont mélangée

soit avec la ventilation (pour la moitié des sujets appréciant cette musique) soit avec les sources de façade (pour l'autre moitié de ce même groupe).

L'étape de comparaison d'agrément des deux compositions optimisées obtenues visait à quantifier si les différences de mixages à niveau constant influent sur la perception d'agrément. En moyenne, dans toutes les configurations, l'optimisation la moins agréable est effectivement moins agréable (de 10 points au minimum sur une échelle de 101 points) que l'optimisation la plus agréable. À partir du mixage des sources, la sémantique de l'environnement sonore global ainsi modifié améliore significativement la sensation d'agrément. Ce résultat ressort encore davantage lorsque les sons de nature ou de musique classique sont impliqués. Le niveau des sons de nature (ou de musique classique) est augmenté dans le cas le plus agréable, et diminué dans le cas le moins agréable. Il en découle une différence d'agrément d'environ 30 points entre les deux optimisations sur une échelle de 101 points. La présence de sons de nature (ou de musique classique) améliore donc nettement la sensation d'agrément.

L'influence de la sémantique des sources est confirmée. À même niveau sonore équivalent, des différences significatives d'agréments ont été révélées. L'étude d'une superposition de sources provenant du voisin, de l'extérieur et du logement révèle l'importance de prendre en compte les effets de masquage sonore. Par exemple, les sons intrusifs non-musicaux du voisin ont très souvent été masqués. Mais ces effets de masquage n'ont pas été perçus uniformément sur le panel de sujets. Par exemple, l'utilisation de la ventilation comme source de masquage peut améliorer la perception d'agrément ou bien la dégrader selon les préférences individuelles et aucun critère socio-culturel n'a permis d'expliquer ces différences.

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser au confort dans le bâtiment. Pour cette étude, les sujets ont été soumis à des ambiances sonores variables définies en fonction des dispositions constructives. Un choix de sources définitif est cependant nécessaire et doit se fonder sur les résultats des deux premiers tests.

5.7 Vers une sélection de sources

Sur la base des deux premiers tests perceptifs, un choix final de sources est effectué pour le dernier test dédié à l'étude des performances du bâti. La multitude de sources qui entoure le résident dans son logement et la variabilité induite par la subjectivité dans l'évaluation d'agrément nécessitait une étude préliminaire sur la sémantique des sources avant d'étudier l'effet des performances du bâti. Ces premiers tests ont permis de rendre compte des goûts sémantiques en matière de sources sonores écoutées individuellement (test 1 au Chapitre 4) ou en mélanges (test 2 au Chapitre 5).

Pour ce dernier test, il convient de choisir des sources invariantes tout au long de l'expérience. Les sources ne changent pas, elles sont simplement plus ou moins bien atténuées en fonction du système constructif simulé. Deux environnements sonores sont perçus simultanément : une scène sonore en provenance du voisin adjacent sur la droite du sujet (énergie acoustique rayonnée par tout le séparatif voisin) ainsi qu'une scène sonore provenant de l'extérieur du bâtiment transmise par la façade du bâtiment en face du sujet.

Les deux sources retenues pour ce dernier test d'écoute sont le trafic routier dans une rue / avenue pour la source de façade et un stimulus de fête chez le voisin. Ce choix s'est effectué pour satisfaire aux critères suivants :

- Durée de 15 min. chacune ;

- Scènes évaluées désagréables ;
- Autant désagréables l'une que l'autre ;
- Plutôt consensuelles ;
- Niveau sonore à l'origine élevé :

L'absence de sons de ventilation intérieure au logement se justifie par les résultats obtenus au test 2 détaillés dans ce Chapitre 5. Deux points de vues ont émergé révélant deux stratégies de masquage. Un groupe de sujets tend à augmenter le niveau de la ventilation pour masquer les sons intrusifs du voisin et l'autre préfère le baisser et utiliser les sons extérieurs issus de la façade pour les masquer. Puisque le choix de sources sonores consensuelles s'impose pour limiter la variabilité inter-sujets, et puisque la fonction de masquage de la ventilation n'est approuvée que par une partie des sujets, cette source n'a pas été retenue dans le dernier test.

Les deux compositions (du voisin, et de l'extérieur) durent 15 minutes en raison de l'approche cognitive choisie pour ce test. Cette approche requière une immersion suffisamment longue dans l'environnement sonore pour assurer un bon niveau de validité écologique.

Le choix de scènes sonores désagréables s'est fait dans le but d'augmenter la probabilité de rendre compte d'un effet des performances du bâti. L'amélioration de performances des éléments constructifs du bâtiment influera sur la gêne d'autant plus que le potentiel de désagrément de la source est élevé. Puisque seul l'effet des éléments constructifs est évalué dans ce test d'écoute, le potentiel d'agrément doit être similaire pour les deux scènes sonores entendues simultanément de deux provenances différentes (Façade et Voisin adjacent). Les résultats présentés à la Figure 4.10, au Chapitre 4, page 73 montrent que ces deux sources de fête, et de trafic sont toutes deux désagréables et de désagrément moyen proche autour de -25 sur une échelle allant de [-50 : +50].

Enfin, les scènes sonores doivent être perceptibles par les sujets après filtrage ce qui implique qu'elles soient à l'origine à un niveau sonore élevé et réaliste. Pour toutes ces raisons, la fête chez le voisin ainsi que le trafic routier de véhicules à faible vitesse en provenance de l'extérieur ont été choisies pour le dernier test d'écoute.

Chapitre 6

Confort / Gêne dans le bâtiment

6.1 Contexte de l'étude

Le contexte choisi est celui de la rénovation d'un ancien bâtiment des années 1920 - 1940. Les systèmes constructifs utilisés dans les calculs des performances acoustiques s'inspire des travaux de BALANANT (2018). Un historique des types de bâtiment construits en France de 1850 à nos jours est détaillé dans ce guide. Il en ressort l'utilisation en façade de briques pleines et/ou creuses, de murs séparatifs constitués de parpaings de ciment, mâchefer, ou de briques creuses, et de planchers constitués de poutrelles métalliques et augets, ou bien de hourdis bétons, placés entre poutrelles béton. Sur la base de cette étude, un contexte de bâti a été défini pour l'étude. Le bâtiment simulé pour l'expérience est constitué d'une façade en briques pleines avec un simple vitrage 4 mm, d'un séparatif avec le voisin adjacent constitué d'un mur de briques creuses, et d'un plancher en béton. Les performances acoustiques de ce type de bâtiment sont mauvaises. Dans un contexte de rénovation, des changements sont proposés pour améliorer les performances acoustiques du bâtiment. Ces améliorations sont décrites Section 6.1.1.

L'objectif de cette étude est d'évaluer si l'amélioration progressive des performances d'un bâtiment ancien par des travaux (simulés) de rénovation réduit la gêne sonore. Pour le mesurer, l'approche cognitive d'écoute distraite est requise. Des mesures subjectives de gêne sonore, ainsi que des mesures de performance sont effectuées dans l'objectif double d'occuper les sujets et de récolter des données pour évaluer si l'environnement sonore influe sur leurs performances. La mesure de performance sert alors à objectiver la gêne sonore (voir la Section 2.4.2).

6.1.1 Sélection des systèmes constructifs

À partir de ce contexte de bâtiment des années 1920 - 1940, des options de rénovation sont testées. La première amélioration consiste à changer le simple vitrage et à le remplacer par un double vitrage de dimensions 4/16/10 mm permettant de passer d'un isolement de façade in situ $DnTA_{f,r}$ de 30 à 41 dB. L'environnement sonore perçu est ainsi modifié avec des sons intrusifs extérieurs moins présents.

La seconde amélioration évaluée consiste en une amélioration de l'isolement acoustique du séparatif voisin adjacent grâce à l'ajout d'un doublage simple 100+10 mm constitué d'une plaque de plâtre et de 100 mm de laine de verre. En plus de l'amélioration de façade obtenue avec le double vitrage, les sons intrusifs du voisin sont eux aussi globalement mieux atténués grâce à une amélioration du $DnTA$ de 45 à 52 dB. Une détérioration en basses fréquences sous 100 Hz est à noter en raison de la résonance "masse-ressort" du doublage.

La dernière configuration ne correspond à aucun cas réel de rénovation et a été imaginé à des fins de recherche. Saint-Gobain promet l'utilisation de solutions légères. Plus facile à transporter, à

mettre en œuvre, et garantissant un encombrement réduit, elles possèdent néanmoins des faiblesses dans les basses fréquences puisqu'il est difficile de maintenir des performances satisfaisantes dans cette région fréquentielle lorsque la masse et l'épaisseur du système sont plus faibles en comparaison aux solutions lourdes. L'effet des basses fréquences sur la perception des résidents est l'objet de nombreuses recherches (LJUNGGREN, SIMMONS et ÖQVIST 2017; NIELSEN et al. 1998; ZIARAN 2013; C. S. PEDERSEN et al. 2006) et a mené à l'émergence d'indicateurs et de coefficients correctifs prenant en compte l'isolement basses fréquences jusqu'à 50 Hz (ISO717-1 2013). Une nouvelle norme ISO 16717-1 était même à l'étude pour la prise en compte des bandes de fréquences 50, 63, et 80 Hz dans le calcul de l'indicateur global d'isolation acoustique aux bruits aérien et d'impact. Hongisto et ses collègues décrivent les principaux résultats trouvés dans la littérature qui évaluent la pertinence de la prise en compte des basses fréquences (en dessous de 100 Hz) dans le calcul de ces indices globaux (HONGISTO, MÄKILÄ et SUOKAS 2015). Ces indices uniques sont-ils mieux corrélés avec la gêne perçue ou le désagrément lorsque les basses fréquences sont mieux prises en compte ? Il semble que les indicateurs R_{living} et $R_{traffic}$ définis dans la nouvelle norme ne permettent pas d'obtenir de meilleures corrélations avec la gêne perçue alors qu'ils prennent tout deux en compte les bandes de fréquences à 50, 63 et 80 Hz. Ces conclusions sont confirmées par plusieurs études psycho-acoustiques (BAILHACHE et al. 2014; RYCHTÁRIKOVÁ et al. 2012; HONGISTO, OLIVA et al. 2014). Le choix de cette dernière configuration consistant en une solution constructive légère virtuelle vise donc à rendre compte d'une amélioration très significative basses fréquences pour évaluer si une telle solution réduit la gêne sonore comparée au doublage classique. Pour maintenir un niveau sonore équivalent L_{Aeq} égal entre les deux dernières conditions, l'amélioration basses fréquences et couplée avec une légère détérioration dans la région de la loi de masse. De cette manière, seule la différence de timbre influe sur la perception et non la différence de niveau sonore.

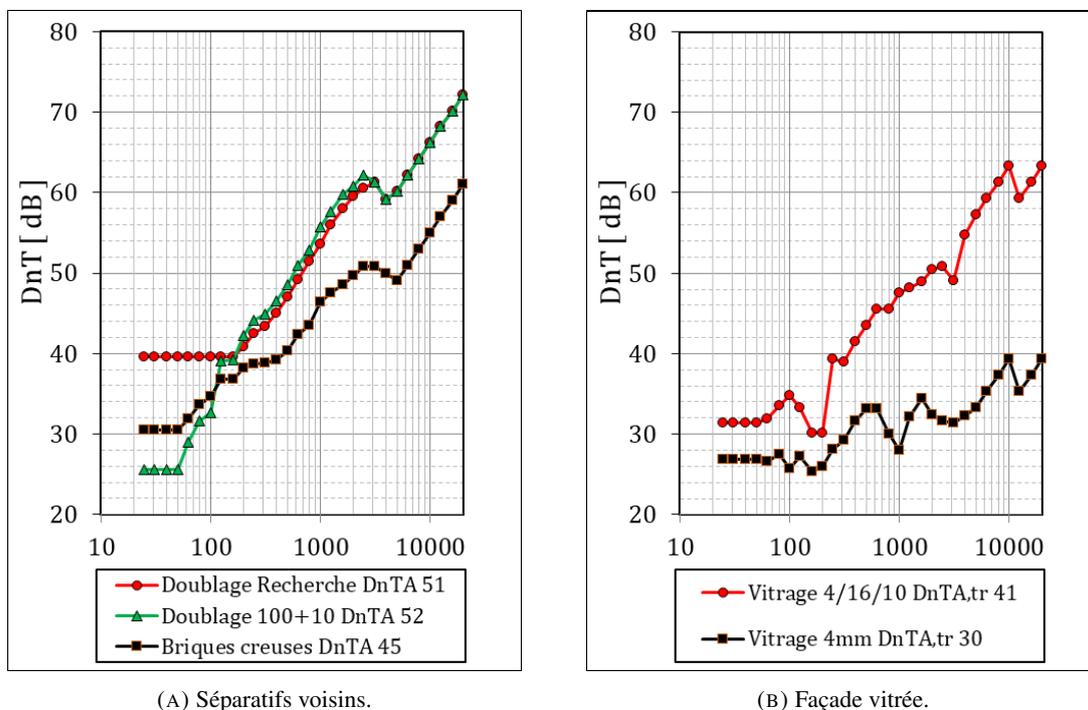


FIGURE 6.1 – Isolements normalisés calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isollements aux bruits aériens venus de l'extérieur, et entre deux locaux; les coefficients C et C_{tr} sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.

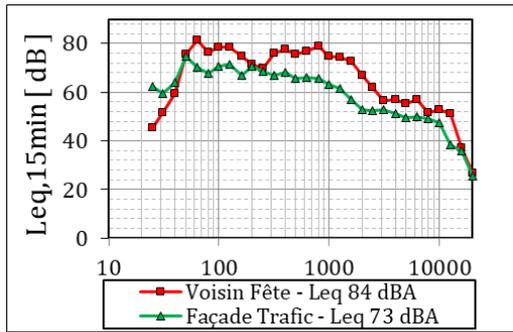
Ref.	Séparatif Voisin		Façade	
	Désignation	$D_{nT,w}$ [dB] (C, C_{tr}) ($C_{50:3150}, C_{tr,50:3150}$)	Désignation	$D_{2m,nT}$ [dB] (C, C_{tr}) ($C_{50:3150}, C_{tr,50:3150}$)
C1	Briques creuses	46 (-1; -3) (-1; -4)	Simple Vitrage 4 mm	32 (-1; -2) (-1; -2)
C2				
C3	Briques creuses + Doublage 100+10	53 (-1; -5) (-2; -9)	Double Vitrage 4/16/10 mm	46 (-1; -5) (-2; -5)
C4	Briques creuses + Doublage 100+10 "Recherche"	52 (-1; -4) (-1; -4)		

TABLEAU 6.1 – Indicateurs globaux calculés suivant les normes ISO12354-1 2017 et ISO12354-3 2017 respectivement pour les isolements aux bruits aériens entre deux locaux, et venus de l'extérieur; les coefficients C et C_{tr} sont déterminés à partir du calcul défini par la norme ISO717-1 2013.

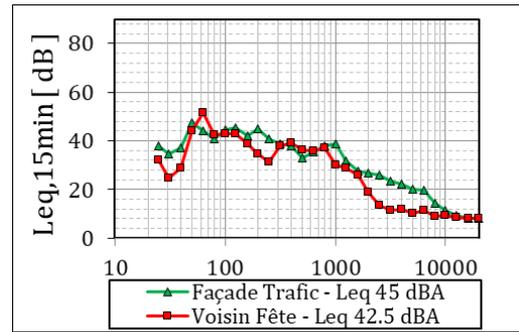
6.1.2 Sélection des sources

La sélection de sources pour le dernier test découle des résultats des deux tests précédents. Le choix de ces sources a été l'objet de la Section 5.7 du précédent Chapitre 5, page 101. La Figure 6.2 rend compte des spectres moyens sur 15 minutes des deux scènes sonores enregistrées par un couple de microphones 01-dB de classe 1 autour du point central d'écoute avant filtrage du bâtiment initial (Figure 6.2a) et dans chacune des conditions sonores simulant les 4 situations constructives (Figures 6.2b, 6.2c, 6.2d, et 6.2e respectivement pour les conditions C1, C2, C3, et C4).

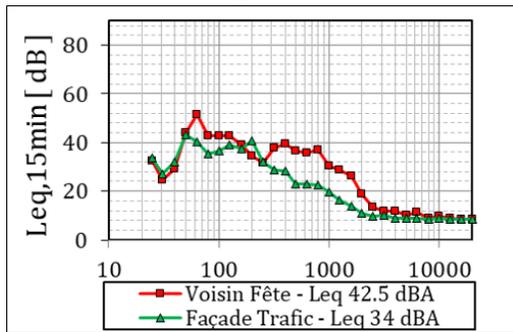
La scène sonore de trafic routier consiste en une boucle de 5 minutes reproduite 3 fois pour obtenir les 15 min requise pour l'expérience. Elle est composée d'un bruit de fond de trafic auquel s'ajoute 3 événements par minute. Au cours d'une minute, la scène est composée de trois passages distincts de véhicules à faible vitesse. Les véhicules sont de types variés : chaque minute voit passer une voiture, un poids-lourd, et un deux-roues dans un ordre aléatoire. Ces passages ont été composés en s'inspirant des catégories sémantiques définies par MOREL (2012). Les émergences de ces passages sont définies comme suit $E = L_{max,1s} - L_{90}$, avec $L_{max,1s}$ les niveaux des événements d'intensité maximales [dB], et L_{90} , le niveau sonore dépassé 90 % du temps aussi appelé bruit de fond [dB]. En ville, nombreuses sont les situations pour lesquelles ces émergences dépassent les 15-20 dB dans les rues et avenues (L. BROWN et DE COENSEL 2018; SAMUELS et PARNELL 2004; RICCIARDI et al. 2015). La scène de trafic a été composée pour que les passages de véhicules atteignent ces valeurs d'émergences usuelles et réalistes de 15-20 dB.



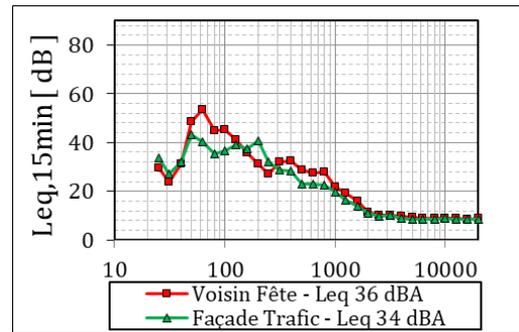
(A) Situation 0 non évaluée par les sujets : Avant filtrage par le bâti.



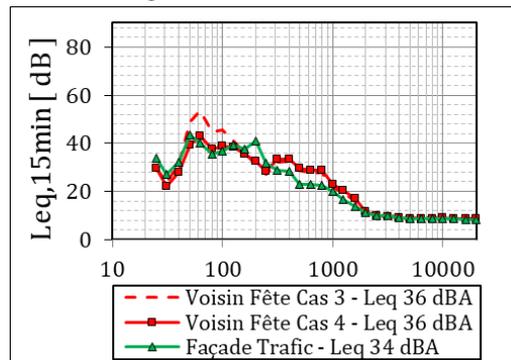
(B) Condition C1 - Briques Creuses (BC) + Simple vitrage.



(C) Condition C2 - BC + Double vitrage.



(D) Condition C3 - BC + Doublage + Double vitrage.



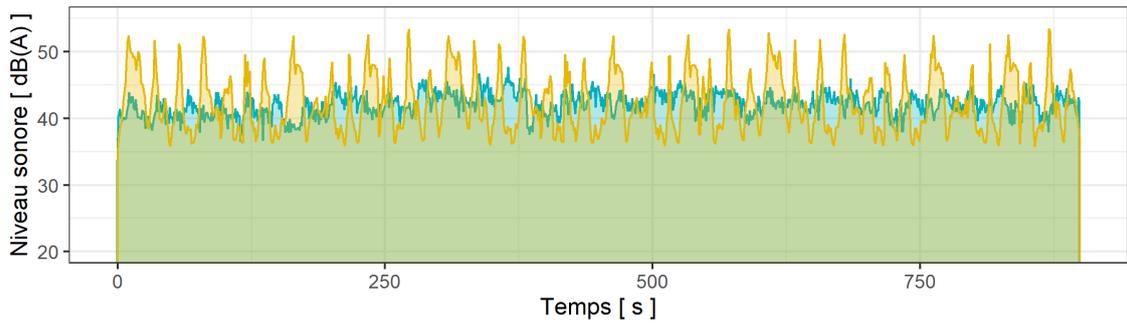
(E) Condition C4 - BC + Doublage Recherche + Double vitrage.

Origine	Niveau sonore équivalent $L_{Aeq,15min}$, en $dB(A)$				
	Ext.	C1	C2	C3	C4
Voisin	84	42.5	42.5	36	36
Façade	73	45	34	34	34
Total		47	43	38	38

FIGURE 6.2 – Enregistrements des stimuli spatialement restitués par la chaîne audio du laboratoire dans le salon d'écoute à deux points de mesures centrés sur le centre d'écoute à l'aide d'un couple de microphones classe 1 01-dB. Les spectres en tiers de bandes d'octaves sont suivis par un tableau récapitulatif des niveaux sonores équivalents $L_{Aeq,15min}$.

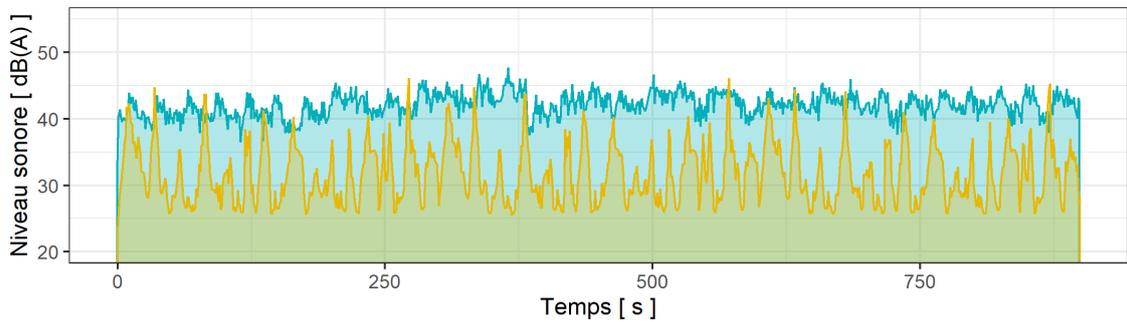
Le niveau sonore équivalent de la source de fête chez le voisin (avant filtrage du bâti) est de 84 dB(A). La question de déterminer si un tel niveau sonore pour une source de soirée est réaliste se pose. Puisque la littérature n'est pas très fournie sur ce sujet, l'évaluation de réalisme a été effectuée par un groupe de cinq sujets experts. Il était demandé aux sujets de s'imaginer dans une fête et d'indiquer si l'ambiance sonore leur paraissait réaliste. Tous les sujets ont évalué unanimement ce niveau sonore réaliste. La source de trafic est également à un niveau équivalent L_{Aeq} élevé mesuré à 73 dB(A). Le choix du niveau sonore pour la source de trafic s'appuie sur les mesures effectuées par l'association de BruitParif en Ile de France. Des cartographies de l'indicateur L_{den} qui correspond à un niveau sonore équivalent pondéré en fonction des périodes de jour, soir, et nuit, rend compte de niveaux L_{den} de plus de 70 dB(A) dans des avenues à Paris par exemple. Ces cartographies sont visibles sur [le site de BruitParif](#). Sur la base de ces mesures, le contexte choisi pour le test d'écoute correspond à une situation bruyante de trafic routier extérieur. Dans la première condition C1 correspondant à la situation du bâtiment des années 1920s avant rénovation, les deux sources ont des niveaux proches dans le bas du spectre [20 - 2000] Hz. Il y a donc une superposition des deux sources sur cet intervalle fréquentiel. Sur le haut du spectre, la source de trafic routier domine en raison des faiblesses d'isolation du simple vitrage comparé aux performances d'isolation de la cloison en briques creuses du voisin (également faibles mais meilleures). Une fois le vitrage remplacé, le niveau L_{Aeq} de la fête chez le voisin est supérieur à celui de trafic sur l'ensemble du spectre (à l'exception de la bande de tiers d'octave à 200 Hz). Alors que le niveau global est réduit de 4 dB(A) passant de 47 à 43 dB(A), la dominance de la source du voisin pourrait influencer sur la gêne des sujets. Ensuite, le doublage simple sur le séparatif en briques creuses est appliqué pour obtenir les spectres présentés en condition C3 à la Figure 6.2d. La dominance de la fête est moins franche entre 200 et 3000 Hz en raison de l'amélioration d'isolement obtenue avec ce doublage. En revanche sous 100 Hz, une dégradation des performances du séparatif voisin rend plus audibles les basses de la source de Fête. En niveau équivalent L_{Aeq} , le niveau de la source de fête est réduit de 6.5 dB(A) passant de 42.5 à 36 dB(A). Le doublage 100+10 mm est finalement remplacé par le doublage "Recherche" qui ne change rien en niveau sonore équivalent mais qui réduit le niveau des basses de la source de fête chez le voisin.

Les fluctuations de niveaux sonores en fonction du temps sont ensuite présentées à la Figure 6.3 pour les deux sources perçues. La source de trafic routier fluctue plus lentement mais avec des amplitudes bien plus importantes que le stimulus de fête en raison des passages de voitures, de camions, et de motos à faibles vitesses générant des émergences saillantes jusqu'à 15 dB(A). Dans la première condition, la source de trafic domine à chaque passage de véhicule, et la fête chez le voisin domine seulement entre les passages de véhicules. En condition C2 présentée à la Figure 6.3b, le double vitrage 4/16/10 mm permet une atténuation significative de la source de trafic. La fête chez le voisin devient dominante sur les 15 min (à l'exception de 4 pics à 80, 300, 575 et 875 s) avec des différences de niveaux significatives entre les sources. Les évolutions temporelles des conditions C3, et C4 sont très similaires en termes de niveaux sonores. Dans ces deux conditions, la source de fête chez le voisin domine la plupart du temps. La source de trafic prend le dessus aux émergences de passages des véhicules.



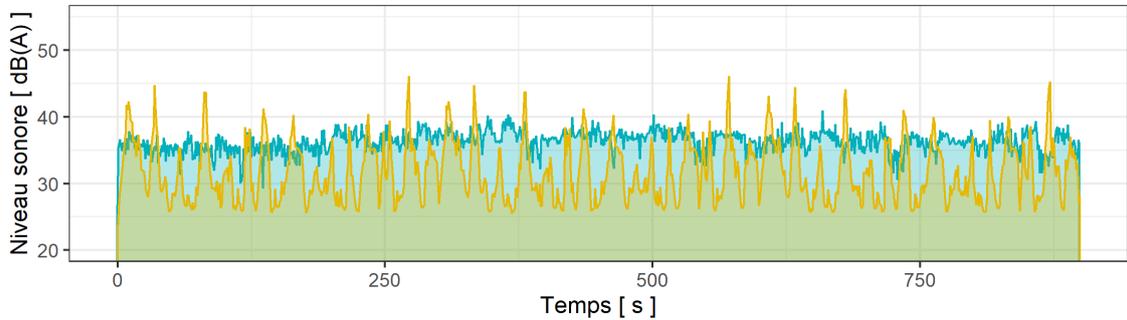
Origine ■ Fête Voisin ■ Trafic Façade

(A) Condition C1.



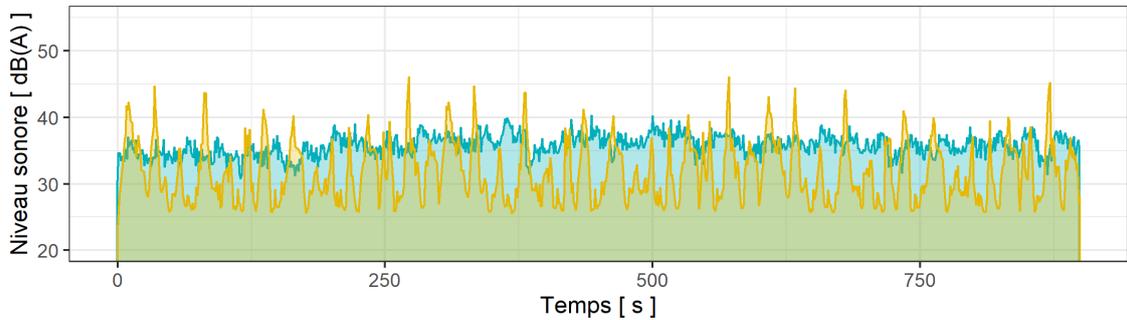
Origine ■ Fête Voisin ■ Trafic Façade

(B) Condition C2.



Origine ■ Fête Voisin ■ Trafic Façade

(C) Condition C3.



Origine ■ Fête Voisin ■ Trafic Façade

(D) Condition C4.

FIGURE 6.3 – Niveaux sonores en dB(A) des enregistrements des stimuli spatialement restitués par la chaîne audio du laboratoire dans le salon d'écoute moyennés sur les deux points de mesure autour du centre d'écoute à l'aide d'un couple de microphones classe 1 01-dB.

6.1.3 Approche cognitive

Alors que pour les deux précédents tests décrits Chapitres 4 et 5, une écoute attentive était requise, le dernier test repose sur une approche cognitive nécessitant une écoute distraite. Comme développé en Section 2.4.2, les deux types d'écoutes décrits par GAVER (1988), rendent compte de l'importance de garantir les conditions d'une écoute distraite ("Every day listening") pour satisfaire au critère de validité écologique nécessaire pour un test d'écoute en laboratoire. La notion de confort acoustique se définit dans le cadre de ces travaux en fonction de l'activité effectuée. Pour l'évaluer, les sujets sont mis en situation afin de se rapprocher au plus près des conditions naturelles d'occupation d'un salon d'appartement résidentiel. Pour occuper les sujets, deux activités leurs sont confiées, une activité "facile" de lecture, et une autre "difficile" de RG selon SHINGLEDECKER (1984). Des performances aux exercices sont cependant mesurées pour inciter les participants à suivre attentivement les consignes et jouer le jeu. Les résultats de ces mesures permettront éventuellement d'exclure les sujets qui n'auraient pas suivi les consignes convenablement.



FIGURE 6.4 – Photo présentant le positionnement des doigts pour l'activité de lecture.

6.1.3.1 La lecture

L'activité de lecture a été développée par Carine Royer, chercheur en psychologie cognitive et membre du laboratoire Paragraphe de CY Cergy Paris université, et par Hélène Guinet, doctorante au sein de l'université de Paris 8. Des textes d'égales difficultés ont été créés dans le cadre des recherches sur l'évaluation de la compréhension de la lecture par les enfants.

Les textes fournis et utilisés pendant le test d'écoute sont disponibles en Annexe F. Ces textes sont donc calibrés pour être d'égale difficulté et simples. Ils correspondent donc aux besoins pour l'étude. Le protocole expérimental pour l'activité de lecture s'articule autour de trois étapes :

1. Lecture d'un texte de 6 lignes d'égales longueurs ;
2. Présentation à l'écran d'un mot nommé "mot cible" - le sujet répond par Oui ou Non pour indiquer si le mot appartient à la langue française ;
3. Question de compréhension sur le texte lu avec pour réponse attendue Oui ou Non.

Le sujet ne doit pas changer la position des doigts de ses deux mains pendant la durée de l'exercice de lecture (Voir Figure 6.4). Chaque sujet ne lira jamais deux fois le même texte. À chaque nouvelle condition sonore, la série de textes est différente. La lecture s'effectue ligne par ligne. Seulement une ligne est présentée à la fois à l'écran. Pour passer à la ligne suivante, le sujet appuie sur la touche espace du clavier avec l'un de ses deux pouces. Le temps de lecture est mesuré pour chaque ligne et est défini comme le temps écoulé entre deux appuis successifs sur la touche espace du clavier.

Le mot cible présenté à l'écran est soit un mot de la langue française (écrire, cacher, couler), soit un mot inventé (himbule, replouter, etc.). L'utilisateur doit répondre en pressant sur la touche

du clavier sur laquelle est inscrite "Oui" dans le cas où il s'agit d'un mot de la langue française, et au contraire doit presser sur la touche du clavier où il est inscrit "Non" dans le cas où le mot cible affiché n'est pas un mot de la langue française. Des gommettes collées sur les touches "S" et "L" du clavier ont été utilisées pour indiquer les valeurs "Oui", et "Non". Cet exercice sur les mots cibles vise à étudier les mécanismes inférentiels pour évaluer la compréhension de la lecture chez l'enfant. Cette partie du test n'est pas liée à notre problématique sur l'effet du son sur les performances mais est décrit ici à titre indicatif. Dans le plan d'expérience prévu pour ce test de lecture, chaque texte lu pré-active plus ou moins fortement le mot cible.

Exemple :

"C'était les vacances scolaires, une belle journée d'automne, Martin travaillait seul chez lui et en avait assez. Il décida d'aller voir ses copains. Il sortit au parc et les retrouva. Martin était content de ne pas avoir oublié son ballon."

Le mot cible qui apparaît ensuite est le mot "jouer". Pour cet exemple, le contexte induit par le texte lu pré-active le mot cible. La pré-activation est induite par les deux dernières phrases. Dans le plan d'expérience, plusieurs conditions inférentes ou non ont été proposées. Toujours concernant le même texte, dans le cas non-inférent les deux dernières phrases sont remplacées par :

"(Martin) était content de ne pas avoir oublié son sac. Ils allèrent vers le marchand de glaces."

Ici le mot cible "jouer" n'est plus pré-activé. L'hypothèse visant à être vérifiée par ce test est la suivante. Si le texte a bien été compris par le sujet, son temps de réponse pour évaluer si le mot est bien de la langue française devrait être plus faible dans le cas inférent que dans le cas non-inférent. Cette méthode serait alors utile pour évaluer les capacités de lecture chez l'enfant. Enfin, dans 50% des cas vus par les sujets, le mot cible n'est pas de la langue française pour que les sujets ne répondent pas systématiquement "oui" à la consigne. Pour cette réponse au mot cible, la réponse du sujet est enregistrée avec son temps de réponse associé.

Une fois que la réponse du sujet concernant le mot cible est donnée, une affirmation apparaît à l'écran. le sujet doit dire si cette affirmation concernant le texte est vraie ou fausse. Dans le cas de l'exemple cité au-dessus, l'affirmation est la suivante :

« Tous les copains de Martin sont partis en vacances ». Dans ce cas, la réponse attendue est "Non". Cette question de compréhension a pour but de vérifier si le sujet a bien compris le texte, et de l'inciter à rester attentif. Pour cette réponse à l'affirmation de compréhension, la réponse du sujet est enregistrée avec son temps de réponse associé. Ce cycle est répété 16 fois avec 16 textes différents par condition sonore. L'exercice de lecture dure environ 5 minutes.

La tâche de lecture de textes pour enfants, et d'égales difficultés, est une activité supposée facile pour un panel d'adultes. Suivant l'approche cognitive, plusieurs hypothèses seront testées pendant l'expérience :

Hypothèse 1 : L'effet d'apprentissage devrait être faible ou absent en raison de la simplicité de l'activité;

Hypothèse 2 : Sous l'effet d'une surcharge cognitive engendrée par un stimulus sonore, la vitesse de lecture est perturbée, ralentie ;

Hypothèse 3 : Sous l'effet d'une surcharge cognitive engendrée par un stimulus sonore, la baisse dans le niveau de compréhension des textes induirait une baisse du taux de bonnes réponses et/ou un ralentissement de la vitesse de réponse aux questions de compréhension.

Les hypothèses sur les mécanismes inférentiels ne pourront pas être évaluées dans le cadre de ces travaux. Ce test de lecture a été adapté par Carine Royer pour les besoins de l'étude perceptive sur les sons. Les besoins de l'étude se limitent à la production de 80 textes d'égale difficulté. Les mots cibles associés aux conditions d'inférences des textes n'ont pas été conçus pour ce test dans l'objectif de proposer un plan complet d'expérience visant à mesurer des effets des inférences sur les performances. Puisque le plan d'expérience n'est pas complet, les mesures de performances sur les mots cibles ne seront pas traitées dans le corps de ce mémoire.

6.1.3.2 Le Raisonnement Grammatical (RG)

La tâche de raisonnement grammatical est une tâche difficile nécessitant des ressources cognitives de logique. Elle a été développée au Air Force Aerospace Medical Research Lab par Shingledecker (SHINGLEDECKER 1984). Le système logique contenu dans les langues est utilisé pour tester la capacité à évaluer des règles relationnelles à partir d'un duo de phrases et d'un trio de symboles spéciaux (*, #, et @). Cette tâche est dérivée du test de BADDELEY (1968). Les stimuli visuels sont des phrases dont la syntaxe varie et sont accompagnés d'un enchaînement ordonné de trois symboles présentés simultanément. Les phrases doivent être analysées pour déterminer si elles décrivent correctement l'ordre des symboles. Shingledecker propose 3 niveaux de difficultés allant de "faible charge cognitive" à "forte charge cognitive". Dans le cadre de l'étude, le niveau de difficulté le plus fort a été retenu. Ce choix s'inspire des travaux d'Ébissou (EBISSOU 2013) montrant la difficulté d'objectiver la gêne sonore par l'intermédiaire de mesures de performances dans le cas où les stimuli sonores sont des paroles plus ou moins intelligibles. Ce choix suppose que l'augmentation de la difficulté du test augmente la probabilité de mesurer un effet des stimuli sonores sur la mesure de performance et sur la mesure subjective de gêne associée. Le test avec le niveau de difficulté le plus élevé est décrit comme suit. Deux phrases associées à une série de 3 symboles sont présentées simultanément à l'écran. Une capture d'écran de la tâche de RG est proposée à la Figure 6.5.

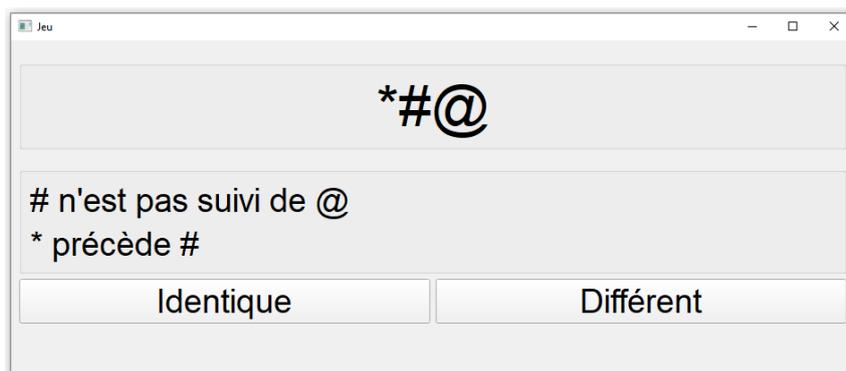


FIGURE 6.5 – Capture d'écran de l'interface utilisateur GUI du jeu de RG.

Ce duo de phrases est formulé comme une combinaison entre deux modalités grammaticales : Actif / Passif, et Positif / Négatif. Chaque phrase peut être sur l'une des quatre formes suivantes : Passive/Négative, Passive/Positive, Active/Positive, Active/Négative. À partir de la forme de la première phrase, la seconde est nécessairement sous la forme complémentaire. Par exemple, si la première phrase est sous la forme Active/Positive, la seconde est sous la forme Passive/Négative.

Le sujet doit choisir la réponse qui correspond à la situation donnée par le trio de symboles ordonné et les deux phrases. Soit les deux phrases sont vraies, soit elles sont toutes les deux fausses ou alors l'une est vraie et l'autre fausse. Dans les deux premiers cas, la réponse attendue est "Identique" et dans le troisième cas la réponse attendue est "Différent". Pour chaque combinaison, le sujet a un temps limite de 16 secondes. Ce temps limite sert de facteur d'incitation pour répondre rapidement. La consigne pour cette tâche est de répondre le plus rapidement possible en s'assurant d'avoir la réponse juste.

Pour chaque condition sonore, la tâche de raisonnement grammatical dure environ 5 minutes, et est constituée des 24 combinaisons différentes. Un temps de deux secondes de transition est imposé entre chaque combinaison à analyser. Ces 24 combinaisons sont construites pour que soit obtenu autant de duo de phrases Vraie/Vraie, Fausse/Fausse, Vraie/Fausse, et Fausse/Vraie c'est à dire autant de combinaisons identiques que de combinaisons différentes. À chaque condition sonore C1, C2, C3, et C4, les mêmes 24 combinaisons de phrases et symboles sont à nouveau présentées au sujet dans un ordre aléatoire.

Ce test de raisonnement grammatical a été développé sous Python 3.7.4 à l'aide des bibliothèques suivantes : sys, os, pandas, numpy, et PyQt5. L'ordre de présentation des combinaisons est aléatoire (suivant la fonction `numpy.random.permutation()`).

6.1.4 Procédure

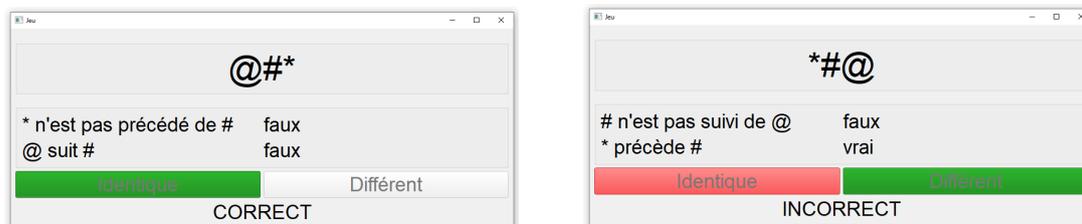
Le sujet est tout d'abord invité à s'asseoir au point central d'écoute dans le fauteuil mis à disposition. L'instructeur explique oralement la mise en contexte dans laquelle il doit se placer. Le sujet doit s'imaginer chez lui, dans son salon et en soirée. Pour que l'environnement extérieur ne contredise pas cette mise en contexte, les volets du laboratoire sont maintenus fermés, et les lumières intérieures sont toutes allumées. La première partie de la séance est consacrée à des entraînements aux deux tâches cognitives : la lecture, et le RG. Ces entraînements s'effectuent dans un environnement silencieux puisque le bruit de fond du laboratoire se situe autour de 25 dB(A). Les entraînements visent à réduire voire à éliminer l'effet d'apprentissage.

6.1.4.1 Entraînement à la lecture

L'entraînement à la tâche de lecture est spécifique parce qu'il comporte deux objectifs. Il est à la fois un entraînement et une expérience à part entière. En effet, il est inspiré d'un test déjà effectué auprès d'enfants par Carine Royer dans ses recherches en psychologie cognitive. L'intérêt de cette session dans le silence est d'observer si les résultats obtenus sur un échantillon d'enfants sont confirmés lorsqu'il s'agit d'adultes. Ces travaux n'étant pas directement liés au sujet de ce mémoire, ils ne seront pas explicités davantage. L'entraînement à la lecture dure entre 10 à 12 min alors que les sessions de lecture dans les conditions sonores sont plus courtes (environ 5 min). Cela s'explique par une première partie destinée à entraîner les sujets pour répondre aux mots cibles décrits Section 6.1.3.1. Un mot apparaît à l'écran. Le sujet doit répondre par oui ou non pour signifier si le mot en question appartient à la langue française. Au total, 20 mots cibles sont évalués avec autant de mots appartenant à la langue française que de mots n'appartenant à aucune langue connue. S'ensuit deux textes d'entraînement à l'expérience explicitée Section 6.1.3.1. Pour ces deux textes d'entraînement, des étapes d'instruction sont ajoutées pour aider à se familiariser avec l'interface et les commandes à utiliser. Enfin, la série des 16 textes suivis de leurs mot cible et affirmation de compréhension associés est proposée comme décrit Section 6.1.3.1.

6.1.4.2 Entraînement au jeu de RG

L'entraînement au jeu de RG est une réplique de la tâche décrite Section 6.1.3.2 à une différence près. Une fois la réponse donnée par le sujet, la correction s'affiche pendant 5 secondes comme illustré à la Figure 6.6 pour que le sujet sache s'il a eu juste ou faux, et qu'il apprenne de ses erreurs. L'entraînement à la tâche de RG dure également environ 5 minutes, avec 24 combinaisons différentes.



(A) GUI lorsque la réponse est correcte.

(B) GUI lorsque la réponse est incorrecte.

FIGURE 6.6 – Captures d'écran de l'interface utilisateur dans deux cas de réponses du sujet : (A) lorsque la réponse donnée est correcte (B) lorsque la réponse donnée est incorrecte.

6.1.4.3 Test d'écoute dans le bruit

Le test d'écoute peut ensuite débiter. Chaque condition sonore dure 15 minutes. Pour chaque condition sonore, le même cycle est répété. Le sujet est d'abord invité à effectuer la tâche de lecture, puis celle de raisonnement grammatical. À la fin de chaque condition sonore, un questionnaire est proposé visant une évaluation de gêne sonore. Si les différentes activités sont effectuées rapidement, le participant finit l'expérience dans une situation de repos. Ce questionnaire s'affiche à la suite de l'épreuve de RG comme illustré à la Figure 6.7.

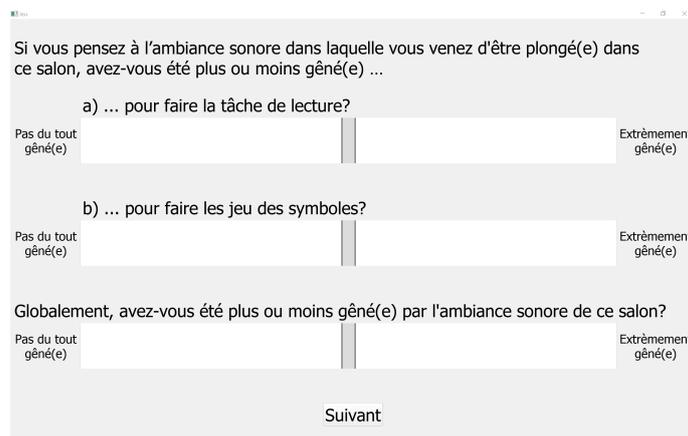


FIGURE 6.7 – Capture d'écran de l'interface utilisateur GUI du questionnaire d'évaluation subjective de la gêne sonore.

Les réponses aux trois questions subjectives de gêne sonore sont exprimées sous une forme quantitative grâce à l'utilisation d'une jauge continue et d'un curseur tactile. L'échelle sémantique de 101 points va de "Pas du tout gêné" à "Extrêmement gêné". Lorsque les trois réponses sont données et que le sujet appuie sur "Suivant", il est invité à se reposer pendant 2 à 5 minutes jusqu'à ce que l'étudiant le prévienne de commencer un nouveau cycle. Pendant cette période de transition, le changement de condition sonore est opéré. Une fois les 4 conditions sonores terminées avec les

évaluations subjectives données, trois questions sont finalement posées visant à évaluer la tâche de raisonnement grammatical. Les réponses sont aussi données en déplaçant le curseur sur l'échelle sémantique de 101 points comme présenté à la Figure 6.8.

The screenshot shows a questionnaire interface with three questions and their corresponding semantic scales:

- Question 1:** "Indépendamment du bruit qui a pu éventuellement vous déranger, avez-vous trouvé que le jeu des symboles était facile/simple ou difficile/complexe ?"
 - Left anchor: "Très facile, simple"
 - Right anchor: "Très difficile, complexe"
- Question 2:** "Pensez-vous avoir été performant(e) pour faire ce jeu ?"
 - Left anchor: "Pas du tout performant(e)"
 - Right anchor: "Extrêmement performant(e)"
- Question 3:** "Jusqu'à quel point vous êtes-vous senti pressé(e) par le temps pour faire le jeu des symboles ?"
 - Left anchor: "Pas du tout pressé(e)"
 - Right anchor: "Extrêmement pressé(e)"

At the bottom center, there is a button labeled "Suivant".

FIGURE 6.8 – Capture d'écran de l'interface utilisateur GUI du questionnaire d'évaluation de la tâche de RG.

Les conditions sonores sont présentées aux sujets dans un ordre spécifique. L'ordre de passage des séquences a été défini par un carré latin avec permutations. La procédure de test se termine après avoir répondu aux trois dernières questions.

6.2 Résultats

6.2.1 Méthodologie d'analyse

Deux types de données ont été recueillies, des évaluations de gêne subjective, ainsi que des mesures objectives de performance. L'analyse de ces données suivra une démarche identique quelle que soit la grandeur étudiée.

Trois grandeurs de gêne subjective sont enregistrées. Des mesures de gêne concernant l'activité de lecture, et concernant l'activité de raisonnement grammatical sont effectuées à la fin de chaque condition sonore en complément de la mesure globale de gêne sonore. Pour les mesures de performance, des données correspondant aux deux activités de lecture et de RG sont récoltées. Pendant l'activité de lecture, des grandeurs sont mesurées : la vitesse de lecture, les taux de bonnes réponses et temps de réponse aux questions de compréhension de texte, ainsi que les taux de bonnes réponses et temps de réponses à la tâche des mots cibles. Les résultats pour les mots cibles ne sont pas étudiés dans ce mémoire.

Pour chacune des grandeurs qu'elles soient de performance, ou de gêne, les distributions de valeurs sont d'abord observées afin d'évaluer la variabilité des données. Si les distributions sur l'ensemble de l'échantillon comportent une variabilité trop grande, ou qu'elles ne suivent pas la loi normale, une recherche de sous-groupe sera envisagée. Chaque sous groupe mettra en évidence un point de vue dans le cadre des grandeurs de gêne, ou un groupe de niveau dans le cadre des grandeurs de performance. Ces groupes seront constitués pour être cohérents, avec une variabilité intra-groupe suffisamment faible. Dans le cas où des groupes sont constitués, une comparaison avec les points de vues formés dans les chapitres précédents sera effectuée pour comprendre si la caractérisation antérieure des sujets permet d'expliquer les groupes formés dans ce dernier test.

Une fois les groupes formés, l'étape suivante débutera systématiquement par une évaluation de l'effet d'ordre. Deux approches sont envisagées pour l'évaluation de l'effet d'ordre sur l'échantillon complet ou pour chaque sous-groupe. Soit, les hypothèses de l'analyse de variance sont vérifiées et l'évaluation de l'effet d'ordre s'effectue en appliquant une ANOVA dans un plan simple, soit l'une des hypothèses de l'ANOVA est violée, et l'alternative non-paramétrique sera préférée. Dans le cas d'un plan simple, le test retenu pour l'analyse non-paramétrique est le test de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Si l'effet d'ordre est significatif, une analyse visant à évaluer les deux facteurs croisés Condition sonore et Ordre sera proposée. L'effet du facteur condition sonore seul sera évalué suivant le plan à mesures répétées. Si les conditions de l'ANOVA ne sont pas satisfaites, l'alternative non paramétrique sera préférée. Pour un plan à mesures répétées, ce test non paramétrique consiste en un test de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Les données d'entraînement ne sont pas conservées dans l'analyse.

6.2.2 Évaluation subjective de la gêne

6.2.2.1 Introduction

Comme présenté Section 6.1.4, 3 questions ont été posées aux sujets à la fin de chaque condition sonore. Les résultats des distributions de réponses sont présentés à la Figure 6.9. Ces distributions témoignent d'une variabilité importante inter-sujets visible avec la représentation en boîtes à

moustache. Les distributions suivent le même profil pour les trois questions posées avec des valeurs médianes et moyennes proches pour C1 et C2 et une baisse dans l'évaluation de gêne entre d'une part C1, C2, et d'autre part C3, C4 qui ont des valeurs moyennes et médianes de gêne sonore proches. Ensuite, les distributions pour les questions globales et portant sur le jeu de RG suivent le même profil et sont donc assez corrélées. En revanche, une diminution d'au moins 10 points dans l'évaluation de gêne située dans le jeu de RG comparée à celle dans l'activité de lecture est observée quelle que soit la condition sonore. La gêne sonore varie donc en fonction de la tâche effectuée avec des sujets en moyenne plus gênés par le son dans la tâche difficile que dans l'activité de lecture et ce quelle que soit la condition sonore.

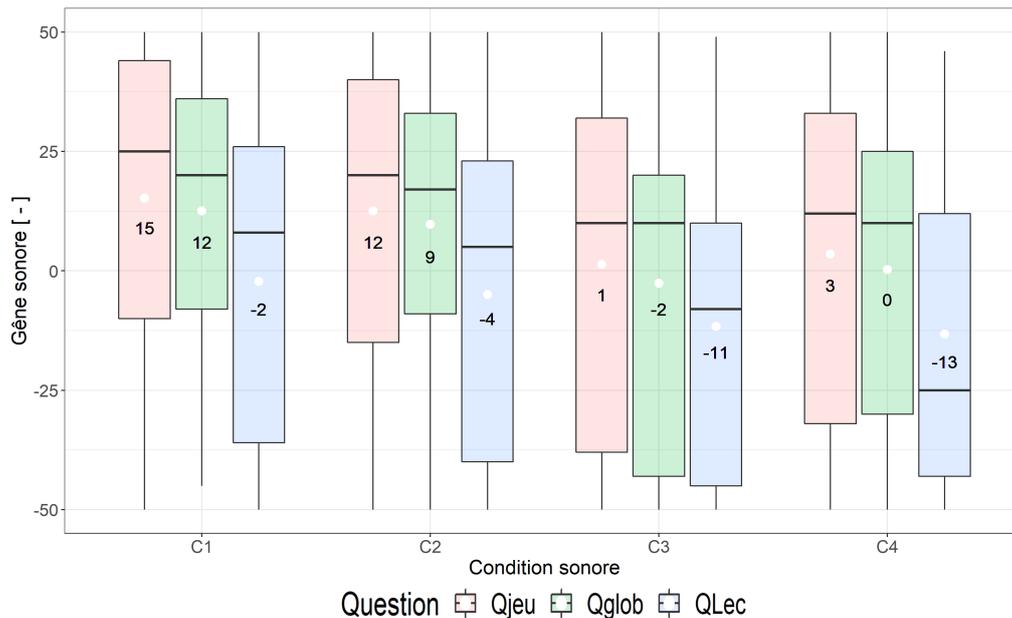
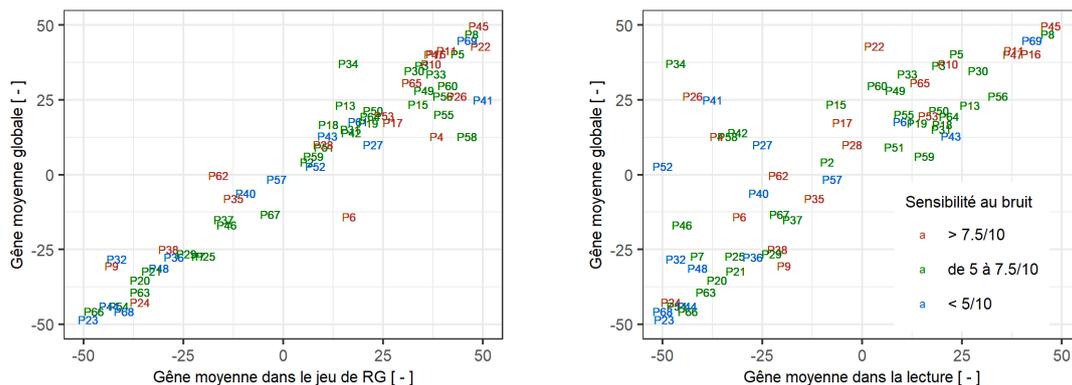


FIGURE 6.9 – Distributions des réponses subjectives de gêne en fonction des différentes conditions de bâti en fonction de la question posée (gêne dans la lecture, pendant le jeu des symboles, et au global. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. ○ blanc : Moyenne ; - : Médiane).

Cette variabilité peut cacher des points de vues typés. Une analyse des données est proposée pour faire émerger ces points de vue.

6.2.2.2 Émmergence de points de vue

Groupes de sujets La Figure 6.9 montrait une variabilité très importante dans les distributions de réponses. Cette variabilité peut s'expliquer par l'existence de points de vues typés. Pour rendre compte de ces similitudes inter-individus, l'évaluation de gêne par sujet moyennée sur l'ensemble des quatre conditions sonores est calculée pour chacune des trois questions (Q_{glob} , Q_{jeu} , Q_{lec}). La Figure 6.10 présente deux représentations 2D des évaluations de gênes moyennes sur les quatre conditions sonores. La première représentation à la Figure 6.10a présente les résultats par sujet de la gêne sonore dans le jeu de RG en fonction de l'évaluation globale, alors que la Figure 6.10b présente les résultats par sujet de la gêne sonore dans la lecture en fonction de l'évaluation globale. Le résultat de chaque participant est représenté par un label "P" suivi de son identifiant pour garantir l'anonymat des sujets.



(A) Dans le jeu de RG en fonction de l'évaluation globale.

(B) Dans la lecture en fonction de l'évaluation globale.

FIGURE 6.10 – Graphique des évaluations moyennes de gène sonore par participant sur l'ensemble des quatre conditions sonores (A) : Gène dans le jeu de RG en fonction de la gène globale; (B) : Gène dans la lecture en fonction de la gène globale.

La Figure 6.10a rend compte d'une forte corrélation entre les deux variables. Le coefficient de corrélation calculé avec la méthode de Pearson est de 0.95 avec une valeur de $p < 2.2e-16$. À quelques exceptions près (P34, P6), la gène moyenne ressentie en global est proche de celle dans l'activité de raisonnement grammatical. Par la lecture de la figure 6.10a, trois groupes sont formés en fonction de leur note moyenne à la question sur la gène sonore globale notée NG_{glob} :

1. $-50 < NG_{glob} < -20$: Sujets pas du tout gênés par les ambiances sonores ;
2. $-20 < NG_{glob} < 20$: Sujets à moyenne plutôt neutre ;
3. $NG_{glob} > 20$: Sujets gênés par les ambiances sonores.

La Figure 6.10b rend compte d'un groupe qui s'estime gêné au global mais pas gêné par les ambiances sonores lorsqu'il est dans l'activité de lecture (P4, P26, P27, P34, P52, P41, P42, et P58). Cela induit une diminution du coefficient de corrélation de Pearson (0.77 ; p -value $< 2.2e-16$) en comparaison avec les résultats présentés à la Figure 6.10a. À l'exception de ce groupe de sujets, la plupart des participants ont des résultats proches sur les deux variables. Il suit la création d'un quatrième groupe qui scinde le groupe initial des gênés ($NG_{glob} > 20$) en deux sous-groupes :

1. $NG_{glob} > 20 \cap NG_{lec} > 0$: Sujets gênés dans les deux activités et au global
2. $NG_{glob} > 20 \cap NG_{lec} < 0$: Sujets gênés au global et dans le jeu de RG mais pas dans la lecture.

Pour ces quatre groupes formés, une présentation des distributions de réponses pour chacun de ces sous-groupes en fonction des conditions sonores est proposée à la Figure 6.11. La création de ces clusters a pour but de réduire la variabilité intra-groupe et d'obtenir des points de vues typés homogènes. La variabilité des distributions pour les groupes 1, 3, et 4 est effectivement significativement réduite. Le groupe 1 se caractérise par des sujets très peu gênés par les nuisances sonores quelque soit la condition, le groupe 3 à l'inverse est un groupe s'estimant gêné par le son quelle que soit la condition sonore et quelle que soit l'activité réalisée, enfin le groupe 4 se différencie du groupe 3 uniquement dans l'évaluation de la gène dans la tâche de lecture. Pour ce groupe, les différentes ambiances sonores n'ont pas été gênantes pour effectuer l'activité de lecture, alors qu'au global et dans l'activité de RG, ça l'a été.

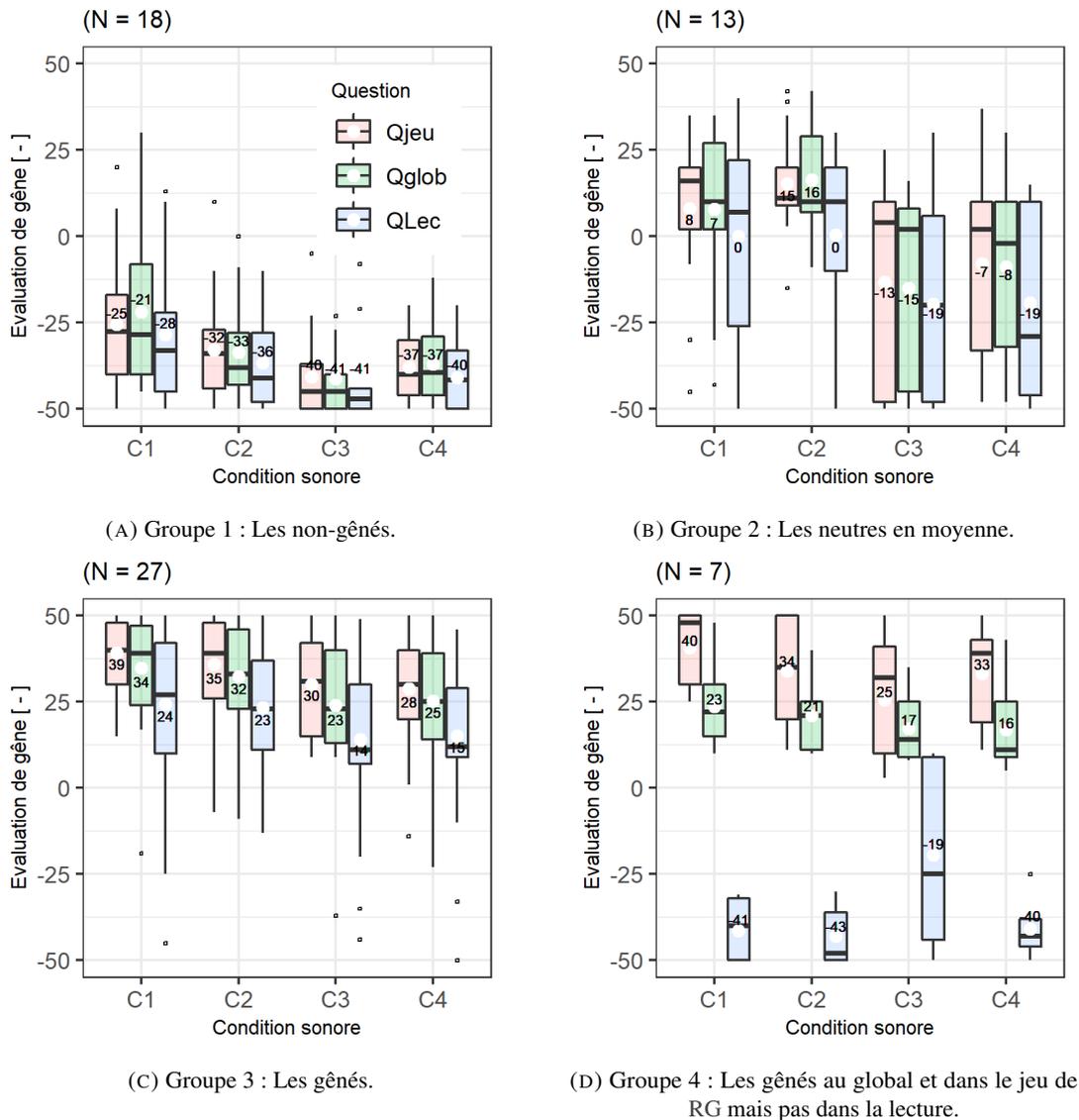


FIGURE 6.11 – Distributions des réponses de gènes par sous-groupes en fonction des quatre conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles, des médianes (–) et moyennes (○ blanc).

L'analyse des distributions de réponses du groupe 2 présentées à la Figure 6.11b rend compte d'une variabilité toujours importante, notamment pour les réponses de gènes aux conditions sonores C3, et C4. Dans ce groupe, une partie des sujets (P35, P40, P67, etc.) a fortement contrasté ses évaluations entre C1, C2 d'une part et C3, C4 d'autre part (voir Figure 6.12). En contraste avec ce résultat, d'autres participants de ce même groupe ont un avis neutre sur les 4 conditions sonores (Voir Participants P28, P51, P59, etc. Figure 6.12) ce qui a causé cette augmentation de variance intra-groupe. Ce groupe est donc mal constitué parce qu'il n'est pas suffisamment homogène.

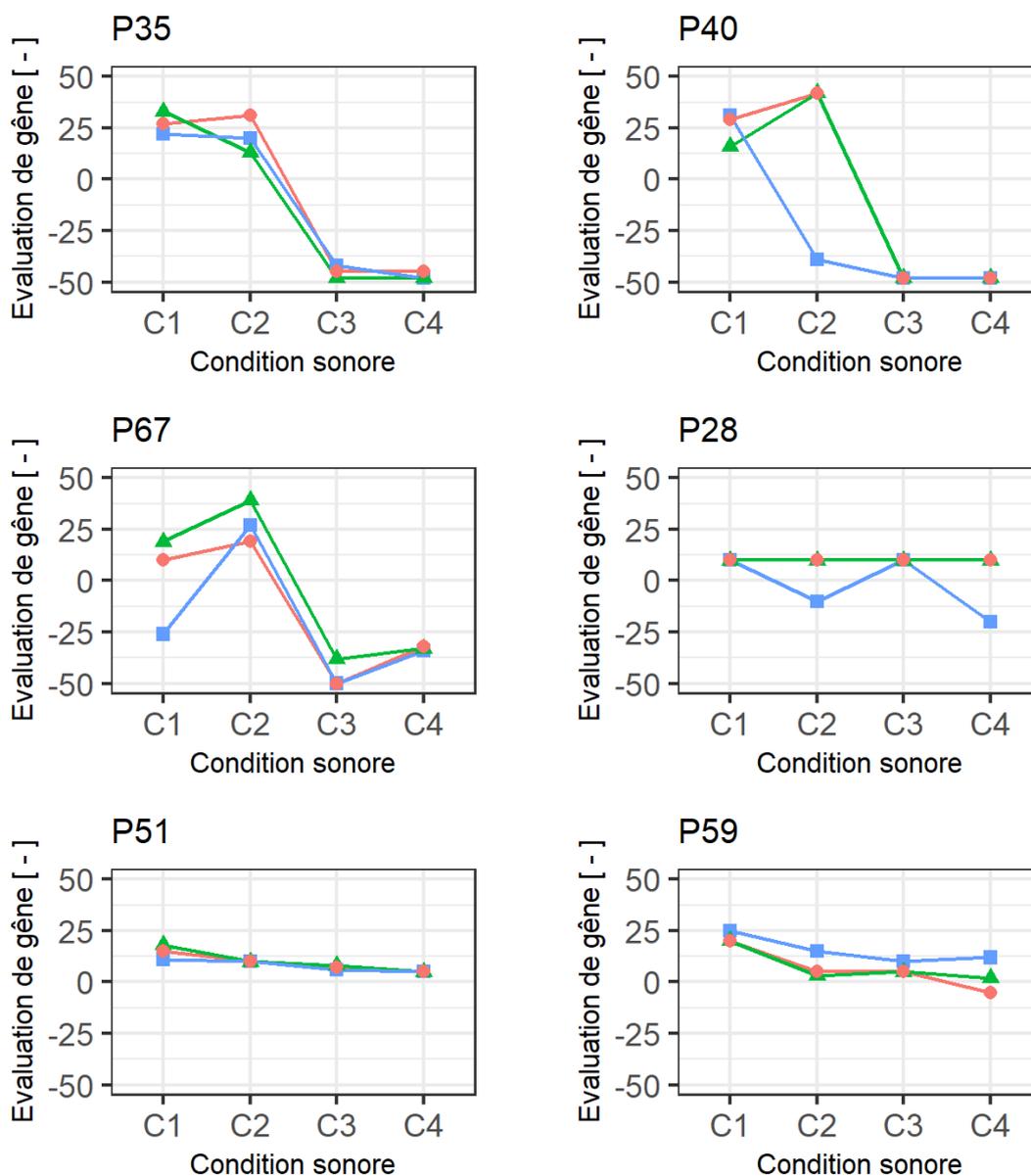


FIGURE 6.12 – Détails des réponses individuelles de gène pour certains sujets du groupe 2 en fonction de la condition sonore.

Le dernier groupe 4 est cohérent mais ne contient qu'un trop faible nombre d'individus (N=7). Ces groupes 2, et 4 n'étant pas suffisamment représentatifs, deux options sont alors envisagées. La première se traduirait par une exclusion de tous les sujets de ces groupes 2 et 4 ce qui correspond à 30% du panel puisque les groupes en question sont mal constitués. 30% correspond à une part trop importante du panel ce qui nous imputerait de trop d'informations qualitatives. La seconde option retenue consiste à intégrer les deux groupes 2 et 4 au sein des groupes 1, et 3. La logique d'intégration des sujets concernés est détaillée au prochain paragraphe.

Vers une réduction du nombre de groupes Puisque ce groupe 2 n'est pas homogène et par choix de simplification des résultats, il est absorbé dans les groupes 1, et 3. La dilution des sujets de ce groupe s'effectue en cohérence avec les résultats obtenus au premier test d'écoute en supposant que les participants les moins tolérants au premier test (Tableaux 4.6, et 4.12) devraient être plus

gênés que les autres. Tous les participants de ce groupe 2 qui ont été plus critiques dans l'évaluation de la plupart des sources sonores au premier test sont absorbés dans le groupe 3 des gênés et ceux qui, lors du premier passage, ont évalué plus agréable la plupart des sources entendues au premier test sont absorbés dans le groupe des non-gênés du test 3. Toujours pour simplifier l'analyse, tous les sujets du groupe 4 intègrent le groupe 3 des gênés même s'ils ont un point de vue différent à l'égard de l'évaluation de gêne dans la lecture. Les distributions de réponses de gêne de ces deux nouveaux groupes constitués sont présentées à la Figure 6.13.

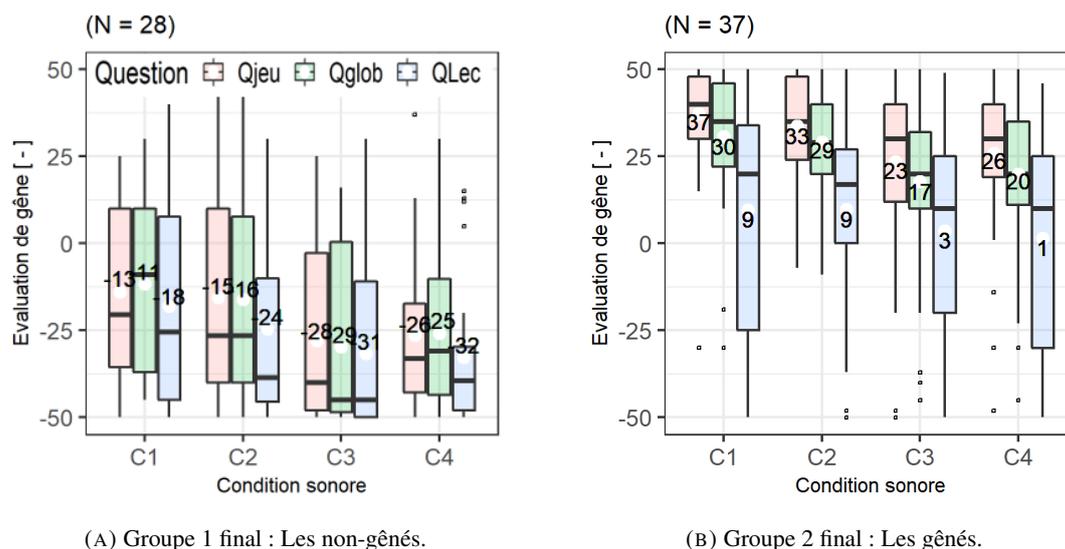


FIGURE 6.13 – Distributions des réponses de gêne par sous groupe final en fonction des quatre conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles, des médianes (traits noirs) et moyennes (cercles blancs).

La suite de l'analyse vise à comprendre ce qui caractérise ces groupes. Est-ce que les études préliminaires permettent d'expliquer la constitution de ces deux groupes de gêne ? La compréhension de ces groupes par comparaison avec ceux formés aux précédents tests est l'objet du paragraphe suivant.

Comparaison avec les groupes formés aux premier et second test

Groupes d'âge et de sensibilité Pour le recrutement, les sujets ont été sélectionnés en fonction d'un critère d'âge croisé avec un critère de sensibilité au bruit. Le Tableau 1.1 Section 1.3.2, et page 7 rappelle la constitution de ces quatre groupes. En comparant ces groupes initiaux avec ceux formés au test 3, aucune différence significative n'est mise en évidence. Pour effectuer cette évaluation, des tests de χ^2 ont été calculés à partir des tableaux de contingences obtenus en prenant les paires de distributions catégorielles associées aux catégories d'âge, de niveau de sensibilité, et de groupes de gêne issus du test 3. La valeur de p obtenue est toujours supérieure au seuil de 10%. Les groupes de sensibilité et d'âge initialement construits ne caractérisent donc pas bien nos groupes de gênes formés au troisième test.

Puisque les données d'âge et de sensibilité sont également connues sous la forme d'une variable quantitative, un test de Student pour chaque paire de distributions est envisagé. Il ressort du test que pour la variable de sensibilité, les sujets appartenant au groupe des gênés au test 3 sont en moyenne significativement plus sensibles que ceux du groupe des non gênés. Les résultats de ce test sont

présentés au Tableau 6.3. Au préalable, la normalité des deux distributions a été testé par un test de Shapiro-Wilk dont les résultats sont présentés au Tableau 6.2.

	W	Valeur de p
Gpe des Gênés	0.966	0.323
Gpe des Non-gênés	0.944	0.1401

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.2 – Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de sensibilité au bruit en fonction des groupes formés au test 3.

Valeur test t	DDL	Valeur de p
2.600	47.916	0.0124 *

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.3 – Test de Student : Comparaison des distributions de sensibilité pour les deux groupes finaux formés au test 3.

Pour rendre compte de ces différences, les distributions de sensibilité au bruit sont présentées à la Figure 6.14. Sur cette figure, on observe que la différence majeure entre les deux groupes est la présence ou l'absence de sujets à faible valeur de sensibilité. Le groupe des non gènes comporte plus de sujets ayant une note de gêne inférieure 5 que le groupe des gènes. En conséquence, les valeurs moyennes de sensibilité de ces deux groupes sont significativement différentes ($s_{genes} = 6.8$ Vs $s_{non_genes} = 5.8$) soit une différence moyenne d'une unité.

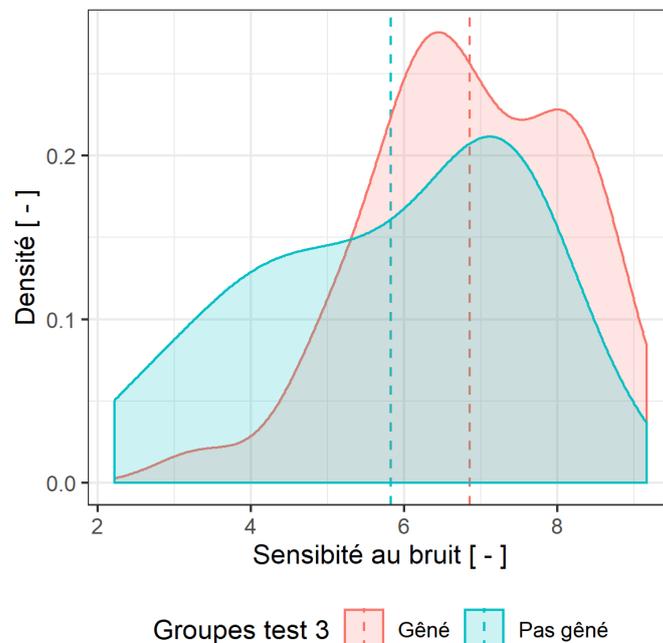


FIGURE 6.14 – Distributions de sensibilité au bruit des participants en fonction de leur appartenance aux groupes formés au test 3. Les valeurs moyennes de chaque distribution sont représentées par une ligne pointillée.

NGp.1 : Les non-gênés	NGp.2 Les gênés
P7, P9, P18, P20, P21, P23, P24, P25, P28, P29, P32, P36, P38, P40, P43, P44, P46, P48, P51, P52, P54, P57, P59, P62, P63, P66, P67, P68	P2, P3, P4, P5, P6, P8, P10, P11, P13, P15, P16, P17, P19, P22, P26, P27, P30, P31, P33, P34, P35, P37, P41, P42, P45, P47, P49, P50, P53, P55, P56, P58, P60, P61, P64, P65, P69

TABLEAU 6.4 – Répartition des sujets dans les deux points de vues finaux définis en fonction de leurs résultats aux questions subjectives de gêne. Les participants ayant changé de groupe entre les deux tests (tests 1, et 3) sont indiqués en rouge.

Une étude analogue est effectuée sur la variable quantitative d'âge. Le test de Student montre que l'hypothèse \mathcal{H}_0 selon laquelle les moyennes sont égales est acceptée car la valeur de p est égale à 0.52. Il n'y a pas de lien entre la variable d'âge et les groupes formés à ce troisième test.

Groupes du premier test Lors du premier test d'écoute présenté Chapitre 4, 2 groupes avaient été formés suite à l'analyse d'une CAH effectuée sur le jeu de données des réponses d'agrément pour chaque source sonore typique évaluée au studio d'écoute de la MIR. Les résultats sont présentés aux Figures 4.11, 4.12 et sur le Tableau 4.6, Section 4.4.3. Pour rappel, les participants du groupe 1 au test 1 sont plus sensibles au bruit, moins satisfaits à l'égard du confort acoustique dans leur domicile, et perçoivent les sons intrusifs liés aux activités humaines du voisin plus déplaisants (enfants qui jouent, pas dans la cage d'escaliers, diner, film etc.). Les participants du groupe 2 au test 1 sont quant à eux moins sensibles au bruit, davantage satisfaits à l'égard du confort acoustique dans leur domicile, et perçoivent les sons intrusifs liés aux activités humaines du voisin plus plaisants. À titre indicatif, la répartition des sujets en fonction des deux groupes finaux constitués au dernier test 3 en fonction de leurs réponses aux questions de gêne (Figure 6.13) est fournie dans le Tableau 6.4. De façon analogue au dernier chapitre, les sujets ayant changé de groupe sont indiqués en rouge dans le Tableau 6.4. L'hypothèse est que les sujets du groupe des moins tolérants aux diverses sources intrusives au test 1 devraient se retrouver dans le groupe des gênés au test 3 (et inversement pour les sujets du groupe des moins tolérants).

Nb. Sujets	Gp. Non-gênés Test 3	Gp. Gênés Test 3
Gp. tol- Test 1	6	26 soit 70%
Gp. tol+ Test 1	22 soit 79%	11

TABLEAU 6.5 – Répartition du nombre de sujets par sous-groupe formés au test 1 croisés avec ceux formés au test 3.

Le groupe final des non-gênés du test 3 est constitué à 79% par des individus du groupe 2 des tolérants formé au test 1. 79% des individus critiques dans les évaluations d'agrément au premier test se retrouvent dans le groupe le plus gêné par toutes situations sonores du test 3. À l'inverse, le groupe final des gênés au test 3 est constitué à 70% par des individus du groupe 1 des moins tolérants au test 1. Les groupes formés aux deux tests ne sont pas exactement les mêmes mais une tendance se dessine qui vient confirmer les différences de points de vue mises en évidence au premier passage. Il est bien évident que la règle de dilution utilisée pour répartir les sujets du groupe 2 au test 3 (voir Section 6.2.2.2, page 119) renforce ce constat.

Une seconde façon de regrouper les sujets a été proposée au Chapitre 3 déterminée par les goûts des sujets à l'égard de la musique commerciale. Retrouve-t-on une cohérence entre ces groupes formés ? Il n'y a pas de raison a priori de trouver des similitudes mais l'analyse suivante présentée au Tableau 6.6 le déterminera.

Nb. Sujets	Gp. Non-gênés Test 3	Gp. Gênés Test 3
Gp. Goûts 1 Test 1	17 soit 61%	16
Gp. Goûts 2 Test 1	11	21 soit 57%

TABLEAU 6.6 – Répartition du nombre de sujets par sous-groupe de préférence musicale formé au test 1 croisé avec chacun de ceux formés au test 3.

Le test de χ^2 est effectué sur le tableau de contingence 6.6 et prouve que ces deux répartitions sont indépendantes (Tableau 6.7). Il n'y donc pas de lien entre ces deux répartitions de sujets.

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
1.31	1	0.2524

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.7 – Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part, les groupes formés au premier test d'écoute référent aux préférences musicales et d'autre part, les groupes formés au troisième test d'écoute en fonction de leurs évaluations de gêne sonore.

Groupes du second test Lors du second test d'écoute, deux stratégies principales de mixages avaient été mises en évidence lorsque le stimulus de musique Pop. était impliqué dans la composition. Deux groupes de sujets ont alors été révélés. Ces groupes sont d'ailleurs assez proches de ceux révélés au premier test d'écoute. La même analyse qu'au paragraphe précédent est tout de même proposée. Le test d'indépendance de χ^2 rend compte de l'absence de lien entre ces deux répartitions de groupes (Tableau 6.8).

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
1.095	1	0.2953

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.8 – Test de χ^2 : Comparaison de deux répartitions de sujets entre d'une part les groupes formés au second test d'écoute lors du mixage de la source de musique Pop. et d'autre part les groupes formés au troisième test d'écoute.

Ces groupes formés aux troisième test ne s'explique pas par la façon dont a été mixée la musique Pop. au second test.

Enfin, des préférences sur le choix de la source masquante les sons intrusifs du voisin avait fait émerger deux stratégies, avec un groupe utilisant la ventilation pour masquer le voisin, et l'autre préférant utiliser les sources de façade. Cette répartition de sujets au test 2 est, elle aussi, indépendante de la répartition obtenue au dernier test d'écoute ($\chi^2 - value = 1.0078$, $p - value = 0.3154$). Finalement, des groupes formés au second test, aucun lien avec les points de vue typés du troisième et dernier test n'a été mis en évidence. Ce résultat était attendu. Le second test avait conduit à mettre en évidence des goûts en matière de sources masquantes, et de préférences musicales. Le

choix des sources pour le dernier test s'est fait pour limiter le risque que ces préférences viennent interférer dans la mesure. Pour cette raison, les sources de ventilation et de musique Pop. n'ont pas été retenues au troisième test. Puisqu'elles n'interviennent plus, ces préférences ne devraient pas s'exprimer au dernier test. Il n'y a donc pas de raison à ce que des liens soient trouvés entre les deux répartitions de sujets.

Finalement, une meilleure compréhension des groupes formés au dernier test a été obtenue par comparaison avec les groupes formés aux précédents tests. Cette comparaison a confirmé les résultats relatifs à l'influence de la sensibilité sur la gêne perçue. Par la suite, une étude des effets d'ordre et des conditions sonores sur l'échantillon global et pour chaque sous-groupe est proposée en accord avec la méthodologie présentée à la Section 6.2.1 page 115.

6.2.2.3 Effet d'ordre

Échantillon global En prenant l'échantillon total de tous les individus, il est évident que les hypothèses de normalité des distributions ne seront pas satisfaites et qu'en conséquence aucune analyse paramétrique ne sera effectuée tant les points de vue finaux sont polarisés. L'analyse non paramétrique est donc préférée et montre l'absence d'effet du facteur d'ordre sur les distributions de réponses de gêne quelle que soit la question posée (Q_{glob} , Q_{jeu} , Q_{lec}) comme illustré au Tableau 6.9.

Question	χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	0.288	3	0.962
Q_{jeu}	1.07	3	0.784
Q_{lec}	0.475	3	0.924

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.9 – Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gêne subjective
Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

L'effet d'ordre est peut-être masqué par l'effet des points de vue typés très contrastés. Une analyse de l'effet d'ordre va donc être effectuée dans chaque sous distribution de participants en fonction de leur appartenance à l'un des deux groupes de gêne afin d'évaluer s'il devient alors significatif.

Sous groupe des gênés Bien que ce groupe ait été formé pour réduire la variabilité intra-cluster, et ainsi se rapprocher d'une distribution normale, le test de Shapiro-Wilk donne pour chaque sous-distribution une valeur de p inférieure au seuil des 5% indiquant l'absence de normalité des distributions. En conséquence, l'alternative non paramétrique de Kruskal Wallis est choisie pour mesurer l'effet d'ordre. Les résultats sont présentés au Tableau 6.10.

L'effet d'ordre est à nouveau absent, il n'influe pas sur les distributions de réponses des sujets du groupe des gênés.

Sous groupe des non-gênés De la même manière que pour le sous-groupe de gênés, l'approche non paramétrique est la seule applicable en raison de la non-normalité des distributions. Les résultats du test non-paramétrique de Kruskal-Wallis sont présentés dans le Tableau 6.11. Dans tous les cas de figures, l'effet d'ordre n'influe pas significativement sur les réponses de gêne des sujets. Pour la suite, en application directe avec la méthodologie introduite Section 6.2.1, l'effet des conditions sonores sur les distributions de réponses suit l'analyse de l'effet d'ordre.

Question	χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	2.00	3	0.572
Q_{jeu}	0.576	3	0.902
Q_{lec}	0.634	3	0.888

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.10 – Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gène subjective pour le sous-groupe des gènes du test 3. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Question	χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	3.78	3	0.286
Q_{jeu}	4.12	3	0.249
Q_{lec}	1.41	3	0.704

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.11 – Évaluation de l'effet d'ordre sur les évaluations de gène subjective pour le sous-groupe des non-gènes du test 3. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

6.2.2.4 Effet des conditions sonores

Dans un premier temps, l'échantillon global des participants est conservé et l'analyse des conditions sonores s'effectue sur l'ensemble des données.

Échantillon global Pour évaluer si les valeurs moyennes des distributions de gène sont significativement différentes, l'option d'une analyse statistique paramétrique telle que l'ANOVA est envisagée. L'une des hypothèses d'un modèle d'analyse de variance repose sur le critère de normalité des résidus. Le test de Shapiro-Wilk (ROYSTON 1982) effectué sous \mathcal{R} donne comme résultat un rejet de l'hypothèse \mathcal{H}_0 pour les 3 distributions de réponses aux questions de gène subjective avec des valeurs de p de $9e-11$, $5e-12$, et de $6e-11$ respectivement pour les questions globale, sur le jeu de RG, et sur la lecture. La non-normalité des résidus empêche l'utilisation de modèles linéaires paramétriques.

Une alternative non-paramétrique est donc proposée, le test de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6.12. Pour les trois questions posées, le facteur condition sonore influe significativement sur les distributions des réponses.

Question	Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	48.72		1.50e-10 ***
Q_{jeu}	41.34	3	5.53e-09 ***
Q_{lec}	29.29		1.94e-06 ***

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.12 – Questions de gène sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gène perçue.

Par analogie à l'approche paramétrique utilisant le test de Tukey ou une comparaison par paires de modalités, l'alternative non-paramétrique du test de NEMENYI (1963) est proposée. Les résultats

des valeurs de p sont indiqués Tableau 6.13. Ce test confirme l'analyse graphique présentée en introduction de la Section 6.2.2.1, page 115. Aucune différence significative d'évaluation subjective de gêne n'est observée entre C1 et C2, et entre C3 et C4 ($p\text{-value} \gg 0.05$) et ce quelle que soit la question de gêne. L'amélioration du vitrage par un remplacement du verre simple 4 mm par un double vitrage 4-16-10 mm n'a pas permis de réduire significativement la gêne perçue pendant les tâches de lecture et de RG et ce, malgré une diminution du niveau sonore équivalent de 4 dB(A). Une interprétation de ce résultat est proposée. L'amélioration du vitrage réduit fortement l'effet masquant du trafic routier. La source sonore chez le voisin adjacent devient plus prégnante ce qui réduit l'effet sur la gêne de la baisse de niveau sonore. Enfin, puisqu'aucune différence significative de gêne n'est mesurée entre C3, et C4, cela indique que l'amélioration significative des performances du doublage voisin (de 10 à 15 dB entre 20 et 100 Hz) n'a pas permis de modifier l'évaluation de gêne des sujets. En revanche, la gêne baisse lorsqu'en plus du changement de vitrage, une amélioration du séparatif voisin est effectuée avec l'ajout d'un doublage standard ou d'un doublage dit de "Recherche". D'après ces résultats, la gêne baisse à condition que la rénovation intègre à la fois l'isolation de façade et l'isolation entre locaux voisins.

	Q_{glob}			Q_{jeu}		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
C2	0.57	-	-	0.50	-	-
C3	2.7e-07	1.7e-04	-	8.4e-07	6.2e-04	-
C4	5.0e-06	0.0016	0.95	4.3e-05	0.011	0.86
	Q_{tec}					
C2	0.63	-	-			
C3	9.4e-05	0.0096	-			
C4	3.6e-04	0.0248	0.99			

Ajustement de la valeur de p : Aucune

TABLEAU 6.13 – Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gêne : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.

Puisque des points de vues typés ont été mis en évidence, la suite de l'analyse consiste à évaluer si le profil de gêne des sous-groupes formés suit les mêmes conclusions que celles obtenues avec l'échantillon complet. Comme pour l'analyse sur l'échantillon global, une analyse de variance à mesures répétées et à un facteur est envisagée. Un modèle est construit par question posée (lecture, jeu de RG, et au global). Chacune de ces variables d'auto-évaluation de la gêne sonore ressentie est considérée comme la variable quantitative dépendante à expliquer. La variable indépendante (ou facteur) choisie pour cette analyse est la variable qualitative des conditions sonores. Cette variable décrit à chaque observation de gêne, pour quelle condition sonore l'évaluation a été faite. Les résultats de l'ANOVA indiquent si ce facteur influe sur les distributions de réponses de gêne. Tous les sujets sont indépendants, et ils ont tous évalué chacune des conditions sonores ce qui justifie le choix du plan à mesures répétées. Afin d'évaluer la validité du modèle linéaire pour analyser les données, plusieurs hypothèses doivent être vérifiées pour chaque sous-groupe :

- Sphéricité des données ;
- Normalité des sous-populations ;
- Indépendance des échantillons.

La sphéricité est évaluée avec le test de Mauchly qui définit \mathcal{H}_0 comme l'hypothèse nulle que les variances sont égales. Si la valeur de p est supérieure à un seuil critique choisis à 5%, alors l'hypothèse \mathcal{H}_0 ne peut être rejetée et le critère de sphéricité est satisfait. Ce test a été effectué

pour les données des deux groupes finaux et en prenant en variables dépendantes les réponses aux trois questions. Dans tous les cas testés, seul un modèle sur les six donne une valeur de $p > 0.05$. L'homogénéité des variances n'est en général pas satisfaite. La normalité des distributions est également évaluée par le test de Shapiro-Wilk et n'est jamais satisfaite. L'alternative non-paramétrique du test de Friedmann est donc préférée pour chacun des deux groupes.

Groupe 1 : Point de vue des tolérants non gênés

Résumé :

- 43% de l'échantillon ;
- Groupe plutôt non gêné par les conditions sonores ;
- Gêne sonore par paire de conditions sonore :
 - Q_{glob} : C1 plus gênante que C3 et C4, mais aussi gênante que C2 ; C3 aussi gênante que C4 soit : $\{C1|(C2)\} > \{C4\}|C3\}$;
 - Q_{jeu} : $\{C1|C2|(C4)\} > C3\}$;
 - Q_{lec} : Différences significatives entre C1 et C3, et entre C1 et C4 avec C1 à la fois plus gênante que C3 et C4.

Question	Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	16.3		0.001 **
Q_{jeu}	12.9	3	0.005 *
Q_{lec}	13.32		0.004 *

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.14 – Gêne sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gêne perçue pour le sous-groupe 1 des tolérants non-gênés.

	Q_{glob}			Q_{jeu}		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
C2	0.882	-	-	1.00	-	-
C3	0.00340	0.0362	-	0.0230	0.0200	-
C4	0.0826	0.359	0.718	0.359	0.331	0.619
	Q_{lec}					
C2	0.452	-	-			
C3	0.0100	0.359	-			
C4	0.0480	0.685	0.953			

Ajustement de la valeur de p : Aucune

TABLEAU 6.15 – Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gêne pour le sous-groupe 1 des tolérants non gênés : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.

Détails : Comme visible sur la Figure 6.13a, les 28 sujets de ce groupe ne sont en moyenne gênés par aucune des 4 conditions sonores quelle que soit la question de gêne posée. L'effet des conditions sonores sur la gêne ressentie est confirmé par le test de Friedmann comme présenté Tableau 6.14. Une analyse de Nemenyi post-hoc est ensuite effectuée pour mesurer quelles paires de conditions sonores ont été évaluées significativement différentes. Les résultats sont présentés Tableau 6.15 pour chacune des trois questions de gêne posées. Le Tableau 6.15 justifie les résultats affichés dans le résumé pour chacune des questions de gêne.

Groupe 2 : Point de vue des gènes

Résumé :

- 57% de l'échantillon ;
- Groupe gêné par toutes les conditions sonores ;
- Gène sonore par paire de conditions sonore en fonction de la question posée :
 - $Q_{glob} : \{C1|C2\} > \{C3|C4\}$;
 - $Q_{jeu} : \{C1|(C2) > \{C4\}|C3\}$;
 - $Q_{lec} : \{C1|C2\} > \{C3|C4\}$.

Question	Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
Q_{glob}	31.8		5.85e-7 ***
Q_{jeu}	29.5	3	1.72e-6 ***
Q_{lec}	15.6	3	1.34e-3 **

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.16 – Gène sonore - Résultats des tests non paramétriques de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores sur la gêne perçue pour le sous-groupe 2 final des gènes.

	Q_{glob}			Q_{jeu}		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
C2	0.755	-	-	0.273	-	-
C3	2.00e-4	8.82e-3	-	7.40e-5	0.0500	-
C4	1.40e-4	6.53e-3	1.00	1.10e-4	0.0637	1.00
	Q_{lec}					
C2	0.996	-	-			
C3	0.0210	0.0390	-			
C4	0.0240	0.0450	1.00			

Ajustement de la valeur de p : Aucune

TABLEAU 6.17 – Influence des modalités du facteur "condition sonore" sur les réponses de gêne pour le sous-groupe 2 des gènes : Comparaisons par paires de moyennes de sommes rangées selon le test statistique de NEMENYI (1963). Seules les valeurs de p sont indiquées.

Détails : Comme visible à la Figure 6.13b, les 37 sujets de ce groupe sont en moyenne gênés par les 4 conditions sonores pour effectuer le jeu de RG et au global. L'effet des conditions sonores sur la gêne ressentie est confirmé par le test de Friedmann comme présenté Tableau 6.16. Une analyse de Nemenyi post-hoc est effectuée à nouveau pour mesurer quelles paires de conditions sonores ont été évaluées significativement différentes. Les résultats sont présentés Tableau 6.17 pour chacune des trois questions de gêne posées. Le Tableau 6.17 justifie les résultats affichés dans le résumé pour chacune des questions de gêne.

Conclusion sur les deux points de vues finaux

Deux points de vues s'opposent. Un groupe est en moyenne constamment gêné, et l'autre au contraire ne s'estime pas gêné. Le groupe des gênés est majoritaire et a été capable de différencier en termes de gêne les conditions C1, C2 d'une part et C3, C4 d'autre part. On retrouve ici les mêmes tendances de résultats obtenus sur l'échantillon pris dans son ensemble. Pour le groupe constitué de participants en moyenne non-gênés, les mêmes tendances d'ordre dans les niveaux de gêne sont obtenus au global bien que les différences entre conditions soient plus faibles. De plus, pour ce second groupe, C2 et C4 ne sont plus significativement différentes en terme de gêne.

6.2.3 Mesures de performances

6.2.3.1 La lecture

Introduction Pendant la tâche de lecture, plusieurs types de données sont recueillies :

- Les temps de lecture par ligne de texte ;
- Les temps de réponses et taux de bonnes réponses aux questions de compréhension de texte ;
- Les temps de réponses et taux de bonnes réponses aux propositions de mots cibles (non traité dans ce mémoire, voir Section 6.1.3.1 page 111 pour la justification).

Des textes simples décrits Section 6.1.3.1 ont été lus pendant environ 5 minutes dans chacune des conditions sonores.

Deux hypothèses sont formulées : Le stimulus sonore induit une perte d'attention du sujet dans la tâche de lecture provoquant une baisse de performance caractérisée par une augmentation du temps de lecture moyen. En supposant que la perte d'attention liée à la surcharge cognitive est corrélée à la gêne ressentie, cet indicateur de performance objectif peut alors être lié à une sensation de gêne sonore. Le second jeu de données mesuré concerne les questions de compréhension des textes. Suivant la même hypothèse, la charge cognitive induite par le stimulus sonore pourrait engendrer une diminution du taux de bonnes réponses ou un ralentissement de la vitesse de réponse.

En complément, ces mesures de performances rendent compte des sujets qui ont bien compris les consignes et ceux qui n'ont pas su bien répondre. Pour les identifier, un taux de bonnes réponses moyen est calculé pour chaque condition sonore. Il ressort que pour 4 individus, la consigne n'a pas bien été respectée puisque leurs taux de bonnes réponses pour la compréhension des textes se rapprochent de 50 % (Voir Figure 6.15). Sur cette figure 6.15, la condition C0 correspond à la condition d'entraînement dans le silence. Les résultats de ces 4 sujets sont exclus car ils sont susceptibles de brouter les données.

En application directe de la méthodologie présentée Section 6.2.1, page 115, l'effet d'ordre est évalué. Pour la suite de l'analyse et par choix de simplification du jeu de données, un calcul de moyenne des temps de lecture par ligne de texte est au préalable effectué pour obtenir une valeur moyenne par texte lu, et par sujet. 16 valeurs de temps de lecture moyen par ligne sont obtenues pour chaque sujet et dans chacune des conditions sonores.

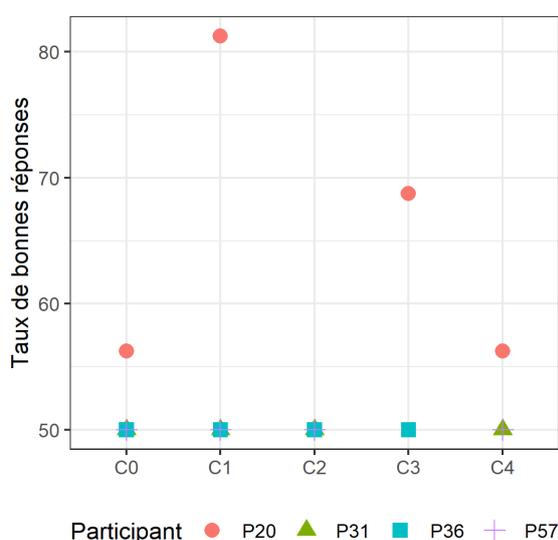


FIGURE 6.15 – Taux de bonnes réponses moyens aux questions de compréhension des textes pour les quatre sujets n'ayant pas un score satisfaisant.

Temps de lecture

Effet d'ordre Pour évaluer l'effet d'ordre, l'approche paramétrique est envisagée mais l'hypothèse de normalité des résidus n'est pas satisfaite comme en témoigne la distribution présentée à la Figure 6.16.

L'alternative non-paramétrique est donc préférée. Les résultats du test de Kruskal-Wallis sont présentés au Tableau 6.18. Les résultats sont sans équivoque. L'hypothèse \mathcal{H}_0 supposant une égalité des médianes est rejetée (p -valeur $< 2.2e-16$). Un test post-hoc de comparaison par paires selon la méthode non-paramétrique de Wilcoxon (BAUER 1972) est effectuée et les résultats sont présentés au Tableau 6.19. Ces comparaisons par paires indiquent que pour 4 des 5 paires de distributions les médianes sont significativement différentes. Une tendance de différence est mesurée entre les temps de lecture aux ordres 3 et 4. Alors que l'hypothèse formulée Section 6.1.3.1 page 111, suppose une absence d'effet d'apprentissage en raison de la facilité de l'activité, les résultats indiquent que cet effet d'ordre est significatif. Pour expliquer cet effet, une hypothèse est formulée. Les participants ont progressivement pris en main l'interface et ont ainsi augmenté leur vitesse de lecture. Cette augmentation de la vitesse de lecture est illustrée à la Figure 6.17. Les distributions sont semblables et leurs valeurs moyennes décroissent de moins de 100 ms entre paires d'ordres successifs. L'effet de répétition est significatif mais les différences sont très fines.

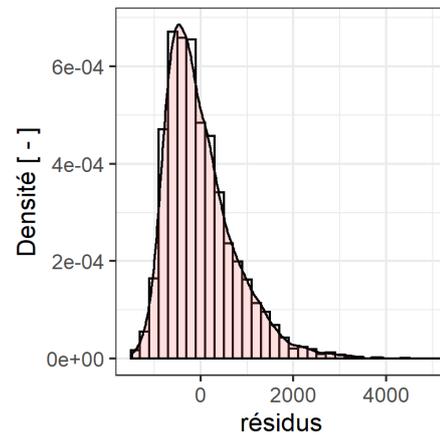


FIGURE 6.16 – Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANOVA pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.

χ^2	DDL	Valeur de p
110.54	3	$< 2.2e-16$ ***

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.18 – Évaluation de l'effet d'ordre sur le temps de lecture moyen par ligne de texte - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3
Ordre 2	9.5e-06	-	-
Ordre 3	4.3e-15	3.1e-04	-
Ordre 4	$< 2e-16$	2.1e-07	0.0808

Ajustement de la valeur de p : Benjamini & Hochberg

TABLEAU 6.19 – Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les temps de lecture moyens par ligne de texte - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées.

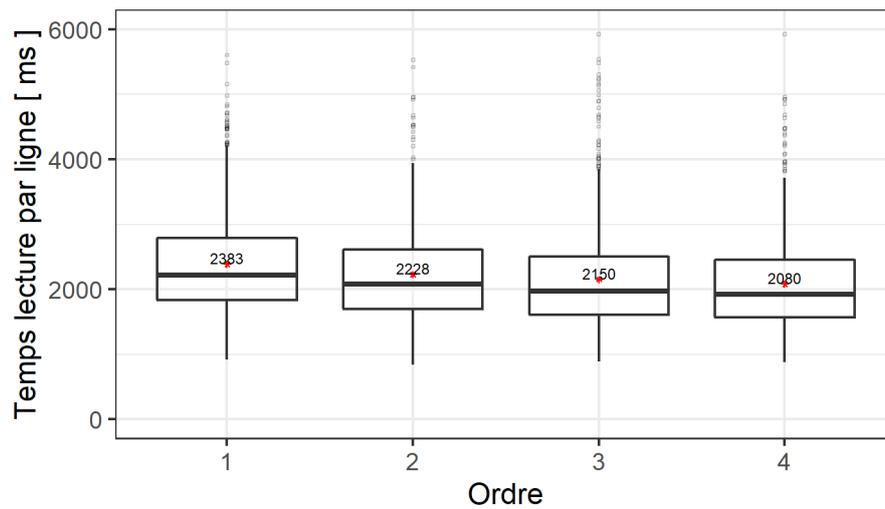


FIGURE 6.17 – Distributions des temps de lecture par ligne de texte en fonction de l'ordre du cycle de lecture. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. (–) Valeur Médiane; (*) Valeur moyenne.

À titre indicatif, et malgré la violation de normalité, une ANOVA a tout de même été calculée pour mesurer l'effet de taille GES. Celui-ci est égal à 2.2% ce qui correspond à une taille faible d'effet. L'effet d'ordre étant significatif mais léger, le prochain paragraphe s'intéresse directement à l'effet des conditions sonores seules sur la vitesse de lecture.

Effet des conditions sonores Pour mesurer l’effet des différentes conditions sonores sur le temps de lecture, l’approche paramétrique est envisagée mais l’absence de normalité des distributions ne permet pas d’obtenir un calcul d’ANOVA fiable.

Le test de Shapiro-Wilk couplé à l’analyse graphique a évalué la normalité des distribution (Tableau 6.20 et Figure 6.18). L’hypothèse \mathcal{H}_0 selon laquelle les distributions suivent une loi normale est rejetée à chaque fois. L’alternative non paramétrique est alors préférée. Dans le cas d’un plan simple à mesures répétées, le test de Friedman est recommandé. Les résultats sont présentés Tableau 6.21. Entre les distributions des temps de lecture pour les conditions C1, C2, C3, et C4, aucune différence significative n’est révélée entre paires de distributions des temps de lecture. Les valeurs moyennes par ligne sont toutes autour de 2.1, 2.2 secondes. Une représentation en boxplot est proposée Figure 6.19 pour illustrer l’absence de différences significatives entre paires de distributions. En moyenne, les sujets mettent 2.2 secondes pour lire une ligne de texte.

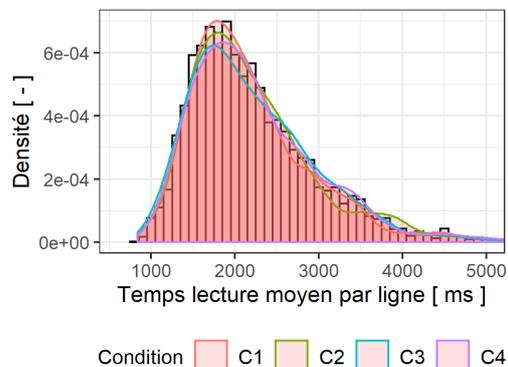


FIGURE 6.18 – Temps de lecture moyen par ligne de texte.

	W	Valeur de p	
C1	0.860	<2.2e-16	***
C2	0.909	<2.2e-16	***
C3	0.937	<2.2e-16	***
C4	0.923	<2.2e-16	***

Signif. codes :

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.20 – Test de Shapiro-Wilk pour l’évaluation de normalité des distributions de temps de lecture en fonction de la condition sonore.

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
1.820	3	0.6107

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.21 – Temps de lecture moyen par ligne de texte - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l’effet des conditions sonores.

En conséquence, la mesure des temps de lecture n’a pas permis de révéler un effet des conditions sonores sur la performance des sujets. Cette étape aura toutefois occupé les sujets dans une tâche simple adaptée au contexte de salon résidentiel. Pour résumer, l’effet d’ordre a été mesuré significatif mais léger. La vitesse de lecture augmente légèrement tout au long du test. L’effet des conditions sonores est mesuré non significatif. Qu’en est-il de l’effet d’interaction entre les facteurs d’ordre et de condition sonore ?

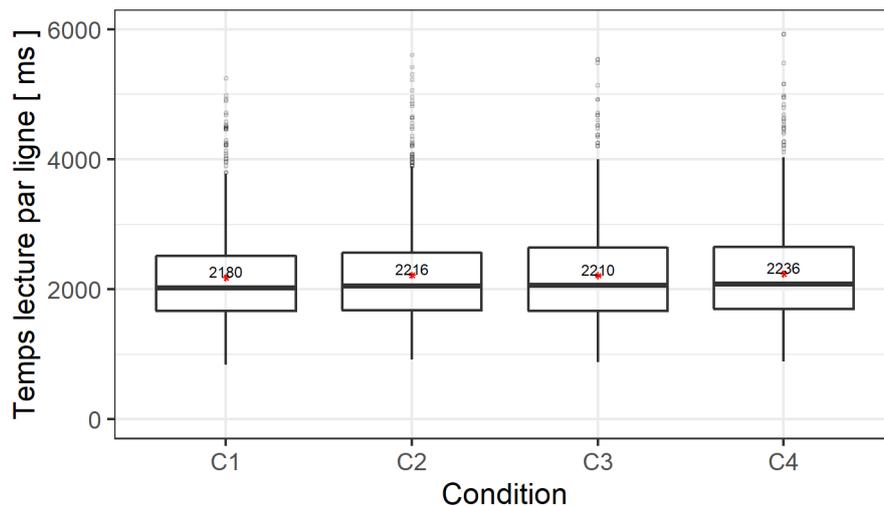


FIGURE 6.19 – Distributions des temps de lecture moyens par ligne de texte en fonction des différentes conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.

Effet d'interaction entre les facteurs d'ordre et de condition sonore L'approche paramétrique n'a pas pu aboutir en raison de l'absence de normalité des distributions. Le test de Shapiro-Wilk donne des valeurs de p toujours inférieures au seuil des 5 % permettant de rejeter l'hypothèse \mathcal{H}_0 . L'approche non paramétrique est donc préférée. Celle-ci repose sur la création d'un facteur codant pour le croisement des deux variables qualitatives (Condition et Ordre). Cette nouvelle variable comporte ainsi 16 modalités (ex : C1_Ordre1, ou C2_Ordre4). Un test de Kruskal-Wallis est ensuite effectué en prenant cette nouvelle variable comme facteur à tester. Les résultats de ce test sont présentés au Tableau 6.22.

χ^2	DDL	Valeur de p
22.59	15	0.0932

Signif. codes :

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.22 – Évaluation de l'effet d'interaction Ordre et Condition Sonore sur le temps de lecture moyen par ligne de texte - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Une tendance d'interaction semble se préciser puisque le calcul de Kruskal-Wallis donne une valeur de p de moins de 10 %. Un calcul des valeurs moyennes et des intervalles de confiance à 95 % est alors effectué. Les résultats sont visibles à la Figure 6.20.

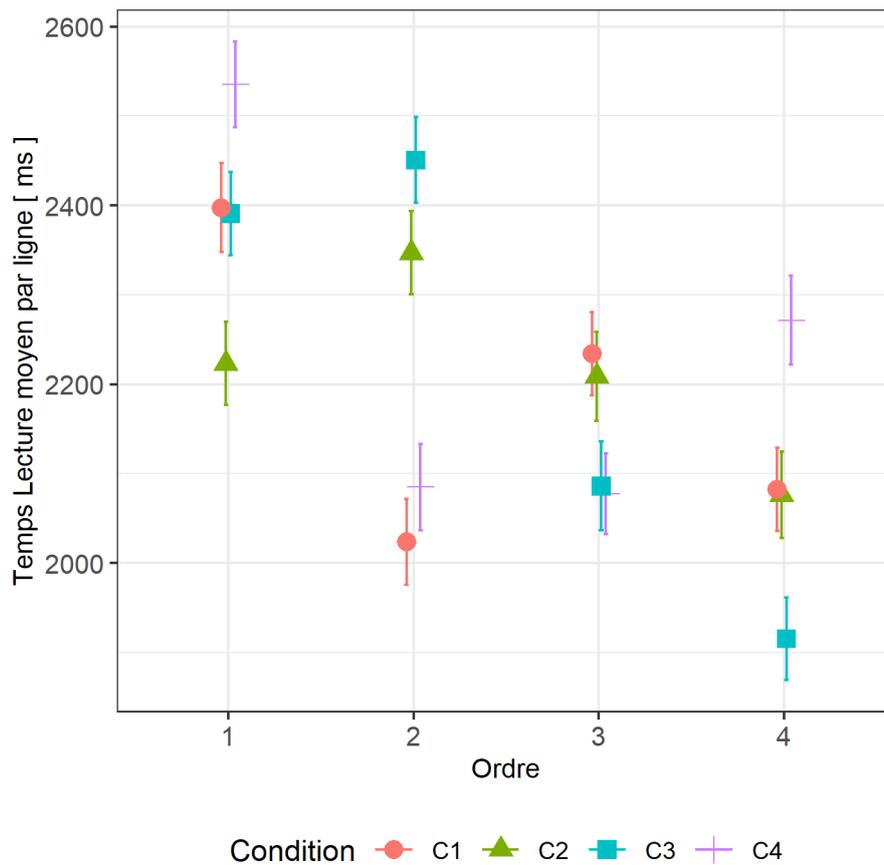


FIGURE 6.20 – Distributions des temps de lecture moyens par ligne de texte en fonction des différentes conditions sonores croisées avec les ordres de sessions de lecture. Estimations moyennes par la méthode des moindres carrés et intervalles de confiance à 95 %.

La tendance baissière à mesure que l'ordre de session augmente est confirmée. En revanche, les résultats concernant l'interaction des facteurs ordres et conditions apparaissent difficilement interprétables. Cette difficulté d'interprétation provient des résultats des sujets ayant écouté la condition C4 à l'ordre 4. En excluant ce groupe, et en ne s'intéressant qu'au jeu de données à l'ordre 3, il semble en effet que le temps de lecture moyen des sujets soient significativement plus élevé aux conditions C1, et C2 comparé aux conditions C3, et C4. Malheureusement ce résultat ne se répète pas à l'ordre 4, car les temps de lecture des sujets ayant écouté la condition C4, à l'ordre 4 sont plus élevés. Comment expliquer ce résultat ?

Pour le comprendre, une caractérisation des sujets ayant écouté la condition C4 à l'ordre 4 est proposée. Ce groupe de sujets est caractérisé par une vitesse de lecture significativement plus faible que la moyenne de l'échantillon. Ce résultat est justifié par un test de Student donnant comme résultat : $t = 8.97$, $ddl = 7717.1$, $p - value < 2.2e - 16$. Le temps moyen de lecture de ce groupe de sujets est de 2380 ms par ligne de texte quand le temps moyen de réponse de l'échantillon global est de 2211 ms soit une différence tenue mais significative de moins de 200 ms. Il semble donc que la constitution des groupes de sujets en fonction de l'ordre de passage des conditions sonores affectent les résultats et causent des difficultés d'interprétation des résultats. Idéalement, il aurait fallu connaître la vitesse de lecture des sujets en amont de l'expérience pour garantir une homogénéité de chaque groupe d'ordre par rapport à la performance de lecture. D'autres critères

sociaux-démographiques ont été évalués pour déterminer si ce groupe comporte des particularités (genre, âge, sensibilité au bruit, etc.). Aucun de ces facteurs ne caractérise particulièrement ce groupe.

Si ce groupe de participants était resté dans la moyenne des temps de lecture de l'ensemble de l'échantillon, un effet aurait peut-être pu être interprété aux ordres 3, et 4. En ne conservant le jeu de données des ordres 3 et 4, il serait alors ressorti que la vitesse de lecture des sujets est significativement plus élevée dans les conditions les moins bruyantes C3, et C4 que dans les conditions C1, et C2. Ce résultat rappellerait alors les résultats de gêne analysés à la Section 6.2.2.4, page 125. En résumé, si les participants de ce corpus (ayant écouté la condition C4, à l'ordre 4) avaient une vitesse de lecture dans la moyenne, il aurait été possible que l'hypothèse de départ soit vérifiée c'est à dire que la gêne ralentisse la vitesse de lecture.

Conclusion La mesure des temps de lecture n'a pas permis de révéler un effet des conditions sonores sur la performance des sujets. Un effet d'ordre a en revanche été mesuré significatif ($p\text{-value} \leq 2.2e - 16$) mais léger ($GES=2.2\%$). Une tendance d'effet d'interaction semble se dessiner mais aucune interprétation claire de ce calcul n'en est ressortie. Pour rappel, les autres grandeurs recueillies dans le cadre de l'activité de lecture sont le taux de bonnes réponses et les temps de réponses aux questions de compréhension. Les taux de bonnes réponses sont traités en premier lieu au paragraphe suivant.

Questions de compréhension Pour rappel, les questions de compréhension visent à vérifier que la consigne de lecture est bien comprise, et est également utilisée pour que les sujets soient incités à rester concentrés tout au long de la séance.

Taux de bonnes réponses L'effet d'ordre est tout de même évalué sur les résultats des taux de bonnes réponses aux questions de compréhension. L'analyse non paramétrique choisie en raison de la non normalité des distributions (test de Shapiro-Wilk : p-value = 1.139e-12) est effectuée sur la variable d'ordre avec un test de Kruskal-Wallis dont les résultats sont présentés au Tableau 6.23.

Aucun effet d'ordre n'est mis en évidence, en conséquence l'effet des conditions sonores seul sera évalué. Ce facteur est évalué grâce à un test non paramétrique de Friedman. En effet, le critère de normalité des distributions n'est pas satisfait. Les tests de Shapiro-Wilk ont été effectués sur chacune des distributions et révèlent le rejet systématique de l'hypothèse \mathcal{H}_0 puisque la valeur de p est toujours inférieure à 1.014e-05. Les résultats du test de Friedman sont présentés au Tableau 6.24.

χ^2	DDL	Valeur de p
2.20	3	0.531

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01
'**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.23 – Évaluation de l'effet d'ordre sur le taux de bonnes réponses aux questions de compréhension des textes - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
0.828	3	0.843

Signif. codes :
0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.24 – Taux de bonnes réponses aux questions de compréhension de textes - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.

Les taux de bonnes réponses n'ont pas été influencés par les conditions sonores puisqu'est obtenue une valeur de p bien supérieure au seuil des 5 % (p-value = 0.84). À titre indicatif, les distributions sont présentées à la Figure 6.21.

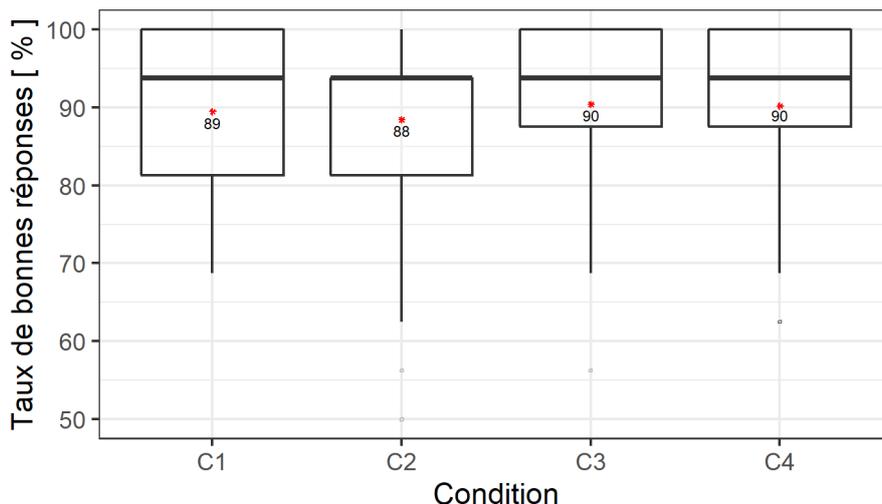


FIGURE 6.21 – Distributions des taux de bonnes réponses aux questions de compréhension en fonction des différentes conditions sonores. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{eme} quartiles, des 1^{er} et 9^{eme} déciles – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.

Même si les sujets n’ont pas dégradé leur compréhension des textes à cause des conditions sonores, le temps de réponse à ces questions est-il impacté ? L’hypothèse consisterait alors à supposer que la surcharge cognitive engendrée par une condition sonore causerait une augmentation du temps de réponse. Le taux de bonnes réponses n’est pas impacté mais pour maintenir ces performances, une réflexion plus longue serait nécessaire causant un allongement du temps de réponse.

Temps de réponse aux questions de compréhension des textes Pour évaluer l’effet d’ordre, l’approche paramétrique est à nouveau impossible en raison de la non-normalité des distributions. Le test de Shapiro-Wilk donne des valeurs de p toujours inférieures à 2.2e-16. L’alternative non paramétrique consiste en un test de de Kruskal-Willis dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6.25.

χ^2	DDL	Valeur de p
9.81	3	0.020 *

Signif. codes :

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.25 – Évaluation de l’effet d’ordre sur les temps de réponses aux questions de compréhension des textes - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

Le test rend compte d’un effet d’ordre significatif. Le test post-hoc de comparaisons par paires de Wilcoxon est ensuite effectué pour discriminer les paires de distributions pour lesquelles les médianes sont significativement différentes. Les résultats de ce test sont proposés au Tableau 6.26.

Les seules paires de distributions qui donnent des valeurs médianes différentes sont les paires Ordre 1 | Ordre 3, et Ordre 1 | Ordre 4 puisque que les valeurs de p sont inférieures au seuil de 10%. La variabilité des distributions en fonction de l’ordre est présenté à la Figure 6.22 et montre des

	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3
Ordre 2	0.220	-	-
Ordre 3	0.084	0.576	-
Ordre 4	0.015	0.234	0.447

Ajustement de la valeur de p : BH

TABLEAU 6.26 – Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les temps de réponses aux questions de compréhension de l'activité de lecture - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées.

différences ténues entre ces distributions. Les valeurs moyennes des temps de réponses décroissent très lentement jusqu'à l'ordre 4 avec une différence maximale du temps moyen de réponse entre les ordres 1 et 4 de 200 ms.

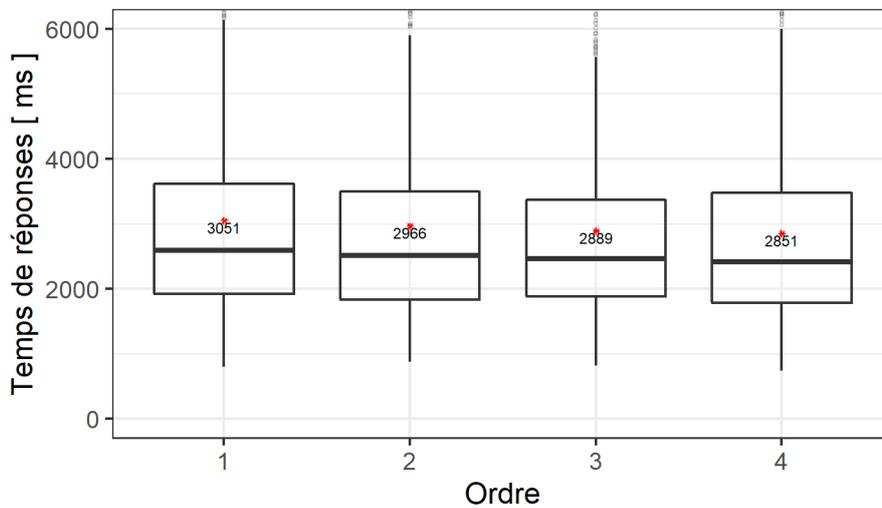


FIGURE 6.22 – Distributions des temps de réponse aux questions de compréhension en fonction de l'ordre de la session. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.

L'effet des conditions sonores est ensuite évalué. L'approche paramétrique est une nouvelle fois abandonnée en raison de la non normalité des distributions. Ce critère de normalité a été évalué avec le test de Shapiro-Wilk et montre que la valeur de p est toujours inférieure au seuil des 5% quelle que soit la sous distribution choisie. L'hypothèse \mathcal{H}_0 est donc rejetée à chaque fois. L'alternative non paramétrique dans le cadre d'un plan à mesures répétées est le test de Friedman dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6.27.

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
3.09	3	0.3767

Signif. codes :

0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.27 – Temps de réponse moyens aux questions de compréhension de texte - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.

Les résultats du test de Friedman concluent à l'absence d'effet des conditions sonores sur les temps de réponse aux questions de compréhension comme illustré sur le graphique des distributions de temps de réponse en fonction de la condition sonore (Figure 6.23). Les distributions sont très similaires, les valeurs moyennes, et médianes sont très proches.

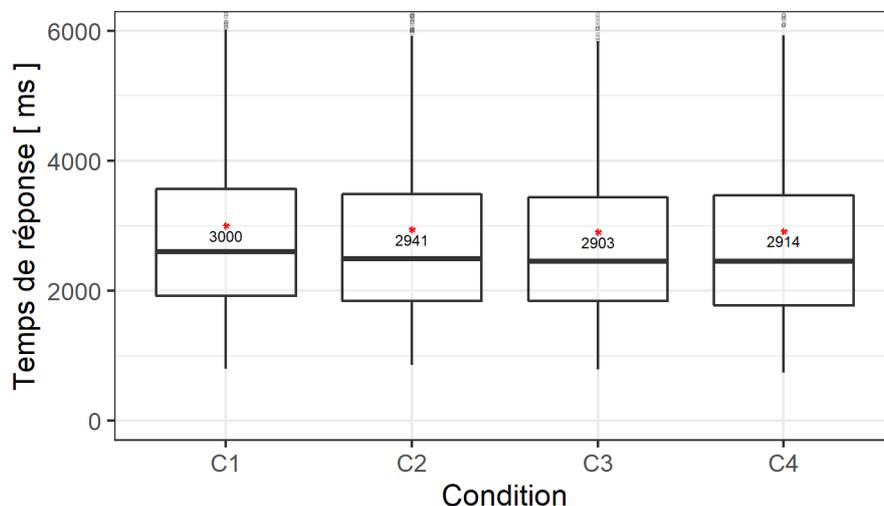


FIGURE 6.23 – Distributions des temps de réponses aux questions de compréhension en fonction de la condition sonore. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. – : Valeur médiane * : Valeur moyenne.

Pour conclure sur la lecture, ces questions de compréhension auront permis d'évaluer la bonne compréhension des textes lus. L'analyse des résultats a montré que 4 sujets n'avaient pas bien compris les textes puisque leur taux de bonnes réponses était proche de 50 % en moyenne. La décision a été prise de ne pas conserver leurs données pour le reste de l'analyse. La présence de ces questions à la fin de chaque texte incite en outre les participants à maintenir une lecture attentive pour garantir un contexte cognitif simple de lecture constant. En revanche, les stimuli sonores n'ont pas impacté les performances de lecture. Les sujets n'ont pas ralenti leur vitesse de lecture, leurs performances aux questions de compréhensions n'ont pas été détériorées dans les environnements sonores les plus bruyants, et leurs temps de réponses n'ont pas non plus été affectés. Il est à noter cependant qu'une tendance d'effet d'interaction entre les facteurs d'ordre et de condition sonore a été mesurée. Aucune interprétation claire de cet effet n'a été révélée sans doute en raison des résultats du groupe de sujets ayant écouté la condition C4 à l'ordre 4 qui est caractérisé par une vitesse de lecture en dessous de la moyenne des sujets.

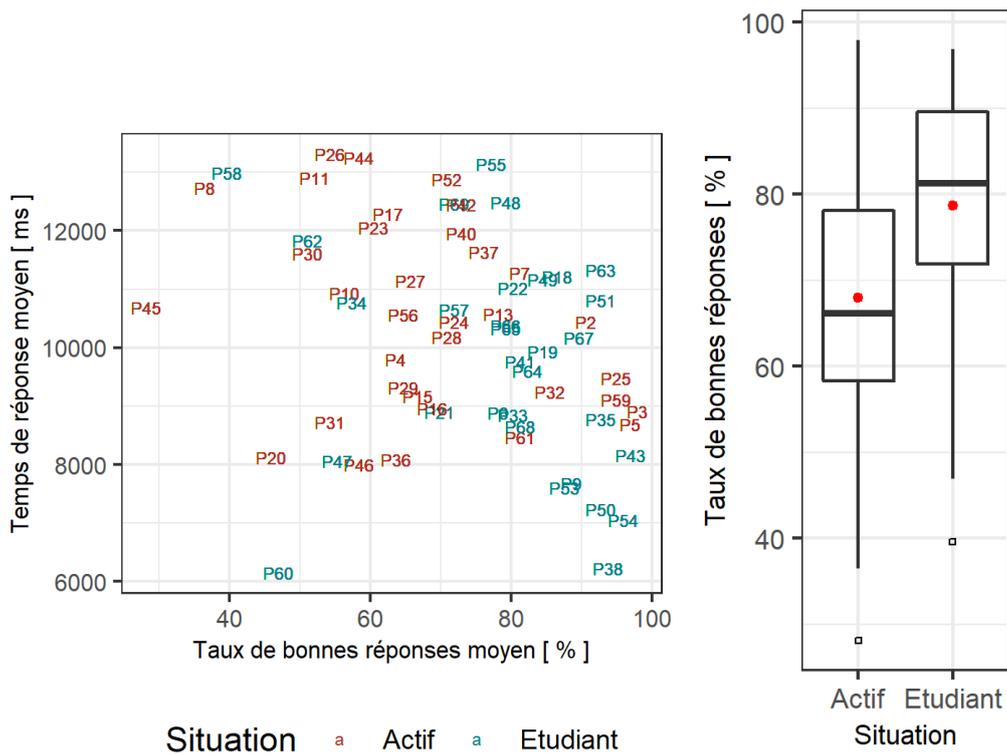
6.2.3.2 Le raisonnement grammatical RG

Introduction Pour cet exercice présenté à la Section 6.1.3.2, deux types de données sont enregistrées au cours de l'expérience, les temps de réponses pour chaque combinaison de signes et propositions associées, et la réponse donnée par le sujet ("Identique", ou "Différent"). Un taux de bonnes réponses est ensuite déduit des résultats par condition sonore et est défini comme suit :

$$\tau = \frac{Nb_{bonnes_reponses} * 100}{Nb_{total_combinaisons}} \tag{6.1}$$

Chaque sujet répond à 24 combinaisons de signes et propositions associées ($Nb_{total_combinaisons} = 24$). Les résultats de l'entraînement dans le silence ne sont pas conservés dans l'analyse des résultats.

Groupes de niveaux Figure 6.24a, une caractérisation de la variabilité dans les résultats est représentée par une carte des participants indiquant en ordonnée leur temps de réponse moyen par combinaison et en abscisse leur taux de bonnes réponses moyen. Les moyennes sont calculées sur les résultats dans les 4 conditions sonores ($24 * 4 = 96$ combinaisons par sujet). Chaque sujet est représenté par un label "P" suivi d'un numéro pour préserver leur anonymat. La Figure 6.24a



(A) Carte des sujets.

(B) Score moyen en fonction de l'âge.

FIGURE 6.24 – Performances des sujets au test de RG. (A) : Temps de réponses moyens (4 conditions sonores après l'entraînement) en fonction du taux de bonnes réponses ; (B) : Distribution des taux de bonnes réponses en fonction de la catégorie d'âge.

montre des disparités dans le niveau des sujets :

- 40% des sujets sont à plus de 80% de bonnes réponses ;
- 37% des sujets sont entre 60 et 80 % de bonnes réponses ;
- 23% des sujets ont moins de 60 % de bonnes réponses

Les sujets les meilleurs (taux de bonnes réponses > 90%) répondent vite en moyenne avec un temps de réponse souvent inférieur à 10 secondes. Les temps de réponse moyens se situent entre 6 et 13 secondes sachant que les participants avaient un temps limite de 16 secondes pour répondre. Le temps limite n'a été atteint par les sujets que dans 5% de toutes les combinaisons qui ont été évaluées. Les sujets ont donc su répondre dans les temps dans la grande majorité des situations présentées.

La Figure 6.24b montre que les étudiants de 18-30 ans ont mieux répondu que les actifs de 30-50 ans. L'âge dégrade donc les performances cognitives dans le cas d'un exercice difficile de raisonnement grammatical logique. Pour préciser si ces différences sont significatives, le test de Student est envisagé. L'hypothèse préalable à vérifier est la normalité des distributions. Cette hypothèse est testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk dont les résultats sont présentés Tableau 6.28.

	Age		
	W	Valeur de p	
18-30 ans	0.878	2.14e-03	**
30-50 ans	0.964	0.318	

Signif. codes :
0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

TABLEAU 6.28 – Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de taux de bonnes réponses du jeu de RG en fonction de l'âge des sujets.

L'hypothèse \mathcal{H}_0 du test de Shapiro-Wilk suppose que la distribution suit une loi normale. Pour accepter \mathcal{H}_0 , la valeur de p doit dépasser 0.05 ce qui est vérifié pour la distribution de résultat des 30-50 ans. En revanche, \mathcal{H}_0 est rejetée pour les 18-30 ans. Les résultats du test de Student sont toutefois fournis Tableau 6.29.

	t	DDL	Valeur de p	
Age	-2.831	62.89	6.229e-03	**

TABLEAU 6.29 – Test de Student pour comparer les valeurs moyennes des deux distributions par catégorie d'âge pour les résultats au jeu de RG.

En supposant les deux distributions normales, il ressort du test de Student que l'hypothèse \mathcal{H}_0 selon laquelle les valeurs moyennes des deux distributions sont égales est rejetée pour la variable d'âge. Les sujets de 30-50 ans ont un résultat moyen plus faible avec 66% de bonnes réponses contre 76% pour les sujets de 18-30 ans. Ce résultat est significatif selon le test de Student.

Puisque la distribution des 18-30 ans ne suit pas une loi normale, un test non-paramétrique de Wilcoxon est effectué en supplément. Il ressort également de ce test un rejet de \mathcal{H}_0 pour la variable d'âge puisqu'est obtenue une statistique $W = 312.5$ avec une valeur de p de 4.928e-03 qui confirme que les médianes des deux distributions sont significativement différentes. Pour conclure, cette partie introductive aura fourni des informations générales sur les niveaux de performance du panel dans une approche de compréhension de la sensibilité de l'activité de RG sur les sujets.

Puisque cette activité de RG est une tâche cognitive difficile, le risque d'un effet significatif de l'apprentissage est pressenti et est évalué au prochain paragraphe et la première grandeur étudiée est le taux de bonnes réponses.

Taux de bonnes réponses

Effet d'ordre Pour tester l'effet d'ordre, l'analyse de variance est envisagée mais l'hypothèse de normalité des résidus n'est pas satisfaite puisqu'en suivant le test de Shapiro Wilk, \mathcal{H}_0 est rejetée car $W = 0.96$, soit une valeur de p égale à $2.357e-06$. L'effet d'ordre est donc évalué suivant une méthode d'analyse non paramétrique Kruskal-Wallis. Elle révèle un effet d'ordre dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6.30.

χ^2	DDL	Valeur de p
8.43	3	0.0379 *

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01
'*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.30 – Évaluation de l'effet d'ordre sur le taux de bonnes réponses à l'activité de RG - Test non paramétrique de Kruskal-Wallis (HOLLANDER et DOUGLAS 1973).

La valeur de p est bien inférieure au seuil de significativité de 5 %. Le test post-hoc non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972) dont les résultats sont fournis au Tableau 6.31 révèle deux tendances de différences entre les distributions des ordres 1, et 3 d'une part, des ordres 1, et 4 d'autre part.

	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3
Ordre 2	0.317	-	-
Ordre 3	0.042	0.317	-
Ordre 4	0.042	0.317	0.955

Ajustement de la valeur de p : BH

TABLEAU 6.31 – Influence des modalités du facteur "Ordre" sur les taux de bonnes réponses de l'activité de RG - Test non-paramétrique de comparaisons par paires de Wilcoxon (BAUER 1972). Seules les valeurs de p sont indiquées.

En effet, le taux de bonnes réponses augmente au cours de la séance et se stabilise à partir de la troisième partie comme en témoigne la Figure 6.25. Cet effet d'ordre pourrait masquer l'effet d'autres facteurs comme par exemple, l'effet des conditions sonores qui sera étudié par la suite.

Effet des conditions sonores Suivant la procédure décrite dans la section méthodologique Section 6.2.1, une analyse de variance à mesures répétées en prenant le facteur "Condition sonore" en variable indépendante est envisagé. L'une des hypothèses de l'ANOVA est la normalité des distributions. Cette hypothèse a été testée à l'aide du test Shapiro Wilk. Les résultats sont présentés au Tableau 6.32 et l'hypothèse \mathcal{H}_0 selon laquelle les distributions suivent une loi normale est rejetée pour les quatre sous-distributions. L'ANOVA ne peut donc pas être effectuée et son alternative non paramétrique lui sera préférée.

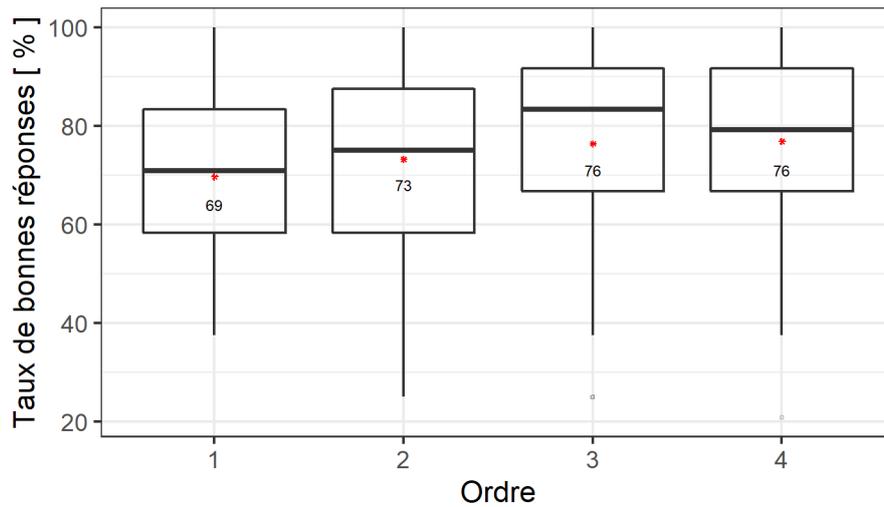


FIGURE 6.25 – Taux de bonnes réponses des sujets à la tâche de RG en fonction de l'ordre de la session - Les tests post-hoc de Wilcoxon révèlent les différences significatives par paires de distributions entre les ordres 1 et 3, et entre les ordres 1, et 4. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. (–) Valeur Médiane; (*) Valeur moyenne.

	W	Valeur de p	
C1	0.939	4.45e-03	**
C2	0.941	5.41e-03	**
C3	0.949	1.28e-02	*
C4	0.935	2.94e-03	**

TABLEAU 6.32 – Test de Shapiro-Wilk pour l'évaluation de normalité des distributions de taux de bonnes réponses au jeu de RG en fonction de la condition sonore.

L'alternative non paramétrique pour un plan à mesures répétées est le test de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973). Les résultats de ce test (Tableau 6.33) montrent que le facteur condition sonore n'influe pas sur le taux de bonnes réponses à l'épreuve de raisonnement grammatical.

Valeur test de χ^2	DDL	Valeur de p
3.590	3	0.3092

Signif. codes :

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.33 – Taux de bonnes réponses à l'activité de RG - Résultats du test non paramétrique de Friedmann (HOLLANDER et DOUGLAS 1973) pour mesurer l'effet des conditions sonores.

Si une absence d'effet du facteur Condition sonore seul est relevée, et que l'effet d'ordre est significatif, peut-être que ce dernier étant dominant masque l'effet des conditions sonores. Une évaluation de l'interaction entre les variables de condition sonore et d'ordre est donc envisagée.

Interaction entre les facteurs d'ordre et de conditions sonores L'approche paramétrique est envisagée par l'usage d'une ANOVA à plan simple et à deux facteurs. Les trois hypothèses à vérifier dans le cadre de cette ANOVA sont l'indépendance des échantillons, la normalité des résidus et l'homogénéité des résidus. L'indépendance des sujets est supposée vraie. L'homogénéité des résidus est bien vérifiée par le test de Levene dont les résultats sont présentés au Tableau 6.34. Le seuil des 10% est dépassé ce qui permet d'accepter l'hypothèse \mathcal{H}_0 supposant l'homogénéité des variances.

DDL	Valeur test F	Valeur de p
15	0.906	0.559

Signif. codes :

0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.34 – Performances au RG - Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les taux de bonnes réponses avec pour variable indépendante les facteurs d'ordre et de condition sonore.

En revanche, la normalité des résidus n'est malheureusement pas vérifiée puisque le test de Shapiro-Wilk donne $W=0.974$, et $p\text{-value} = 0.00010$. En connaissance de cette violation d'hypothèse, une ANOVA est tout de même effectuée à titre indicatif. Les résultats de cette ANOVA à deux facteurs et à plan simple sont présentés au Tableau 6.35.

	Somme des Carrés Totale (SCT)	DDL	Valeur test F	Pr(>F)
Ordre	2073.50	3	2.17	0.0923 .
Condition	285.00	3	0.30	0.8268
Ordre : Condition	6226.99	9	2.17	0.0247 *

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.35 – Performances au RG - Effets d'interactions entre les facteurs condition sonore et ordre sur les taux de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à deux facteurs. Attention, la normalité des résidus n'est pas assurée.

Un effet d'ordre semble se dessiner ce qui confirme les résultats précédents présentés au Tableau 6.30. Une interaction entre les facteurs ordre et condition est mise en évidence par l'ANOVA. Pour analyser ce résultat, la Figure 6.26 présente le taux de bonnes réponses moyen à la tâche de RG en fonction des deux facteurs croisés.

Une tendance d'augmentation du taux de bonnes réponses est relevée à mesure que l'ordre augmente. Les écarts de taux de bonnes réponses en fonction des conditions sonores se réduisent de l'ordre 1 à 2, puis augmentent à l'ordre 3 et finalement se resserrent à l'ordre 4. Par l'analyse graphique des résultats présentés à la Figure 6.26, il apparaît aux ordres 3, et 4 que le taux de bonnes réponses augmente de façon similaire (même pente) pour les conditions C1, C2, et C3, avec un classement maintenu tel que $\tau_{C2} < \tau_{C3} < \tau_{C1}$, avec $\tau_{C_i}, i = 1 \dots 3$ les taux de bonnes réponses aux conditions C_i . En revanche, les résultats pour les sujets ayant écouté la condition C4 à l'ordre 3, ou ceux qui l'ont écoutée à l'ordre 4 ne suivent pas cette tendance puisqu'une diminution sensible du taux de bonnes réponses est observée. Une tentative d'explication de ce résultat semble venir du niveau des sujets ayant écouté la condition C4 à l'ordre 3. Ces participants ont obtenu une moyenne de 78 % de bonnes réponses sur l'ensemble du test quand la moyenne sur l'échantillon complet n'est que de 72 %. En plus d'être au-dessus de la moyenne, ils ont réalisé leur meilleur score dans cette condition C4 à l'ordre 3 avec un score de 83%. Ce groupe de sujets avait obtenu des taux de bonnes réponses moyens de 72, 78, et 79 % respectivement aux ordres 1, 2, et 4. La

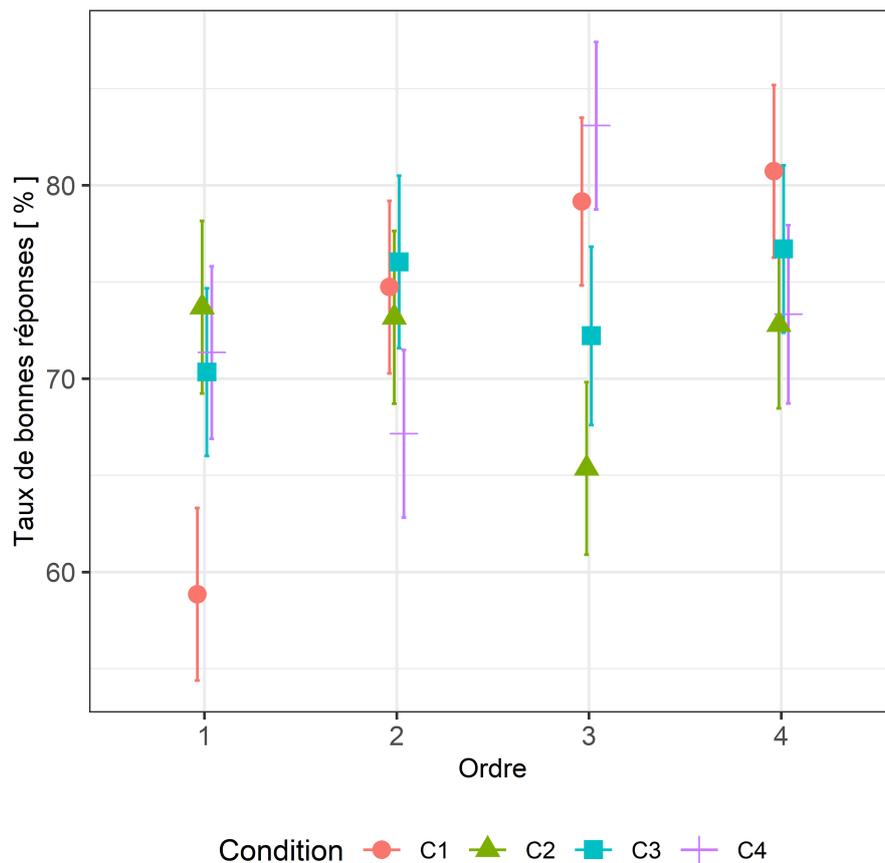


FIGURE 6.26 – Taux de bonnes réponses moyens des sujets à la tâche de RG en fonction des deux facteurs d'ordre et de conditions sonores. Estimation par la méthode des moindres carrés et intervalles de confiance à 95 %.

significativité des différences de ce groupe avec le reste de l'échantillon est évaluée au travers d'un test de Student présenté au Tableau 6.36. Le test de Student ne permet pas de conclure sur une différence significative du niveau de ce groupe par rapport au reste de l'échantillon puisque \mathcal{H}_0 ne peut être rejetée (la valeur seuil de 5 % est dépassée). Cette analyse met cependant en évidence l'importance de maîtriser l'ordre en fonction du niveau des sujets. Si cet ordre avait été mieux maîtrisé, peut-être que l'effet des conditions sonores aux ordres 3, et 4 aurait été plus net. À titre indicatif, le groupe ayant écouté la condition C4 à l'ordre 3 est constitué des participants P6, P10, P17, P18, P19, P21, P24, P29, P40, P43, P46, P50, P54, P59, P65, P67, P69.

D'autre part, les analyses sur l'effet d'ordre présentées au Tableau 6.31, et à la Figure 6.26, rendent compte d'une stabilisation des performances aux ordres 3 et 4. Comment aurait-on pu éviter de mesurer un effet d'apprentissage jusqu'à cet ordre ? Par exemple en amont du test, des entraînements à l'activité de RG pourraient être organisés sur plusieurs jours avec une session par jour le temps que l'effet d'apprentissage s'estompe (SCHLEGEL et GILLILAND 1990). À la suite de ces sessions, le test d'écoute suivrait et l'effet d'ordre ne devrait alors plus avoir d'influence.

	Valeur test t	DDL	Valeur de p
Taux de bonnes réponses	1.43	39.76	0.16

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.36 – Test de Student : Comparaison des distributions de niveau de performance pour le groupe constitué des participants ayant écouté la condition sonore C4 à l'ordre 3.

Enfin puisque l'effet d'apprentissage se stabilise aux ordres 3, et 4, il apparaît donc opportun d'effectuer une analyse statistique sur le jeu de données réduit à ces 2 ordres seulement. Avec un tel ensemble de données réduit, le plan n'est plus à mesures répétées. Une ANOVA à un facteur et à plan simple est envisagée avec pour variable indépendante le facteur condition sonore. Le test de Levene valide la notion d'homogénéité des variances (Tableau 6.37).

Variable indépendante	DDL	Valeur test F	Valeur de p
Condition	3	1.5757	0,1986

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.37 – Performances au RG : Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les taux de bonnes réponses aux ordres 3, et 4, avec pour variable indépendante le facteur condition sonore.

La violation de l'hypothèse de normalité des résidus est mesurée par le test de Shapiro-Wilk ($W = 0.945$, $p\text{-value} = 4.612e-05$). Les résultats de l'ANOVA présentés au Tableau 6.38 doivent donc être interprétés avec prudence. À titre indicatif le GES est l'indice de significativité de l'effet.

	SCt	DDL	Valeur test F	Pr(>F)	GES
Condition	2275	3	2.243	0.0865	. 0.051

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.38 – Performances au RG - Effet du facteur condition sonore sur les taux de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à 1 facteur - Attention, la normalité des résidus n'est pas satisfaite et seules les données des ordres 3 et 4 sont utilisées pour le calcul.

Une tendance très légère se dessine supposant un effet du facteur condition sonore sur les performances au jeu de RG en ne prenant que les résultats des 3^{ème} et 4^{ème} ordres. Un test post-hoc de Tukey révèle que seuls les taux de de réponses des sujets entre les conditions C1, et C2 sont différents avec une valeur de p ajustée selon la méthode « BH » de 0.088. Les résultats des taux de bonnes réponses sont présentés à la Figure 6.27 et montrent une baisse du taux de performance des sujets entre les conditions sonores C1, et C2. Pour représenter si les moyennes des distributions prises deux à deux sont significativement différentes grâce aux tests post-hoc de Tukey, une convention employant des lettres a, et b placées sous chaque distribution est choisie. Lorsque deux distributions partagent la même lettre, cela indique que leurs valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes. Par exemple sur la Figure 6.27, les taux de bonnes réponses moyens ne sont pas significativement différents entre C1, C3, et C4. Ceci est illustré par lettre "a" visible sous ces trois distributions. Le même résultat est obtenu entre C2, C3, et C4 puisqu'ils partagent la même lettre "b". En revanche, les taux de bonnes réponses moyens aux conditions C1, et C2 sont significativement différents et ceci est représenté sur la figure par l'absence de lettre commune sous ces deux distributions.

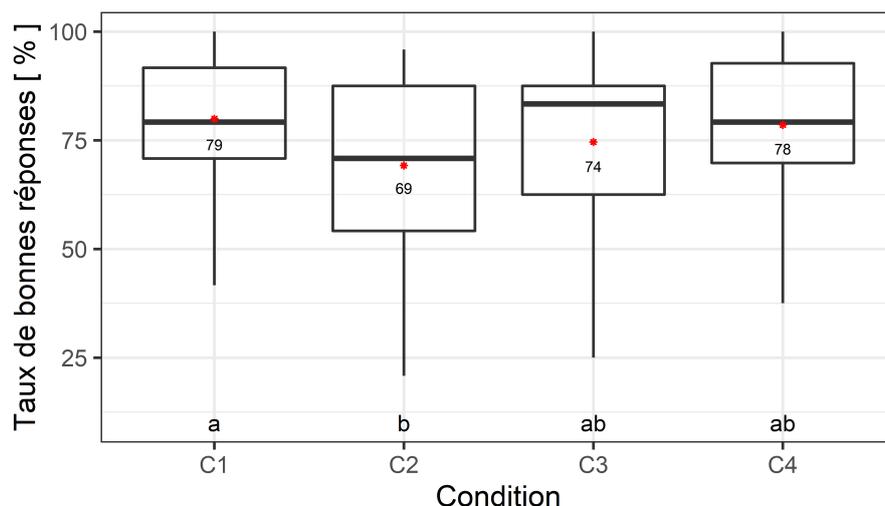


FIGURE 6.27 – Taux de bonnes réponses moyens des sujets à la tâche de RG en fonction des deux facteurs d'ordre et de conditions sonores. Seuls les résultats des 3^{ème} et 4^{ème} ordres sont conservés. Les tests post-hoc de Tukey révèlent les différences significatives par paires de distributions. Les résultats sont symbolisés par des lettres a, et b. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. (–) : Valeur Médiane; (*) : Valeur moyenne.

Malgré une baisse de 4 dB(A) du niveau équivalent, la prédominance de la fête chez le voisin semble faire baisser les performances des sujets lorsque les données sensibles à l'effet d'ordre sont ignorées (Ordres 1 et 2). Cette tendance viendrait confirmer le lien entre un stimulus sonore contenant des voix humaines et de la musique avec présence de basses, et la surcharge cognitive qu'il engendre, dont la conséquence est une baisse de performance. Mais il ne s'agit que d'une tendance. D'autres études montrent d'ailleurs que les voix plus ou moins intelligibles sont des sources qui peuvent affecter les performances à des tâches cognitives (HONGISTO 2005 ; SCHLITMEIER et al. 2008 ; EBISSOU 2013 ; CHEVRET 2017).

Les temps de réponses

Effet d'ordre L'effet d'ordre est évalué en appliquant une ANOVA suivant un plan simple à un facteur.

Les trois hypothèses de l'ANOVA doivent au préalable être vérifiées. L'indépendance des échantillons est supposée vraie. Pour l'évaluation de normalité des distributions, le test de Shapiro-Wilk ne peut être appliqué sous \mathcal{R} , en raison du volume trop important de données (6240 observations). En conséquence, la normalité des résidus sera évaluée graphiquement en fonction de l'allure de la distribution présentée Figure 6.28. Bien que la distribution ne suive pas une loi normale parfaite notamment au niveau des extrêmes ou une augmentation de la densité est observée, l'allure est évaluée graphiquement acceptable. L'hypothèse d'homogénéité des variances est alors évaluée en appliquant le test de Levene dont les résultats sont présentés au Tableau 6.39. L'hypothèse \mathcal{H}_0 selon laquelle les variances sont égales ne peut être rejetée, le critère d'homoscédasticité est donc satisfait. L'ANOVA à un facteur d'ordre au plan simple peut donc être pratiquée.

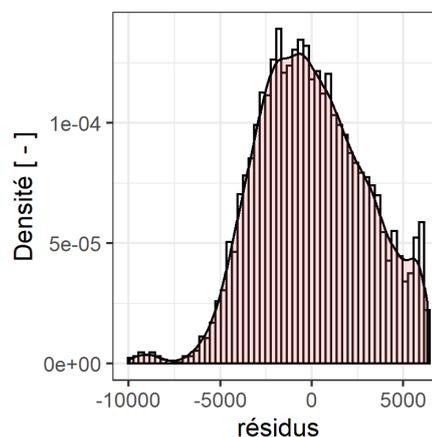


FIGURE 6.28 – Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANOVA pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.

Variable indépendante	DDL	Valeur test F	Valeur de p
Ordre	3	1.2809	0,2791

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.39 – Performances au RG - Évaluation de l'homogénéité des variances par le test de Levene effectué sur les temps de réponses et la variable d'ordre.

Les résultats montrent un effet significatif de l'effet d'ordre avec une diminution du temps de réponse avec l'effet de répétitions (Figure 6.29). Les résultats de l'ANOVA sont présentés au Tableau 6.40. L'indice GES montre que l'effet d'ordre est très léger bien que significatif. Les distributions des paires d'ordres 1|2, 2|3, et 3|4, ne sont pas significativement différentes. En revanche les temps de réponses aux ordres 1, et 2 sont significativement différents des temps de réponses à l'ordre 4. Il suit que la diminution du temps de réponse est très douce entre la 1^{ère} et la 4^{ème} répétition induisant in fine des différences significatives.

	SCt	DDL	Valeur test F	Pr(>F)	GES
Ordre	2.583 e08	3	9.912	1.602e-06	* 0.005

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.40 – Performances au RG - Effet du facteur Ordre sur les temps de bonnes réponses à la tâche de RG mesurés par l'intermédiaire d'une ANOVA à plan simple et à 1 facteur.

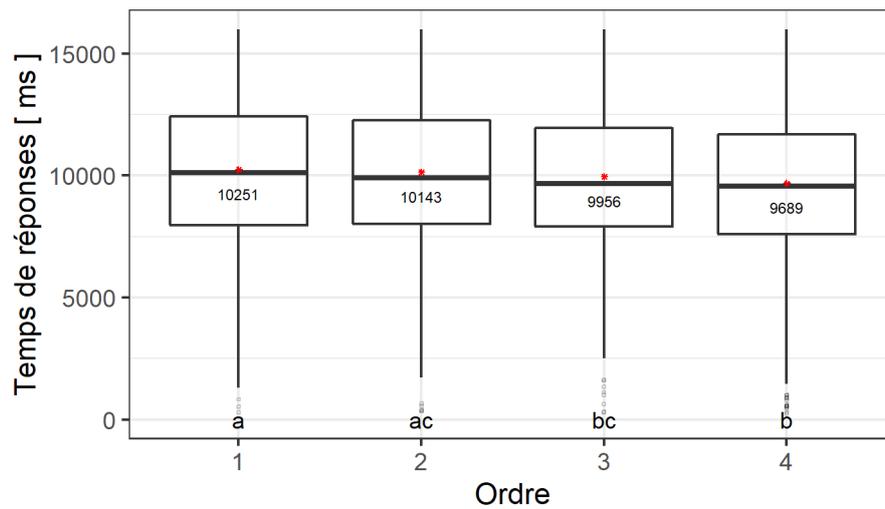


FIGURE 6.29 – Temps de réponse des sujets à la tâche de RG en fonction de l'ordre de la session. Les tests post-hoc de Tukey révèlent les différences significatives par paires de distributions; Les résultats sont symbolisées par des lettres a, et b. Représentation en boîte à moustache avec visualisation des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, des 1^{er} et 9^{ème} déciles. (–) : Valeur Médiane; (*) : Valeur moyenne.

Effet des conditions sonores sur les temps de réponse La mesure de l'effet des conditions sonores sur les temps de réponse des sujets peut être effectuée en appliquant une ANOVA à mesures répétées.

Dans ce plan d'étude à mesures répétées, les trois hypothèses à vérifier sont l'indépendance des échantillons, la normalité des distributions, et la sphéricité des données. La normalité des distributions est analysée graphiquement à l'aide de la Figure 6.30 montrant des allures de distributions acceptables. La sphéricité des données est testée à l'aide du test de Mauchly (MAUCHLY 1940) dont les résultats sont présentés au Tableau 6.41. Le critère de sphéricité des données semble satisfait puisque la valeur de p calculée par le test de Mauchly est supérieure au seuil des 5 %. En revenant à l'analyse des distributions présentées à la Figure 6.30, il ne semble pas que les temps de réponses varient significativement d'une condition sonore à l'autre. Les distributions sont toutes très proches. Le calcul d'ANOVA à mesures répétées et à un facteur confirme cette observation comme illustré au Tableau 6.42. Aucun effet des conditions sonores sur les temps de réponses des sujets à l'activité de RG n'est mesuré.

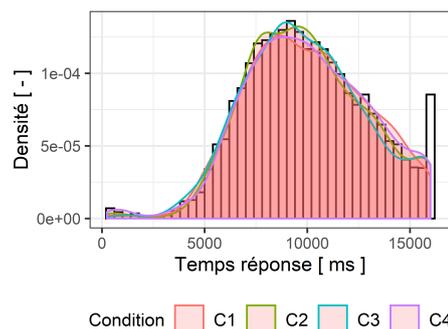


FIGURE 6.30 – Distribution des résidus du modèle linéaire d'ANOVA pour l'évaluation de l'hypothèse de normalité.

Variable dépendante	Valeur test	Valeur de p
Temps réponses	0.835	0.06

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.41 – Performances au RG - Évaluation de la sphéricité des données (homogénéité des variances pour un plan à mesures répétées) - Test de MAUCHLY (1940) sur les temps de réponses.

À titre indicatif, les acronymes utilisés dans ce tableau pour décrire les indicateurs de l'ANOVA et qui n'ont pas encore été définis sont détaillés ci-dessous :

- Numérateur (num);
- Somme des Carrés Résiduels (SCr);
- Dénominateur (den).

Effet	SCe	DDL	SCr	DDL	Test F	Valeur de p
	du num		du den			
(Intercept)	2.47e+10	1	699988632	60	2113.73	<2e-16 ***
Condition Sonore	6.329e+05	3	137789240	180	0.276	0.843

Signif. codes : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TABLEAU 6.42 – Résultats de l'ANOVA univariée de type III en mesures répétées supposant la sphéricité pour mesurer l'effet du facteur condition sonore sur la variable dépendante des temps de réponses des sujets à la tâche de RG.

6.2.4 Conclusion

Dans l'approche cognitive choisie, l'écoute distraite permet d'approcher un contexte naturel pour garantir un haut niveau de validité écologique. Les tâches de lecture et de raisonnement grammatical ont été en partie conçues dans le but de distraire les sujets pour qu'ils ne soient pas concentrés sur les sons et ainsi se rapprocher d'une écoute de tous les jours (GAVER 1988). Des questions de gêne sonores ont été posées à la fin de chaque condition sonore.

Ces questions de gêne sonore ont révélées des différences significatives entre deux paires de conditions. Les conditions les plus bruyantes C1 et C2 ont été significativement plus gênantes que les conditions C3 et C4. Ce résultat confirme que lorsque le niveau est beaucoup plus élevé, la gêne augmente. Ce résultat confirme en outre que lorsqu'à la fois les isollements de façade et entre locaux sont améliorés, la gêne diminue. Entre les conditions C1 et C2, les différences de niveaux équivalents L_{Aeq} sont également importantes (4 dB(A) de différence) et pourtant aucun effet significatif n'a été mesuré en matière de gêne sonore. Il découle de ce résultat qu'il ne suffit pas de mieux isoler la façade du bâtiment pour réduire la gêne puisque l'effet de masquage sonore obtenu avec le trafic routier disparaît et les nuisances sonores du voisin dominant la gêne. La gêne n'est ainsi pas réduite bien que le niveau global sonore ait été baissé de 4 dB(A) et celui provenant de la façade de 9 dB(A). Enfin, l'absence de différences significatives entre les conditions C3 et C4 en matière de gêne sonore révèle que dans le cadre d'une approche cognitive d'écoute distraite, une amélioration significative de 15 dB de l'isollement in situ DnT dans les basses fréquences entre 20 et 100 Hz sur le séparatif voisin ne permet pas de réduire la gêne de façon significative. Ce résultat doit être relativisé en raison de l'approche cognitive choisie. Celle-ci induit nécessairement une augmentation significative de la variabilité inter-individuelle qui rend plus difficile l'émergence de différences significatives entre conditions lorsque l'échantillon de population est petit. Pour réduire cette variabilité, une tentative de regroupement des sujets ayant le même point de vue a été effectuée. Deux groupes opposés ont été révélés, celui des gênés quelle que soit la condition et celui des non-gênés. Pour ces deux groupes, les évaluations de gêne globale sont ordonnées de façon similaire. La rénovation de façade doit être couplée à celle du séparatif voisin pour obtenir une baisse significative de gêne. Enfin, il apparaît que la gêne augmente avec la complexité de la tâche. Les gênes exprimées vis à vis de la lecture sont significativement plus basses que celles vis à vis de l'activité de RG. La gêne globale est cependant pilotée par la gêne de la tâche la plus difficile, ici la tâche de RG.

En plus des questions de gêne sonore, des données de performance ont été récoltées tout au long du test d'écoute pour mesurer si les stimuli sonores engendrent une surcharge cognitive qui se concrétiserait par des niveaux de performances en déclin lorsque la condition sonore devient plus gênante. Cette baisse de performance s'exprimerait alors sous trois formes possibles :

- Lecture :
 - Baisse de la vitesse de lecture ;
 - Baisse du taux de bonnes réponses aux questions de compréhension des textes ;
 - Augmentation du temps de réponse aux questions de compréhension des textes.
- Jeu de raisonnement grammatical RG :
 - Baisse du taux de bonnes réponses ;
 - Augmentation du temps de réponse.

Lorsque l'intégralité du jeu de données est conservé, l'analyse des différentes grandeurs n'a révélé aucun impact significatif des conditions sonores sur les niveaux de performances des sujets malgré des différences de niveaux sonores équivalents L_{Aeq} entre conditions sonores C1 et C3 ou C4 de plus de 7 dB(A). L'objectivation de la gêne ressentie par les sujets par l'intermédiaire d'une

variable de performance n'a donc pas été mise en évidence lors de ce troisième test d'écoute. La cause principale de cette absence de résultat provient de l'effet d'ordre lié à l'apprentissage des sujets au cours de la session qui domine les résultats de performances en particulier pour le jeu de raisonnement grammatical.

Puisque l'effet d'ordre se stabilise en cours d'expérience, une analyse sur un jeu de données réduit sur les deux derniers cycles a cependant permis de rendre compte de tendances. Après une phase d'apprentissage, et de l'ergonomie du test, les participants ont effectivement réduit les performances du RG dans une ambiance où le bruit de voisin domine. De plus, les vitesses de lecture semblent avoir été impactées par les conditions sonores les plus bruyantes. Par exemple à l'ordre 3, Les sujets lisent en moyenne plus vite dans les conditions les moins gênantes (C3, et C4). Malheureusement, cette tendance n'est pas confirmée à l'ordre suivant, ce qui nous empêche de conclure à un effet significatif de la gêne sonore sur la vitesse de lecture.

Chapitre 7

Conclusion générale

7.1 Résumé des principaux résultats obtenus

Dans le cadre de ces travaux de thèse s'intéressant au confort acoustique dans les bâtiments, deux contextes ont été étudiés : les bureaux-ouverts, et les logements résidentiels. Une analyse bibliographique s'est intéressée à étudier les conditions du confort acoustique dans ces deux espaces. Seul le contexte de logement résidentiel a été traité dans le corps de ce manuscrit. La diversité de sources rencontrées dans ce type d'espace a été décrite aussi bien d'un point de vue sémantique, perceptif, et acoustique. Le rapport de l'utilisateur à son environnement sonore au domicile a également été traité rendant compte des différents comportements de réaction à l'environnement sonore du domicile.

Cette analyse bibliographique rend compte de l'importance de maîtriser l'environnement sonore, pour évaluer le rapport de l'individu à cet objet d'étude. Afin de garantir une maîtrise de l'objet d'étude, l'approche de laboratoire est préconisée. la première année de thèse a donc été dédiée au développement du laboratoire de perception sonore de la MIR.

7.1.1 Le studio d'écoute

Un laboratoire de restitution spatialisée d'environnements sonores intérieurs a été mis en place au sein de la MIR de CY Cergy-Paris université. Ce studio d'écoute satisfait aux critères définis par l'AES (1996). Le studio a été élaboré, et équipé afin que tout type d'environnement sonore intérieur puisse être spatialement reproduit par l'intermédiaire d'un réseau de 16 haut-parleurs Yamaha HS7i couplé avec un caisson de basses Genelec 7070A, le tout contrôlé par le processeur Yamaha DME 64N. Ce réseau de haut-parleurs est modulaire afin d'adapter le maillage en fonction de l'origine des sources sonores à reproduire, et de la méthode de reproduction sonore choisie (VBAP, ou ambisonie). Sur ces chaînes de transmission audio trois types de réglages ont été opérés :

1. **Définition du "cross-over" (fréquence, et pente)** : filtre couplé passe-bas / passe-haut entre les haut-parleurs et le caisson de basses : 70 Hz avec une pente Linkwidth de 24 dB/octave suivant le critère perceptif défini par Kelloniemi (KELLONIEMI et al. 2005) ;
2. **Retards** : Les hauts-parleurs n'étant pas tous à égale distance du centre d'écoute, des retards ont été appliqués à certains haut-parleurs en fonction de leur distance au point central d'écoute ;
3. **Égalisation de chacune des chaînes de transmission** : Utilisation des filtres IIR pour corriger la fonction de transfert de chacune des chaînes de transmission suivant le critère perceptif de Ramos (RAMOS et LOPEZ 2006).

Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'algorithme de spatialisation de PULKKI (1997) a été employé. Un maillage de sources virtuelles a été simulé pour simuler le rayonnement de paroi : de la façade vitrée, ainsi que des séparatifs voisins (plafond, et cloison séparative). L'auralisation

des signaux pour rendre compte de filtrages définis par des performances acoustiques simulées du bâtiment s'effectue en sommant tous les chemins de transmission pour obtenir l'isolement in situ DnT . Tous les chemins de transmission sont pris en compte mais ils sont virtuellement localisés suivant le chemin direct afin de faciliter l'identification par le sujet de la provenance des sons.

Dans ce laboratoire, une méthodologie articulée autour de trois tests successifs a été développée et explicitée à la Section 1.3.1. Cette méthodologie s'appuie sur un premier test perceptif dédié à l'écoute attentive de sources sonores écoutées individuellement. Ces stimuli sont typiques des sources sonores potentiellement perçues dans un logement résidentiel en milieu urbain.

7.1.2 La sémantique des sources individuelles

Ce premier test visait à caractériser les préférences individuelles pour évaluer les sources d'agrément et de désagrément pour chacun des sujets. Une partie des résultats sur l'agrément sonore de sources typiques d'un logement résidentiel confirme les études terrain. À l'égard des sons extérieurs, les individus préfèrent les chants d'oiseaux et n'apprécient pas les bruits de chantier. Pour les sons intrusifs venant des voisins, il y a aussi un consensus, les gens préfèrent entendre la musique classique et trouvent désagréables les sons humains. Des différences de point de vue ont été révélées. Les notes d'agrément des sons humains (dîner, rires, etc.) sont influencées par la sensibilité sonore du participant, plus le sujet est sensible et plus il évaluera ces types de sons désagréables. Enfin deux groupes de sujets sont ressortis, l'un étant plus tolérant envers les sons de musique actuelle (hip-hop, et pop musique), l'autre étant plus critique et donnant une note négative au stimulus de musique Pop.

7.1.3 Les effets de composition de plusieurs sources

Un second test s'est également déroulé dans le laboratoire. Pour ce test, l'objectif est d'étudier l'effet des compositions de sources sur l'agrément sonore. En donnant des moyens de contrôle de l'environnement sonore aux sujets, des optimisations visant à trouver un équilibre entre les niveaux sonores relatifs de 3 provenances de sources écoutées simultanément ont été effectuées. Pour préparer ce test d'écoute, une sélection réduite de sources sonores a été faite sur la base des résultats du premier test. Les sources ont été choisies pour couvrir un large spectre d'agrément allant de désagréable à agréable. De plus, les préférences musicales révélées au premier test ont pu être testées à nouveau au second car deux stimuli comprenant de la musique commerciale ont été conservés pour ce second test.

Pour 4 des 6 sources sources intrusives du voisin évaluées, un choix consensuel émerge pour la composition des environnements sonores les plus agréables. Ces optimisations s'obtiennent en diminuant le niveau de la source du voisin de 4-5 dB(A) en moyenne au profit des autres (Ventilation ou Façade). Deux stratégies se dessinent ensuite avec des sujets préférant masquer la source du voisin avec une source de ventilation intérieure et d'autres préférant utiliser la source de façade pour effectuer ce masquage. La source préférée pour masquer les sons intrusifs du voisin atteint en moyenne un niveau équivalent L_{Aeq} de 38 dB(A). La source du voisin n'est alors quasiment plus perceptible ($\Delta \geq 6 dB(A)$).

Pour les deux sources sonores de voisinage constituées exclusivement de musique (classique, ou Pop.), des stratégies spécifiques ont émergé. Pour la source sonore de musique Pop, les goûts musicaux des sujets sont confirmés en cohérence avec les résultats du premier test d'écoute. Le groupe ayant évalué la musique Pop. déplaisante a réduit le niveau de 5 dB(A) en moyenne et l'a masquée avec les différentes sources provenant de la façade vitrée. La plupart des individus qui lors

du premier test d'écoute avaient évalué positivement ce stimulus ont opté majoritairement pour une stratégie opposée puisqu'ils ont augmenté d'environ 3 dB(A) en moyenne le niveau sonore de la source de musique chez le voisin et l'ont mélangé soit avec la ventilation (pour la moitié des sujets appréciant cette musique) soit avec les sources de façade (pour l'autre moitié de ce même groupe).

Pour résumer, ce second test montre l'influence de la sémantique des sources au travers de composition d'environnements sonores optimisés. À même niveau sonore équivalent, des différences significatives d'agréments ont été révélées. L'étude d'une superposition de sources provenant du voisin, de l'extérieur et du logement révèle l'importance de prendre en compte les effets de masquages sonores dès la conception des bâtiments. Par exemple, les sons intrusifs non-musicaux du voisin ont très souvent été masqués pour créer un environnement plus agréable. Mais ces effets de masquages n'ont pas été effectués de la même façon selon les sujets. Par exemple, l'utilisation de la ventilation comme source de masquage peut améliorer la perception d'agrément ou bien la dégrader selon les préférences individuelles. Malheureusement, aucun critère socio-culturel n'a permis d'expliquer ces différences d'évaluations subjectives.

Une dernière expérience a été développée visant à rendre compte de l'effet de l'amélioration des performances des dispositions constructives sur la gêne des individus. Une sélection finale de deux sources sonores a été effectuée sur la base de ces deux premiers tests d'écoute. Cette sélection s'est faite pour garantir d'avoir des sources suffisamment consensuelles, toutes aussi désagréables les unes que les autres, et ayant un niveau sonore à l'origine suffisamment élevé. Les sources de fête chez le voisin, et de trafic routier de véhicules à faibles vitesses vérifient ces critères et ont donc été choisies pour ce dernier test d'écoute.

7.1.4 Les performances du bâtiment

Pour évaluer les performances du bâtiment dans un contexte de rénovation d'un bâtiment ancien des années 1920-1940, l'approche cognitive en laboratoire a été retenue. L'expérience s'est déroulée dans des conditions satisfaisantes de validité écologique. Pour cette expérience, l'objectif était de mesurer des réponses en gêne des sujets pour 4 conditions sonores correspondant à différentes situations constructives en partant d'une situation avec de faibles performances d'isolement acoustique (Simple vitrage, briques creuses) pour progressivement améliorer ces isollements par de la rénovation de façade, et du séparatif voisin. Les sources émettrices ne pouvaient pas changer d'une condition à l'autre pour que seul l'effet du bâtiment soit mesuré. Pour occuper les sujets, une activité simple (la lecture), et une autre difficile (le raisonnement grammatical) ont été proposées aux sujets. En parallèle, des mesures de performances ont été effectuées pour évaluer si les différents stimuli sonores influent sur leurs performances.

Lorsque l'intégralité du corpus de données est conservé, l'analyse des différentes grandeurs n'a révélé aucun impact significatif des conditions sonores sur les niveaux de performances des sujets malgré des différences de niveaux sonores équivalents L_{Aeq} entre conditions sonores de plus de 7 dB(A). L'objectivation de la gêne ressentie par les sujets par l'intermédiaire d'une variable de performance n'a donc pas été clairement mise en évidence lors de ce troisième test d'écoute. La cause principale de cette absence de résultat provient de l'effet d'ordre lié à l'apprentissage des sujets au cours de la session qui domine les résultats de performances en particulier pour le jeu de raisonnement grammatical.

Cependant, puisque l'effet d'ordre se stabilise en cours d'expérience, une analyse sur un jeu de données réduit a permis de rendre compte de tendances d'effet des conditions sonores sur la performance. Après une phase d'apprentissage, les participants ont effectivement réduit les

performances du RG dans une ambiance où le bruit de voisin domine. De plus, l'environnement sonore semble avoir influé sur les vitesses de lecture. Les situations les plus bruyantes semblent avoir fait ralentir les sujets.

Les questions de gêne sonore ont révélé des différences significatives entre deux paires de conditions. Les conditions les plus bruyantes ont été évaluées significativement plus gênantes. Ce résultat confirme que lorsque le niveau est beaucoup plus élevé, la gêne augmente. Il confirme en outre que lorsqu'à la fois les isollements de façade et entre locaux sont améliorés, la gêne diminue. Cependant entre les deux conditions sonores les plus bruyantes, les différences de niveaux équivalents L_{Aeq} sont également importantes (4 dB(A) de différence) et pourtant aucun effet significatif n'a été mesuré en matière de gêne sonore. Il découle de ce résultat qu'il ne suffit pas de mieux isoler la façade du bâtiment pour réduire la gêne puisque l'effet de masquage sonore obtenu avec le trafic routier disparaît et les nuisances sonores du voisin dominant la gêne. La gêne n'est ainsi pas réduite bien que le niveau sonore ait été baissé de 4 dB(A).

Enfin, l'absence de différences significatives en matière de gêne sonore entre les deux conditions les plus calmes révèle que dans le cadre d'une approche cognitive d'écoute distraite, une amélioration significative de 15 dB de l'isollement in situ DnT dans les basses fréquences entre 20 et 100 Hz sur le séparatif voisin ne permet pas de réduire la gêne de façon significative. Enfin, il apparaît que la gêne augmente avec la complexité de la tâche effectuée. Les notes de lecture sont significativement plus basses que celles de l'activité de RG. La gêne globale est cependant pilotée par la gêne de la tâche la plus difficile, ici la tâche de RG.

7.2 Discussion

7.2.1 La méthode

L'approche de laboratoire est souvent questionnée de part son manque de réalisme n'étant pas assez proche des environnements naturels. Pour limiter ce biais inhérent aux études perceptives en laboratoire, les environnements sonore et visuel du studio sont en cohérence avec des conditions naturelles de salon en milieu résidentiel urbain. Ce réalisme a été confirmé par des évaluations perceptives. Cependant, pour satisfaire au critère de validité écologique, les activités effectuées par les sujets doivent également être réalistes. Dans les deux premières étapes de l'expérience présentées Chapitre 4 et 5, une écoute attentive était requise pour l'évaluation. La validité écologique n'est alors pas garantie ce qui a pu affecter les résultats. Ce choix s'est justifié par le besoin d'accéder à des grandeurs de qualité sonore. Pendant une écoute attentive, le sujet est plus à même de percevoir de fines différences entre stimuli ce qui a comme conséquence de limiter la variabilité inter-individuelle. Et pour des mesures d'agrément, ou de qualité sonore, cette approche est préconisée bien qu'elle ne satisfasse pas le critère de validité écologique.

7.2.2 Les choix d'auralisation

La contribution à l'isollement acoustique global par les latéraux a été intégré dans le calcul de la courbe de DnT , (ou $DnTA, tr$ pour la façade). Cette courbe définit le filtrage de bâti à appliquer au signal source. La restitution a donc bien pris en compte l'influence des latéraux mais a été confondue avec la localisation du direct pour ne simuler que le rayonnement de la paroi en direct. Ce choix de ne pas localiser la contribution des latéraux s'est justifié pour faciliter l'identification de la provenance des sources. Seulement, la capacité à plus ou moins bien identifier l'origine des sources influe justement sur la perception. Par exemple, lorsqu'un habitant n'arrive pas à identifier la cause de la nuisance, ou sa provenance, il peut se sentir démuni ne pouvant pas agir sur elle, et

en conséquence se focaliser encore davantage sur cette nuisance. Des travaux visant à auraliser la contribution des latéraux dans l'espace pour restituer un champ acoustique plus précis constituent un axe de recherche intéressant et auraient certainement des incidences sur la perception, mais n'ont pas pu être étudiés dans le cadre de cette thèse. De plus, un choix d'un maillage de neuf sources virtuelles rayonnant en phase a été retenu pour simuler un rayonnement de paroi homogène. Il s'agit d'un choix simplifié qui ne prend pas en compte toute la complexité du caractère modal du rayonnement de paroi.

7.2.3 Les isolements aux bruits d'impacts

Les isolements aux bruits d'impacts n'ont pas été traités dans le cadre de cette thèse alors même qu'ils ressortent selon les études comme parmi les premières sources de gêne au domicile. Il s'agit d'une faiblesse de cette étude sur le confort qui mériterait un travail approfondi. Ce champ de recherche nécessite des travaux spécifiques sur l'interaction vibratoire entre la source et le plancher et pourrait s'inspirer des progrès obtenus en auralisation des bruits de trains, ou de voiture.

7.2.4 L'absence d'effet de l'amélioration de l'isolement basses fréquences

Un résultat important est ressorti du troisième test d'écoute, l'absence d'effet sur la gêne ressentie de l'amélioration basses fréquences de l'isolement aux bruits aériens avec le voisin. La source sonore utilisée comportait pourtant un fort contenu basses fréquences. Un élément n'a cependant pas été pris en compte, l'impact de la transmission des vibrations lié à cette excitation basses fréquences. Restituer les basses fréquences en ne prenant en compte que la partie aérienne est un choix de simplification qui pose question. Dans une étude basses fréquences, rendre compte de l'impact sur la perception du couplage aérien et vibratoire semble un axe de recherche intéressant (GUASTAVINO 2007). L'isolement basses fréquences de la façade n'a pas non plus été étudié spécifiquement alors même que les sources de trafic routier par exemple émettent un contenu basses fréquences significatif.

7.3 Perspectives

Dans cette approche cognitive visant à mesurer les effets des dispositions constructives sur la gêne perçue, l'objectivation de la gêne par la mesure de performance n'a pas complètement pu aboutir dans le cadre de ces travaux. L'effet d'apprentissage a limité l'analyse de l'impact des différentes conditions sonores sur la performance. Pour la tâche de raisonnement grammatical, l'effet d'apprentissage s'est stabilisé après quelques répétitions. L'entraînement dans le silence n'a donc pas suffi et les sujets ont continué d'apprendre l'activité pendant l'expérience. Pour un test d'écoute, l'idéal serait d'avoir des sujets suffisamment entraînés avant le test sans que la fatigue des sujets ne se fassent ressentir pendant l'expérience. Comment ces sujets peuvent-ils être suffisamment entraînés avant le passage de test et à la fois ne pas être fatigués pendant le test d'écoute en raison de cet entraînement trop long ? Une résolution est possible si l'entraînement s'effectue en amont du passage de test. Par exemple, en faisant passer un entraînement à distance une fois par jour pendant quelques jours avant le passage du test d'écoute, cet effet d'apprentissage devrait disparaître au moment du test d'écoute. La fatigue ne serait pas non plus ressentie à condition que le test d'écoute ne soit pas trop long.

Un travail important sur le choix du corpus de sujets a été effectué pour ces travaux. Cependant, les groupes de sujets par ordre de passage des conditions sonores n'ont pas été bien maîtrisés, puisqu'ils ont été choisis suivant un carré latin avec permutations et distribués sur le panel de sujets de façon aléatoire. Or, les résultats montrent qu'un effet des conditions sonores sur les performances

aurait semble-t-il pu être mesuré avec une meilleure maîtrise du corpus. Cette maîtrise aurait pu être obtenue avec la connaissance des performances moyennes de chaque sujet en amont du test. Avec des entraînements en phase de recrutement et non le jour du test, ces informations auraient été recueillies, et le plan d'expérience aurait alors été défini en prenant en compte ces variables de performances dans la constitution des groupes d'ordres de passage. Une autre option serait de faire passer le test à un panel de sujets plus important est de faire la sélection des données a posteriori par groupe de niveau de performances. Notre panel de 65 sujets était trop petit pour suivre ce type d'analyse.

D'autre part, un travail sur les effets de localisation des sources sonores n'a pas pu être approfondi. Selon les dispositions constructives (qu'elles soient légères ou bien lourdes), la contribution des latéraux sur le rayonnement dans le logement varie avec de fortes contributions lorsque le séparatif est léger (exemple des cloisons distributives) et de faibles contributions lorsque le séparatif est lourd (exemple du béton). Lorsque la contribution des latéraux augmente, la localisation de la source devient plus difficile ce qui modifie la perception. Le risque de délocalisation des sources sonores sous l'effet du rayonnement des latéraux et son impact sur la perception est un axe de recherche qui pourrait être approfondi en développant de nouveaux tests perceptifs en laboratoire.

Annexe A**Questionnaire du premier test d'écoute**

Informations générales

* Required

Email address *

Your email

Prénom *

Your answer

Nom *

Your answer

Genre *

Homme

Femme

Autre

Quel âge avez-vous? (en années) *

Your answer

A quelle catégorie socioprofessionnelle appartenez-vous? *

- Etudiants
- Artisans, commerçants et chefs d'entreprise
- Cadres, professions intellectuelles supérieures
- Ouvriers
- Personnes sans activités professionnelles
- Agriculteurs, exploitants
- Professions intermédiaires
- Employés
- Retraités

Quelle est votre situation familiale? *

- Personne seule
- Famille monoparentale
- Couple sans enfant
- Couple avec au moins un enfant
- Autre type de ménage

Dans quel pays avez-vous grandi? *

- France, Belgique, Luxembourg
- Europe du Nord
- Europe de l'Est
- Europe du Sud
- Magheb
- Afrique Noire
- Asie
- Océanie
- Amérique du Nord
- Amérique du Sud

Debriefing du test d'écoute

Vous sentez-vous à l'aise dans cette décoration de salon? *

	1	2	3	4	5	
Pas du tout à l'aise	<input type="radio"/>	Tout à fait à l'aise				

Tout pris ensemble, globalement, comment évaluez-vous l'ensemble des ambiances sonores que vous venez d'écouter? *

	1	2	3	4	5	
Pas du tout réaliste	<input type="radio"/>	Extrêmement réaliste				

Avez-vous pu identifier d'où provenaient les sources sonores? *

	Jamais	Presque jamais	Parfois	Assez souvent	A chaque fois
Venant du voisin (du dessus ou du côté)	<input type="radio"/>				
Venant de la façade vitrée	<input type="radio"/>				

Les sources que vous venez d'entendre sont-elles plus présentes ou moins présentes chez vous?

*

	Beaucoup plus présentes	Plus présentes	Autant présentes	Moins présentes	Beaucoup moins présentes
Venant du voisin (du dessus ou du côté)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Venant de la façade vitrée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Commentaire libre:

Your answer

Votre logement

Où habitez-vous? *

- Hyper-centre
- Périphérie
- Campagne

Quel est votre type de logement? *

- Immeuble résidentiel
- Immeuble HLM
- Maison au sein d'un quartier pavillonnaire
- Maison isolée

Possédez-vous un balcon, une terrasse ou un jardin? *

- Oui
- Non

Avez-vous une pièce qui vous permet de vous reposer hors du bruit? *

- Oui
- Non

Depuis combien de temps habitez-vous votre logement? *

- < 1 an
- 1-2 ans
- 2-5 ans
- 5-10 ans
- > 10 ans

Êtes-vous propriétaire ou locataire de votre logement? *

- Locataire
- Propriétaire
- Hébergé à titre gratuit

Êtes-vous satisfait(e) du confort acoustique de votre logement? *

- | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Très insatisfait | <input type="radio"/> | Très satisfait |

Sensibilité au bruit

Ce questionnaire comporte 12 questions indépendantes. Choisissez, pour chacune, la réponse parmi les quatre proposées qui vous correspond le mieux. Il n'y a ni bonne, ni mauvaise réponse, ni de lien ou de logique dans l'ordre des questions proposées.

J'ai besoin d'un environnement complètement calme pour avoir une bonne nuit de sommeil *

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

J'ai besoin d'un environnement calme pour être capable d'effectuer de nouvelles tâches *

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

Quand je suis à la maison, je m'habitue rapidement au bruit *

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

Je deviens très agité(e) si j'entends quelqu'un parler alors que j'essaie de m'endormir *

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

Je suis très sensible au bruit de voisinage *

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

Lorsque les gens autour de moi sont bruyants, j'ai du mal à accomplir mon travail *

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

Je suis nettement moins performant dans les endroits bruyants *

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

Je ne me sens pas bien reposé(e) lorsque la nuit précédente a été bruyante *

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

Vivre dans une rue bruyante ne me dérangerait pas *

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

Je suis prêt(e) à accepter des inconvénients pour vivre dans un endroit calme *

	0	1	2	3	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord

J'ai besoin de calme et de tranquillité pour effectuer un travail *

	0	1	2	3	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord

Je peux m'endormir même quand c'est bruyant *

	0	1	2	3	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord

Qualité de vie

Comment trouvez-vous votre qualité de vie ? *

- Très mauvaise
- Mauvaise
- Ni bonne, ni mauvaise
- Bonne
- Très bonne

Êtes-vous satisfait de votre santé? *

- Très insatisfait
- Insatisfait
- Ni satisfait ni insatisfait
- Satisfait
- Très satisfait

Avez-vous suffisamment d'énergie dans votre vie quotidienne ? *

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Extrêmement

Êtes-vous satisfait(e) de votre capacité à effectuer les tâches de la vie quotidienne? *

- Très insatisfait
- Insatisfait
- Ni satisfait ni insatisfait
- Satisfait
- Très satisfait

Êtes-vous satisfait(e) de vous? *

- Très insatisfait
- Insatisfait
- Ni satisfait ni insatisfait
- Satisfait
- Très satisfait

Êtes-vous satisfait(e) de votre relation avec les autres? *

- Très insatisfait
- Insatisfait
- Ni satisfait ni insatisfait
- Satisfait
- Très satisfait

Avez-vous assez d'argent pour satisfaire vos besoins ? *

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Extrêmement

Êtes-vous satisfait(e) de votre lieu de vie? *

- Très insatisfait
- Insatisfait
- Ni satisfait ni insatisfait
- Satisfait
- Très satisfait

Annexe B

Analyse par Composantes principales

B.1 Présentation des données

L'analyse par composante principale est une méthode d'analyse statistique exploratoire multi-dimensionnelle. Les données à analyser consistent en un ensemble de K variables quantitatives x définies en fonctions des I observations. Cet ensemble de données peut être représenté sous la forme matricielle \mathcal{M} . Les grandeurs caractérisant chacune des variables x_i selon leur valeur moyenne et écart-type sont notées respectivement \bar{x}_k et s_k avec $k = 1 \dots K$

$$\mathcal{M} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & & k & & K \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ I \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & x_{ik} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \dots & x_{Ik} & \dots & x_{IK} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

(Moy., SD) (\bar{x}_1, s_1) (\bar{x}_k, s_k) (\bar{x}_K, s_K)

Un premier traitement est effectué consistant en une harmonisation du nuage de données par une opération de centrage et de réduction des données de départ :

$$\mathcal{M}_{cr} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & & k & & K \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ I \end{matrix} & \begin{pmatrix} \frac{x_{11} - \bar{x}_1}{s_1} & \dots & \frac{x_{1k} - \bar{x}_k}{s_k} & \dots & \frac{x_{1K} - \bar{x}_K}{s_K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_{I1} - \bar{x}_1}{s_1} & \dots & \frac{x_{Ik} - \bar{x}_k}{s_k} & \dots & \frac{x_{IK} - \bar{x}_K}{s_K} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Le centrage consiste à retrancher à chacune des observations x_{ik} , la moyenne \bar{x}_k . Ce centrage est un préalable nécessaire pour la pratique de l'analyse par composantes principales. Il vise à placer le centre de gravité du nuage de points (des observations) à l'origine. Ensuite la réduction consiste à diviser chacune des valeurs réduites par l'écart-type de la variable considérée. Son rôle est d'homogénéiser la dispersion des données. Les variances de chacune des variables ainsi modifiées deviennent toutes égales à 1.

B.2 Principe général dans \mathbb{R}^K

B.2.1 Approche

Le principe général de l'analyse par composantes principales consiste à synthétiser un jeu de données en réduisant son nombre de dimensions. La question est alors de savoir sur quel critère pertinent réduire le nombre de dimensions. Lorsqu'un nuage de points défini suivant K dimensions est représenté dans un espace plus petit, il devient nécessairement déformé. Le critère choisi pour l'ACP doit permettre de déformer le moins possible le nuage de points, pour obtenir ainsi sa meilleure représentation synthétique. Dans un premier temps, la première composante principale est recherchée (Voir Figure B.1a). Cette composante se construit en cherchant à maximiser la projection de chaque observation suivant cet axe. On cherche donc une image approchée du nuage suivant une première dimension u telle que :

$$\sum_{i=1}^I OH_i^2 \quad (\text{B.1})$$

Ce critère de maximisation de la somme des projections permet de minimiser la déformation du nuage de points. Puisqu'il s'agit d'une recherche de maximisation de la somme des projections, cela revient à rechercher l'axe de variabilité maximal. Ce critère garantit en outre une propriété importante appelée l'emboîtement des solutions. En cherchant non pas l'axe mais le plan qui permettra la meilleure représentation du nuage de points suivant le même critère de maximisation des projections, on obtient un plan d'inertie maximal dont le premier facteur est toujours u , inchangé qu'on notera par la suite u_1 . (voir Figure B.1b). L'axe u_2 est recherché suivant deux critères, il doit être orthogonal à u_1 et être le second axe d'inertie maximum.

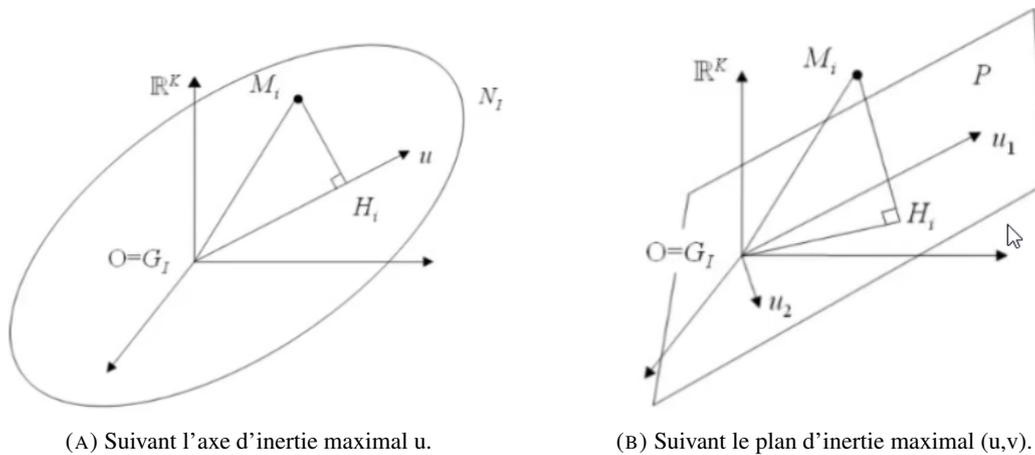


FIGURE B.1 – Schéma des catégories sémantiques utilisées pour composer les scènes sonores issues de l'extérieur.

Pour généraliser, on peut chercher en suivant cette approche une suite d'axes d'inerties maximums notés F_i qui soient tous orthogonaux entre rangs successifs. Soient u_s , un vecteur unitaire de rang s , et H_i^s , la projection du point M_i sur l'axe de vecteur unitaire u_s , on cherche alors ce vecteur u_s en maximisant la quantité suivante :

$$\sum_{i=1}^I (OH_i^s)^2 \quad (\text{B.2})$$

Avec pour contrainte u_s orthogonal à u_t , pour $t < s$. Une méthode de calcul permet de déterminer ces axes principaux. Le calcul effectué pour obtenir l'ensemble des axes d'inertie maximum consiste à rechercher les vecteurs et valeurs propres de la matrice de corrélation associée au jeu de données. En effet, les vecteurs propres de la matrice de corrélation sont les axes d'inertie maximum et les valeurs propres de cette matrice sont les quantités maximisées associées définies à l'équation B.2.

Pour la suite de la description de la méthode, on prendra l'exemple de l'ACP qui a été effectuée au Chapitre 4. Pour rappel, les variables x_k sont les profils d'agrément des participants. La colonne k de la matrice \mathcal{M}_{cr_chpt4} correspond aux réponses du sujet noté " P_k " pour tous les stimuli qu'il a évalués. Elle est donc constituée des notes d'agrément de chacun des sujets pour tous les stimuli écoutés individuellement. Elle possède donc 65 colonnes (variables) et 35 lignes (observations) correspondant aux 65 individus ayant écouté et évalué les 35 stimuli audio. À titre indicatif, le tableau de données est disponible en Annexe C.

B.2.2 Choix du nombre d'axes à conserver

Le choix du nombre de dimensions à conserver s'effectue suivant différents critères. Ces critères s'appuient sur l'analyse de l'évolution de l'inertie en fonction du nombre d'axes conservés. L'inertie I mesure la dispersion d'un nuage de points dans l'espace des principales dimensions construites par l'ACP. Il s'agit d'un calcul de variance pondéré par le vecteur des poids p .

$$I = \sum_{i=1}^I p_i \cdot \|x_i - \bar{x}\|^2 \quad (\text{B.3})$$

Ce vecteur des poids est utilisé lorsque l'on veut donner davantage d'importance à certaines observations plutôt qu'à d'autres. Pour toutes les ACPs effectuées dans ces travaux de thèse, le vecteur des poids est un vecteur unitaire. Cet indicateur d'inertie peut s'exprimer en fonction du nombre de dimensions conservées. Il devient alors un outil d'aide à la décision. Il permet de déterminer le nombre d'axes à conserver pour obtenir une qualité de représentation satisfaisante. Par exemple, lors du test perceptif décrit au chapitre 4, deux dimensions seulement ont été conservées. Ce choix a été dicté par l'analyse de la figure B.2 représentant l'inertie expliquée pour chacun des

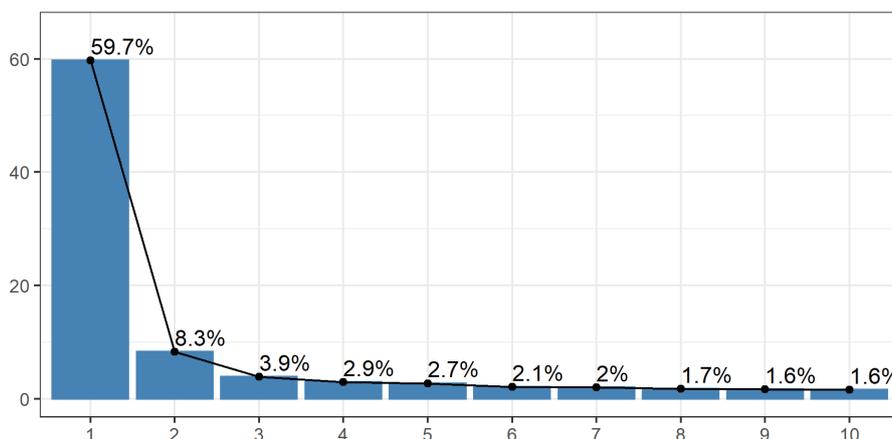


FIGURE B.2 – Décroissance du pourcentage d'inertie expliquée par axe de l'ACP.

axes. Le premier axe synthétise à lui seul 60% de la variabilité dans les données. Le second amène 8% de variance expliquée supplémentaire. La variance apportée par l'axe 3 est faible et est bien

inférieure à l'inertie apportée par les premiers axes. En conséquence, seules les deux dimensions principales synthétisant 68% de la variabilité totale du jeu de données ont été conservées.

Dans cet exemple, l'ACP vise à rendre compte des profils d'agrément qui ressortent du jeu de données selon les sujets. Pour rappel, Le nuage de points défini sur 65 dimensions est projeté sur le plan d'inertie maximal. Cette projection est présentée à la Figure B.3. Sur ce plan, on observe par exemple que les stimuli de travaux qu'ils proviennent de l'extérieur, ou de chez le voisin sont très proches dans le plan. Cela indique que les profils d'agrément pour ces deux stimuli sont très similaires. De la même manière, et à l'opposé sur la première dimension, les stimuli contenant des sons de nature sont également très proches. Les profils d'agrément pour ces deux stimuli sont donc aussi très similaires. Autre élément remarquable, les stimuli de nature sont très éloignés des stimuli de travaux sur ce plan. Les profils d'agrément entre ces deux groupes sont donc en conséquence très différents.

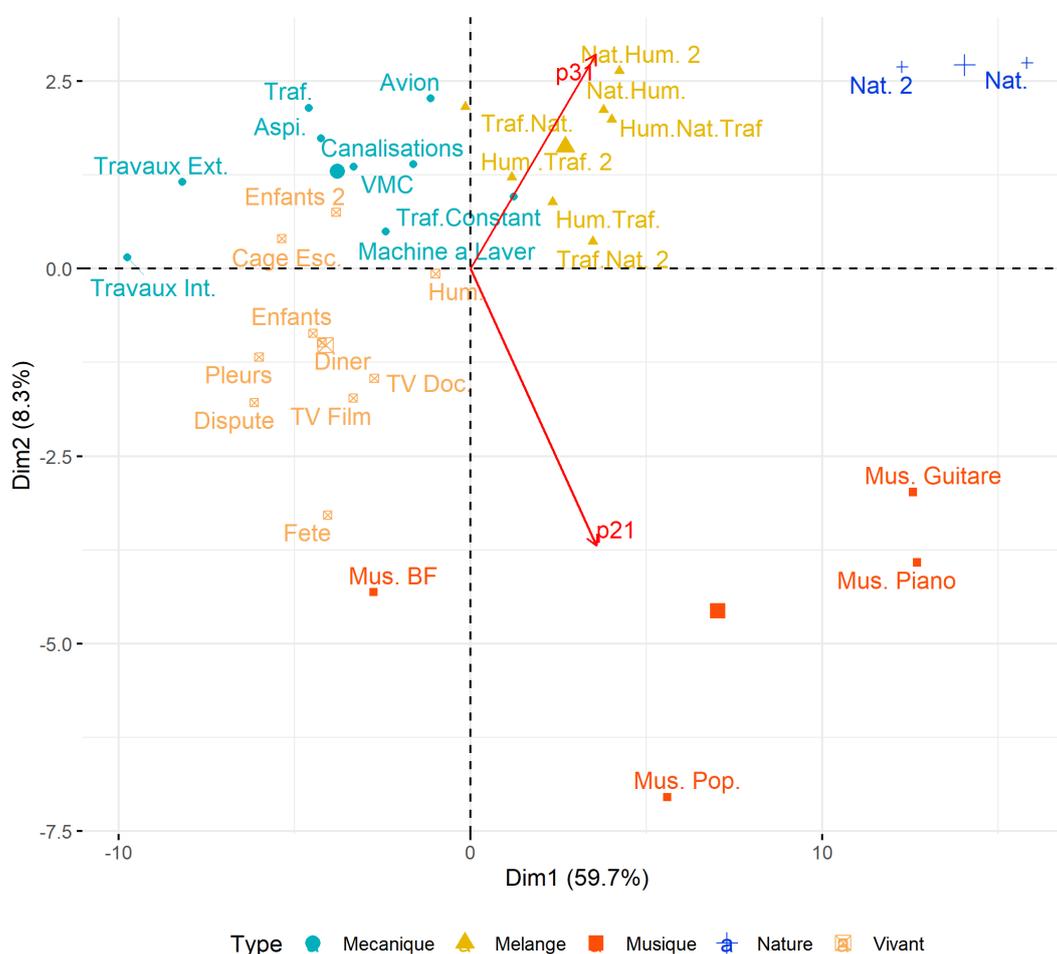


FIGURE B.3 – Représentation des stimuli sur le diagramme de corrélation de l'ACP.

Cependant, les premiers constats sur le premier axe d'inertie maximum n'explique pas encore en quoi par exemple les profils d'agrément pour les sons de travaux comparés aux sons de nature sont très différents. Pour comprendre la signification de ces facteurs, une matrice de corrélation particulière est construite. Dans un premier temps, les coordonnées de chaque observation sur chacun des axes sont relevées pour former autant de vecteurs F_s que d'axes. Par exemple suivant

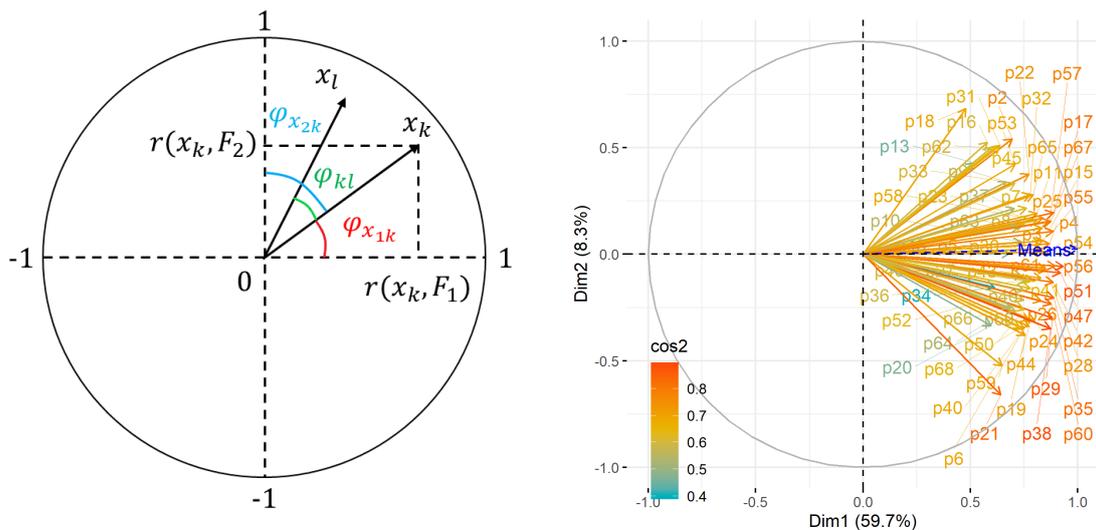
la dimension 1, on peut construire le vecteur des coordonnées de chacun des points projetés sur cet axe. On obtient alors un vecteur à 35 éléments correspondant aux 35 stimuli. L'étape d'après consiste à calculer la corrélation de chaque variable (profil de réponse par sujet) avec ce facteur nouvellement créé. Chaque coefficient de corrélation est défini comme suit :

$$r(x_k, F_s) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_{x_k}} \right) \left(\frac{F_{is} - \bar{F}_s}{s_{F_s}} \right) \quad (\text{B.4})$$

Avec :

- x_k , le profil d'agrément du participant k ;
- \bar{x}_k , l'agrément moyen du sujet k sur l'ensemble des stimuli ;
- F_s , le facteur principal ou dimension principale de variabilité de rang s ;
- \bar{F}_s , le moyenne des coordonnées du facteur F_s ;
- s_{x_k} , et s_{F_s} , respectivement les écart types du profil d'agrément du participant k , et du facteur F_s .

En effectuant ce calcul pour les deux premiers facteurs, on obtient un diagramme de corrélation comme illustré à la Figure B.4a pour les variables x_k , et x_l . Ce calcul de corrélation peut être effectué pour tous les participants $k = 1 \dots 65$. Pour les deux axes de variabilité maximum, on obtient le diagramme présenté à la Figure B.4b.



(A) Principe général.

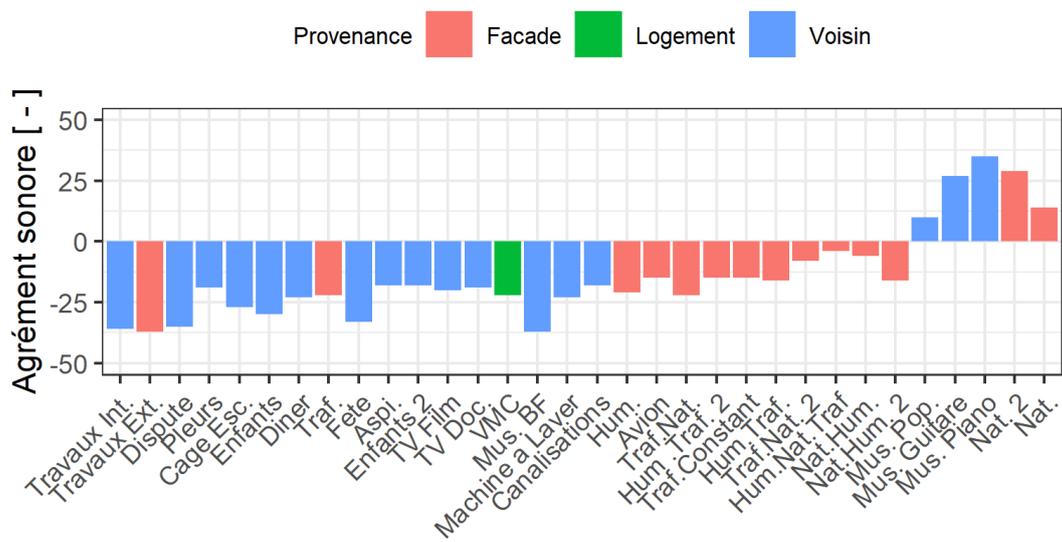
(B) Exemple d'application : La sémantique des sources.

FIGURE B.4 – Diagrammes de corrélation représentant les deux plus grandes dimensions de variabilité. (a) Principe général, et (b) Exemple d'application issu de l'ACP effectuée sur les résultats au premier test d'écoute décrit au chapitre 4.

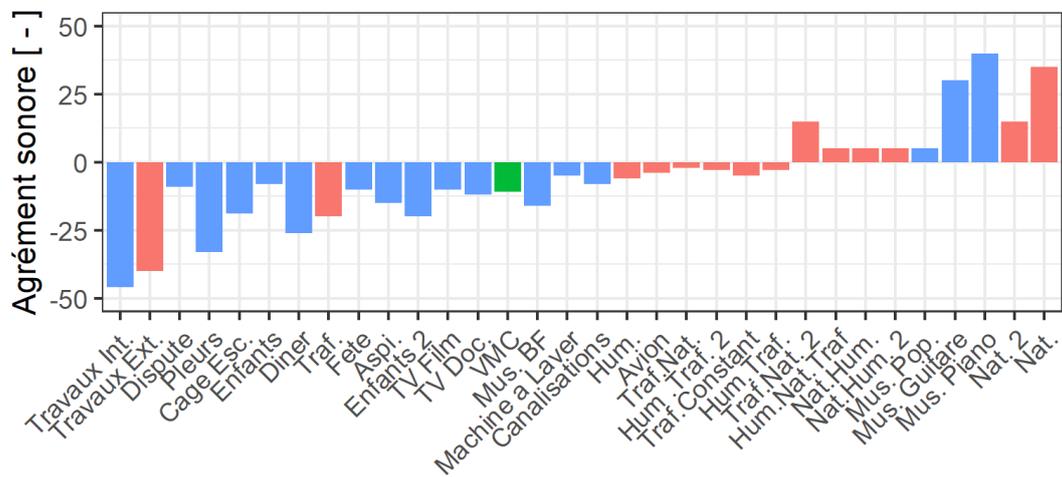
Cette représentation sous forme d'un diagramme de corrélation met en évidence la force des liaisons de chacun des sujets avec les deux axes de variabilité maximum. En reprenant l'exemple décrit au chapitre 4 et visible à la Figure B.4b, il apparaît que quasiment tous les sujets sont positivement et hautement corrélés à la première dimension. Le moins corrélé est le participant P18 avec une corrélation de tout de même 0.48 et les 3/4 des sujets ont une corrélation supérieure à 0.70. Sur cette dimension, tous les participants ont attribué des notes d'agrément élevées pour certains stimuli (les sons de nature, ou de musique classique), et au contraire des notes faibles pour d'autres stimuli (les travaux qu'ils viennent de l'extérieur ou de chez le voisin). Pour l'illustrer, trois

profils d'agrément sont représentés (voir Figure B.5). Les profils d'agrément des deux participants les plus corrélés à cette première dimension (P47, et P51) sont présentés et complétés du profil d'agrément moyen sur l'ensemble des sujets. Ce dernier profil est obtenu par un calcul de moyenne des notes d'agrément pour chaque stimulus audio sur l'ensemble des sujets.

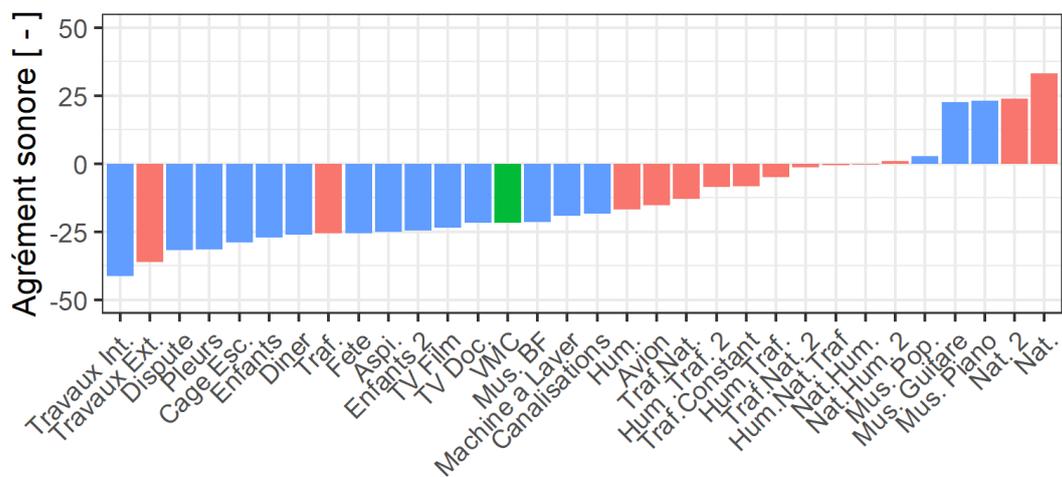
Le résultat principal est retrouvé. Les sons de nature, et de musique classique sont effectivement évalués positivement alors que ceux des travaux sont évalués négativement pour les deux sujets. Et puisque presque tous les sujets sont positivement et hautement corrélés à cette dimension, cela induit que ce résultat fait consensus. Ce résultat de consensus est également retrouvé pour un nombre conséquent de stimuli moins extrêmes. Par exemple, les stimuli de pleurs, des sons de cage d'escalier, ou de diner chez le voisin sont perçus négativement pour les deux participants, et les intrusions sonores issues de la façade vitrée contenant des bruits de trafic et de nature, ou de nature avec une présence humaine sont plus appréciés. Pour résumer, cette dimension ressort car un effet de taille est révélé avec certains sons avec de faibles valeurs d'agrément sur l'ensemble du panel, et d'autres avec des valeurs élevées. Une interprétation de cet axe est alors proposée. Il semble que cet axe représente la moyenne d'agrément des stimuli. Pour confirmer cette interprétation, un calcul de corrélation est effectué entre le vecteur du facteur F_1 des coordonnées des stimuli sur la dimension 1 et le vecteur des évaluations moyennes d'agrément. Le résultat donne une corrélation supérieure à 0.99 entre ces deux vecteurs comme illustré à la Figure B.5c sous la forme d'une flèche bleue. On observe qu'en contraste, ce vecteur des évaluations moyennes n'est pas du tout corrélé au second axe de variabilité maximum ($r(F_2, x_{mean}) = 0.02$).



(A) Participant P47.



(B) Participant P51.



(C) Profil moyen.

FIGURE B.5 – Profils d'agrément sonore en fonction du stimulus audio (a) Participant P47, (b) Participant P51, et (c) Profil d'agrément moyen sur l'ensemble des sujets.

La seconde dimension synthétise 8% de la variabilité totale. Les stimuli qui contribuent le plus à cette dimension sont des stimuli musicaux (voir Figure B.3). En effet, les profils d'agrément des sons musicaux ont des coordonnées élevées en valeurs absolues sur cette dimension (Exemples de la musique pop., classique, et hip-hop). De plus sur la seconde dimension, des oppositions entre participants sont mises en évidence puisqu'un groupe est positivement corrélé à cette seconde dimension et l'autre l'est négativement (voir Figure B.4b). Afin d'interpréter cette seconde dimension et comprendre en quoi les sons musicaux ont créé des oppositions de point de vues entre les sujets, les profils d'agrément pour les sons musicaux des participants P21, et P31 (opposés sur la dimension 2) sont présentés à la Figure B.6. Sur cette figure est illustrée une opposition d'appréciation entre ces deux participants à l'égard des sons musicaux. Le participant P21 apprécie 3 des 4 stimuli musicaux alors que le participant P31 n'apprécie aucun des stimuli de sons musicaux provenant de chez le voisin.

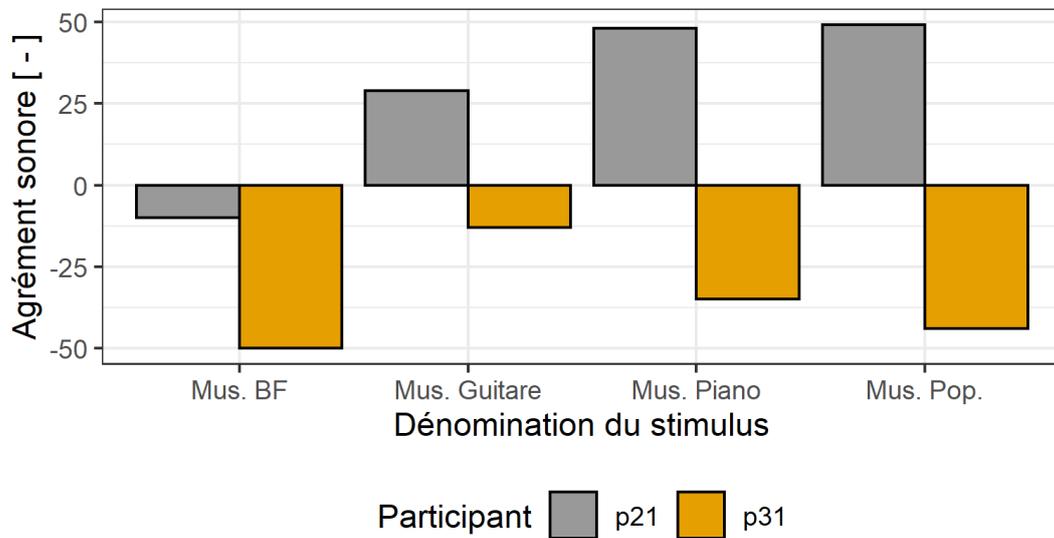


FIGURE B.6 – Profil d'agrément sonore des sources musicales évaluées par les participants P21, et P31 au test perceptif présenté au Chapitre 4.

On déduit qu'une corrélation élevée positive comme pour le participant P31 correspond à un rejet des sons musicaux alors qu'une corrélation élevée négative sur ce second axe correspond une tolérance accrue à l'égard de ces sons musicaux. Cette seconde dimension caractérise donc les préférences musicales du panel de sujets.

Par l'intermédiaire de cet exemple, il a été possible d'illustrer comment interpréter une ACP.

B.3 Application de l'ACP dans \mathbb{R}^I

Une autre façon de rendre compte de la construction des axes de l'ACP est envisagée sous l'angle de l'étude des variables. En repartant du tableau de données centrées réduites \mathcal{M}_{cr} , les 65 variables peuvent être représentées dans un espace à I dimensions comme illustré à la Figure B.7. Dans l'exemple du chapitre 4, $I = 35$ ce qui correspond au nombre de stimuli sonores qui ont été évalués. L'objet d'étude est ici le nuage des variables. Par application de la définition du cosinus, on définit le cosinus de l'angle entre deux variables θ_{kl} :

$$\cos(\theta_{kl}) = \frac{\langle x_k, x_l \rangle}{\|x_k\| \cdot \|x_l\|} = \frac{\sum_{i=1}^I x_{ik} \cdot x_{il}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I x_{ik}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^I x_{il}^2}} \quad (\text{B.5})$$

Puisque les données sont centrées (la moyenne vaut 0), on identifie l'expression de la corrélation entre deux variables. Il suit :

$$\cos(\theta_{kl}) = r(x_k, x_l) \quad (\text{B.6})$$

Pour la construction des axes principaux, le calcul de l'ACP vise à trouver les facteurs les plus liés à toutes les variables du tableau initial de données. Ces axes sont obtenus par maximisation de la quantité suivante :

$$\sum_{k=1}^K (r(v_s, x_k))^2 \quad (\text{B.7})$$

Avec :

- v_s la variable synthétique de rang s qui résume le mieux l'ensemble des variables ;
- x_k , la variable du tableau de donnée d'indice k ;
- v_t , et v_s orthogonaux pour $t < s$.

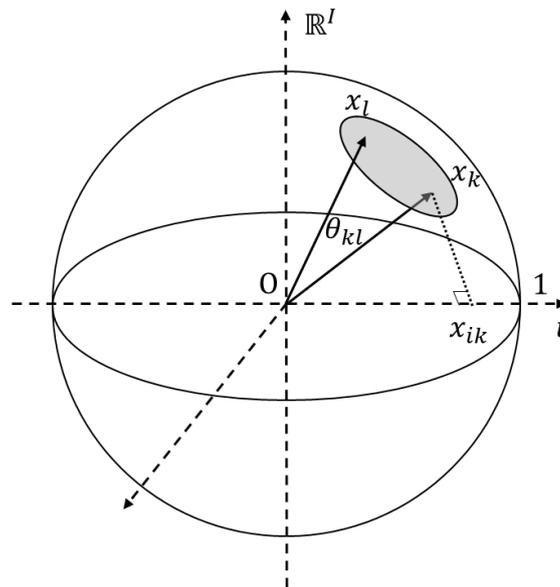


FIGURE B.7 – Représentation des variables suivant l'hypersphère de rayon 1.

En effectuant cette maximisation, on obtient exactement les mêmes résultats (les mêmes axes) et les mêmes représentations que ceux obtenus en appliquant l'approche visant à maximiser la somme des projections au carré présentée initialement à l'équation B.2.

En application de l'équation B.6, les liens entre les variables présentés à la Figure B.4b peuvent être interprétés sous un nouvel angle. Dans l'espace à I dimensions le cosinus de l'angle entre deux variables est égal à la corrélation entre celles-ci. Dans le cas d'une projection de ces variables dans le plan de l'ACP, et dans le cas où les variables sont bien projetées c'est à dire que les corrélations des variables sur les deux axes sont élevées, l'angle de la projection est très proche de l'angle initial θ_{x_k, x_l} , on peut alors écrire :

$$\cos(\varphi_{x_k, x_l}) \simeq r(x_k, x_l) \quad (\text{B.8})$$

φ_{x_k, x_l} est alors proche de θ_{x_k, x_l} lorsque la projection des deux variables dans le plan de l'ACP est bonne. Ainsi les angles traduisent les liaisons entre variables. Lorsque deux variables sont bien

projetées, si l'angle entre elles est faible, alors elles sont fortement corrélées, et si l'angle entre elles est de $\pi/2$, cela traduit une absence de lien entre ces deux variables. Par exemple sur la Figure B.4b, les participants P56 et P51 sont très liés. Au contraire, les sujets P21, et P31 ne sont pas corrélés.

Des indicateurs permettent d'évaluer la qualité de représentation d'une variable. L'indicateur le plus communément utilisé est le \cos^2 . Il est défini comme le cosinus au carré de l'angle entre une variable d'indice k , et sa projection sur un axe, ou sur un plan. Une variable dont l'indicateur \cos^2 est proche de 1 est une variable bien projetée. Cet indicateur se calcule comme suit :

$$\cos(\varphi_{x_1k})^2 + \cos(\varphi_{x_2k})^2 \quad (\text{B.9})$$

Un second indicateur de qualité de représentation des variables est utilisé, il s'agit de l'indicateur de contribution d'une variable à un axe. Il est défini comme suit :

$$C_{tr,s}(k) = \frac{(r(x_k, v_s))^2}{\sum_{k=1}^K r(x_i, v_s)^2} \quad (\text{B.10})$$

Il existe un indicateur analogue visant à quantifier la contribution d'un profil d'observations (une ligne du tableau) à la construction d'un axe. Cet indicateur est défini comme suit :

$$C_{tr,s}(i) = \frac{F_{i,s}^2}{\sum_{i=1}^I F_{i,s}^2} \quad (\text{B.11})$$

Annexe C

Tableau de données du premier test perceptif sur la sémantique des sources (Chapitre 4)

	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p13	p15	p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24	p25	p26	p27	p28	p29
Traf.	-20	-15	-45	-37	-30	4	40	-25	-24	-35	-15	-8	-17	-37	-16	-18	-32	-50	-50	-25	-50	-20	-44	-38	-17	-18
Traf.Constant	-10	-11	-2	-7	-2	20	-20	0	-20	-31	-10	-19	-31	-9	-5	-8	-14	-40	-35	0	-38	7	-14	7	-38	-9
Hum.Traf.	15	-5	0	-2	7	20	-20	-15	-30	-31	0	-7	-3	6	-5	-4	-9	-21	-20	-15	-41	0	-30	0	-5	-6
Hum.Traf.2	-25	-11	-8	-5	-15	-4	-45	-10	-3	38	-1	-7	-18	-32	-6	-9	-16	-46	-3	-5	-33	0	-33	15	-6	-10
Traf.Nat.	0	3	-17	-20	-13	-2	0	-10	-27	-43	-6	-14	-13	-46	21	-15	22	-50	3	-15	-45	-5	-12	-10	-26	-18
Traf.Nat.2	5	-6	0	-3	15	-23	-3	-3	3	28	-20	-10	-5	24	-4	-5	-16	-39	-30	-15	-29	-3	-9	15	-7	-7
Nat.Hum.	20	-24	0	-3	14	32	-30	0	-10	35	-13	13	17	35	15	-18	4	-43	-7	30	-20	8	-24	30	-2	5
Nat.Hum.2	30	-7	-12	15	-22	37	8	-2	-14	31	0	18	13	-2	-9	-5	18	-48	-5	0	-39	-7	-14	9	-4	-3
Hum.	-15	-10	-35	-8	-48	15	-14	-10	-45	-40	-20	3	-6	-14	-14	-16	-12	-33	-6	-10	-41	-25	-46	19	-18	-5
Nat.	50	27	46	32	50	43	26	20	49	34	15	24	20	50	50	4	38	-15	45	40	44	50	49	40	25	50
Hum.Nat.Traf	20	-4	0	11	7	-1	-10	-12	-6	-38	-5	9	19	4	25	-10	11	-41	-21	-15	-3	15	-31	21	3	7
Travaux Ext.	-16	-29	-50	-12	-38	-8	-47	-49	-46	-50	-25	-41	-7	-50	-5	-15	6	-50	-50	-43	-50	-50	-46	-20	-43	-46
Aspi.	-10	-25	-46	-35	-21	-25	-40	-20	-41	-41	-6	-41	1	-50	17	-18	-26	-46	-20	-14	-42	-10	-35	-39	-18	-33
Machine a Laver	-40	-4	-38	-11	-3	-9	-49	-17	-11	-38	-8	-17	-29	-46	15	-19	10	-38	-45	-23	-40	-6	-26	-15	-8	-7
Canalisations	-30	-5	-14	-25	-29	-5	-48	-15	-4	-42	0	-11	-35	-25	0	-37	-28	-47	-25	18	-10	-25	-34	-37	-18	-17
Diner	-40	-23	-50	-6	-49	2	-45	-5	-41	-49	-33	-36	0	-45	-16	-16	29	-28	-35	-5	-15	-7	-43	-25	-13	-25
Fete	-50	-28	-48	-7	-10	-21	-48	-30	-43	-50	-30	-33	-50	-50	-22	-12	39	-10	-45	-10	-43	-24	-44	-12	-21	-17
Dispute	-50	-32	-48	-47	-50	-11	-47	-10	-7	-50	-20	-44	-50	-50	-50	-34	-31	-37	-50	-40	-31	-50	-47	0	-10	-28
Enfants	-50	-20	-46	-10	-39	-9	-44	-5	-31	-49	-30	-30	-50	-50	-28	-11	-36	-42	-36	-20	-35	-12	-41	12	-20	-7
TV Doc.	-30	-34	-21	-10	1	6	-50	-15	-7	-50	-12	-9	-50	-50	-9	-3	19	-36	-40	-25	3	-35	-24	14	-11	-1
TV Film	-40	-25	-39	-6	3	-2	-48	-13	-33	-36	-3	-41	-31	-50	-33	-6	18	-4	-40	-15	-6	-30	-29	-11	-16	-4
Mus. BF	-50	-39	-47	-25	44	-25	-49	-25	-24	-50	-30	-41	-50	-50	-40	-12	11	-10	-50	-20	-38	-19	-21	-24	-22	-2
Mus. Pop.	-29	8	0	14	43	-26	-10	-25	-4	-49	-26	6	-48	-50	-36	10	41	49	-30	-25	42	8	4	14	8	44
Pleurs	-50	-26	0	-49	-50	-30	-50	-40	-19	-50	0	-41	-49	-50	-36	-5	-25	-50	-50	-49	-27	-37	-30	-10	-50	-27
Cage Esc.	-50	-2	-36	-47	-40	-3	-47	-20	-7	-48	-5	-45	-50	-50	0	-18	-11	-49	-15	-35	-50	-49	-44	-32	-25	-2
Travaux Int.	-50	-29	-49	-49	-50	-31	-30	-50	-49	-50	-26	-44	-50	-50	0	-40	-50	-50	-50	-50	-50	-40	-45	-31	-45	-29
VMC	-49	-3	-31	-4	-46	-9	-50	-7	-30	-41	-8	-38	-25	-47	-7	-9	-35	-35	-30	-15	-50	0	-39	-18	-16	-26
Mus. Guitare	10	19	32	18	19	46	31	-10	-5	42	-2	25	-9	50	-10	32	18	29	-4	25	33	10	39	24	22	40
Avion	20	-22	-22	-5	-49	-8	-35	-10	-32	-46	-20	-18	-32	-35	-4	-24	-24	-29	-10	-33	-37	-10	-31	-39	-8	-2
Enfants 2	-5	-21	0	-29	-32	-5	-17	-25	-27	-49	0	-38	-33	-42	-13	-22	-27	-50	0	-21	-50	-20	-38	11	-11	-13
Nat.2	30	32	6	47	32	34	0	20	5	50	0	-11	0	50	45	5	33	13	40	10	50	15	-31	30	15	23
Mus. Piano	-25	19	31	15	50	46	-28	-15	4	45	-1	24	-5	50	-10	27	40	48	5	10	41	9	28	36	18	47

	p30	p31	p32	p33	p34	p35	p36	p37	p38	p40	p41	p42	p43	p44	p45	p46	p47	p48	p49	p50	p51	p52	p53	p54	p55
Traf.	-5	-6	-18	25	-17	-38	20	-36	-20	-20	-50	43	40	-50	10	4	-22	-30	0	-37	-20	-40	-15	-41	-23
Traf:Constant	9	-44	-20	10	-27	-13	30	20	-6	-6	-25	-11	20	-50	-47	15	-15	-5	-3	-4	-5	-4	8	-37	-7
Hum.Traf.	8	-4	-5	-25	23	-13	20	-26	-15	8	0	-8	10	-25	-28	8	-16	-5	-1	-2	-3	35	-5	-12	-10
Hum.Traf. 2	-2	-26	-9	5	-7	-18	20	-20	2	-13	0	-10	-20	-50	36	9	-15	-20	-18	-8	-3	4	-10	-17	-13
Traf:Mat.	-7	-22	-16	25	-19	-45	-10	-16	-30	-4	-30	4	-10	-25	-5	5	-22	-50	-10	-10	-2	-23	-2	19	-18
Traf:Mat. 2	5	-48	1	-20	-18	-13	10	-16	-17	10	10	19	21	25	46	5	-8	0	-8	0	15	15	-13	-18	6
Nat:Hum.	12	15	6	-20	-47	-28	50	-32	15	27	-5	7	-9	-25	47	22	-6	10	-12	-15	5	31	-27	-9	5
Nat:Hum. 2	9	-3	6	-20	-8	-19	40	-20	14	-7	-5	37	5	-50	50	4	-16	0	-18	17	5	5	-5	13	15
Hum.	4	-47	-28	-25	-24	-22	20	-32	-18	-4	0	-29	-15	-50	-31	6	-21	-25	4	-6	-6	-7	-32	-13	-2
Nat.	49	24	32	45	38	26	50	42	36	25	15	49	15	50	49	43	14	3	41	26	35	40	23	50	50
Hum:Mat:Traf	2	24	8	-15	-7	-28	25	-26	10	42	-5	38	-20	-50	42	7	-4	0	-3	-24	5	20	-3	11	10
Travaux Ext.	-20	-50	-25	-40	48	-46	15	-46	-36	-50	-50	-50	-30	-50	-50	3	-37	-40	-13	-50	-40	-40	-22	-50	-10
Aspi.	-9	-49	-28	47	-9	-34	10	16	-35	-4	-25	-46	-40	-50	-2	3	-18	-5	-39	-19	-15	-19	-12	-36	-10
Machine a Laver	-3	-31	-25	-10	-24	-22	-20	16	-20	-35	-40	-15	-15	-50	-32	6	-23	-20	-43	-27	-5	-50	-12	-46	-30
Canalisations	-3	-43	-5	-5	-40	-40	10	-16	-32	-10	-50	-43	-15	-50	-47	8	-18	0	-4	-10	-8	-11	-5	0	-45
Diner	0	-43	-8	-35	-25	-26	30	-36	-22	6	-16	-49	-20	-50	-47	3	-33	-45	-50	-29	-26	-3	-39	-30	-47
Fete	-9	-48	-10	-35	-5	-26	30	-46	-12	20	0	-23	-30	-25	-50	8	-33	-45	-3	13	-10	-15	-43	-30	-50
Dispute	-4	-50	-31	-45	4	-39	-20	-42	-30	7	-50	-14	-25	-50	-50	2	-35	-50	-50	-50	-9	-9	-24	-36	-5
Enfants	3	-48	-13	-35	-20	-30	10	-42	-19	-7	-50	-50	-25	-50	-3	8	-30	-25	-50	-16	-8	-15	-44	-25	-17
TV Doc.	4	-50	-28	-40	-3	-31	10	-26	-19	-5	-40	-50	-30	-50	-50	4	-19	-10	48	-19	-12	-9	-30	-23	-32
TV Film	-9	-31	-26	-40	4	-40	10	-42	-17	-20	-40	-45	-20	-50	-50	4	-20	-15	-35	-20	-10	-31	-37	-28	-28
Mus. BF	-4	-50	-28	-25	8	-27	30	-46	3	35	-15	16	-30	-50	-48	3	-37	40	-5	23	-16	-30	-41	6	-11
Mus. Pop.	-4	-44	-16	-25	9	12	50	-32	50	44	-10	39	10	50	-42	31	10	30	13	28	5	50	-32	-6	2
Pleurs	-1	-50	-23	-38	-50	-28	-25	-46	-34	-20	-15	-49	-50	-50	-50	15	-19	-25	-18	-50	-33	-50	-50	-33	-50
Cage Esc.	-13	-24	-23	-50	-14	-47	-20	-50	-29	-35	-40	-50	-5	-50	-2	11	-27	-45	-34	-44	-19	-11	-50	-34	-39
Travaux Int.	-17	-50	-20	-50	-50	-39	-49	-50	-44	46	-50	-50	-40	-50	-50	3	-36	-50	-50	-30	-30	-46	-50	-50	-43
VMC	0	-50	-26	-15	-50	-20	0	32	-26	-11	-25	-25	-25	-50	8	3	-22	-40	-42	-12	-11	-16	-8	-39	3
Mus. Guitare	32	-13	2	5	-3	15	50	26	50	50	30	50	40	25	8	37	27	-15	36	24	30	25	5	24	40
Avion	-30	-6	-19	10	-28	-23	20	-32	-23	-15	0	-45	-40	-50	14	33	-15	0	9	-19	-4	-11	17	-20	-18
Enfants 2	18	-35	-33	-25	-36	-33	0	-36	-35	-40	-50	-35	-30	-50	17	6	-18	-30	-28	-13	-20	-7	-50	-22	-29
Nat. 2	50	46	10	45	44	20	50	46	14	50	5	50	20	-15	50	18	29	3	0	21	15	23	15	50	50
Mus. Piano	36	-35	-5	20	4	15	50	36	50	40	25	50	30	25	24	34	35	10	50	11	40	50	10	32	49

	p56	p57	p58	p59	p60	p61	p62	p63	p64	p65	p66	p67	p68	p69
Traf.	-50	-49	25	-36	-30	-50	-42	-33	-26	-25	-10	-19	-45	-50
Traf.Constant	-20	8	26	0	-10	-25	0	38	0	46	-5	15	-7	-50
Hum.Traf.	-14	10	25	-20	-20	-23	-16	19	-17	-14	-10	10	-10	0
Hum .Traf. 2	-26	5	19	-12	-20	-6	-36	4	-7	-17	10	5	-19	-15
Traf.Nat.	-29	-15	13	-4	-25	-28	-21	31	0	10	-15	-16	-20	-20
Traf.Nat. 2	-15	0	12	10	10	-7	0	24	-1	0	-2	16	-19	-40
Nat.Hum.	-15	35	-24	-10	-25	-27	-40	21	-10	4	-5	-10	-27	-15
Nat.Hum. 2	-24	41	31	-8	-20	-20	-30	23	0	30	8	10	-20	-41
Hum.	-18	26	-22	-9	-30	-12	-50	-5	-8	-30	4	-4	-24	-25
Nat.	24	49	50	0	40	31	41	40	8	50	-5	43	30	-11
Hum.Nat.Traf	-35	15	38	-5	-20	13	-33	21	0	-6	-5	20	5	-44
Travaux Ext.	-41	-41	-35	-40	-50	-48	-37	-25	-44	-50	-38	-45	-50	-50
Aspi.	-49	-40	-42	-25	-30	-23	-32	-33	-15	-31	-13	-10	-29	-50
Machine a Laver	-33	-6	-18	-10	-25	-12	-44	5	-11	-3	-18	-23	-4	-30
Canalisations	-38	5	10	0	-30	-27	-10	-3	0	-8	-7	-5	0	-50
Diner	-23	-46	-33	-5	-20	-22	-50	-11	-26	-46	-25	-38	-20	-50
Fete	-32	-49	-34	-6	-20	-20	-50	-32	-26	-49	-25	-34	-25	-43
Dispute	-37	-50	-50	-10	-25	-40	-50	-22	1	-50	-31	-15	-9	-50
Enfants	-49	-32	-43	-20	-20	-37	-50	-19	-33	-45	0	-15	-17	-50
TV Doc.	-39	-18	-40	0	-25	-23	-43	5	-36	-12	-17	-2	-17	-50
TV Film	-29	-11	-24	-5	-25	-20	-50	-15	-15	-35	-23	-9	-17	-50
Mus. BF	-28	-26	-26	-5	-35	-19	-50	-16	12	-45	-20	-11	10	-24
Mus. Pop.	-21	5	30	15	25	25	-8	-50	-11	10	20	11	-21	3
Pleurs	-50	-49	-28	0	-10	-50	-23	50	0	-49	-45	-10	-10	-40
Cage Esc.	-50	-3	-17	-20	-30	-40	-36	-29	0	-25	-30	-28	-5	-50
Travaux Int.	-50	-30	-50	-10	-50	-38	-50	-23	-47	-44	-35	-43	-34	-50
VMC	-41	-20	-40	-20	-20	-26	-20	-17	-6	-30	-35	-21	-26	-50
Mus. Guitare	14	49	35	25	25	46	-26	48	17	-5	35	35	21	25
Avion	-50	8	30	-20	-20	-23	-6	10	-14	0	-35	-1	-32	-20
Enfants 2	-27	-40	-50	-14	-20	-45	-49	-14	-20	-43	-20	-29	-15	-27
Nat. 2	30	50	50	0	30	23	20	31	0	50	-7	50	7	-27
Mus. Piano	10	49	49	30	35	-4	-34	46	38	10	40	35	35	0

Annexe D

Résultats du test perceptif sur la superposition des sources (Chapitre 5)

Afin de rendre les résultats bruts lisibles, une forme particulière de représentation graphique a été choisie. Elle consiste à filtrer les résultats en fonction des stratégies choisies par les sujets. Ce filtrage préliminaire a été effectué par évaluation de l'ordre croissant des niveaux appliqués aux pistes sonores pour chacune des superpositions de sources, et pour chacun des participants. Sept stratégies d'ajustements des niveaux ont été définies :

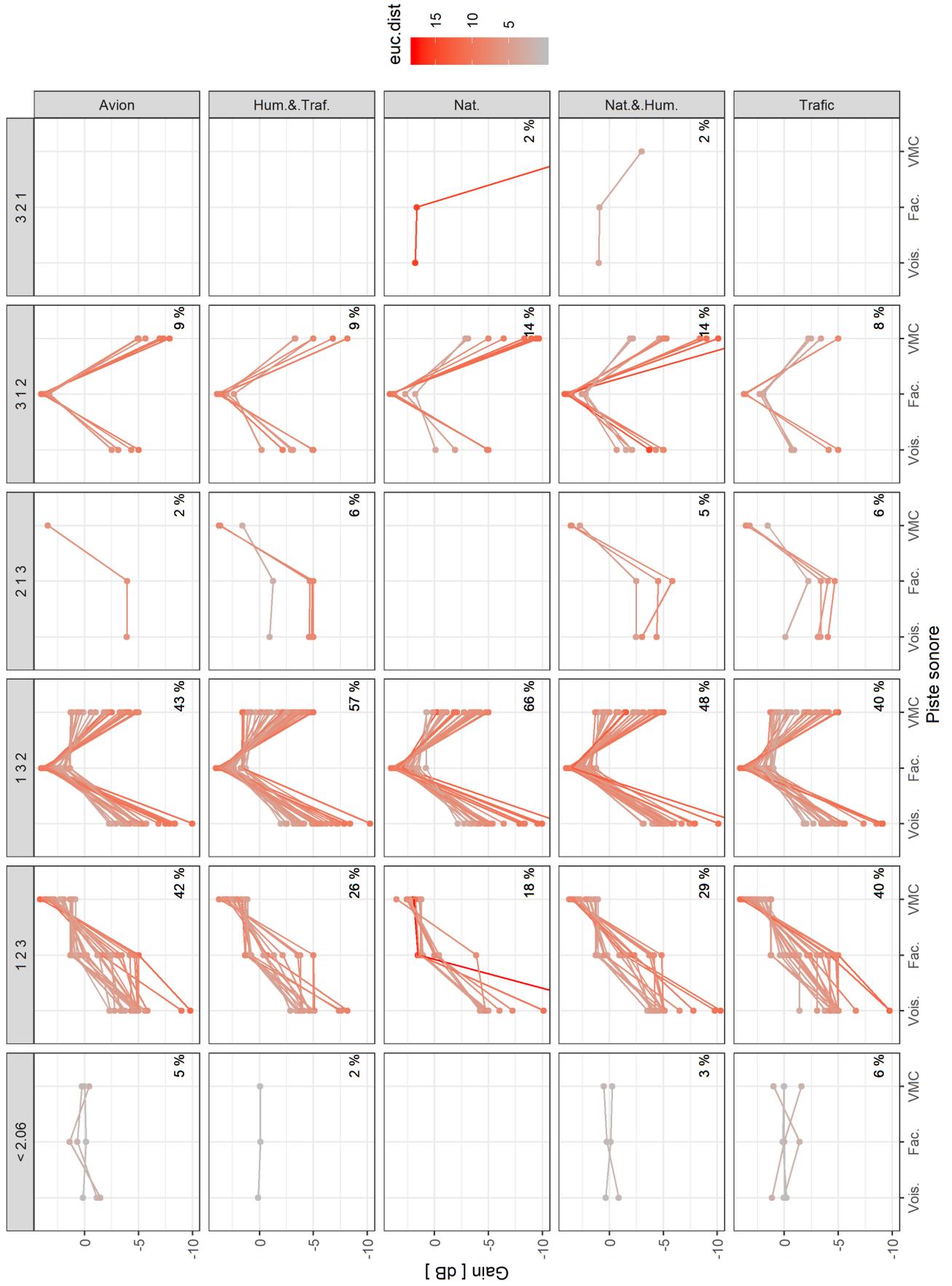
- Ordre 123 : $L_{eq_voisin} < L_{eq_facade} < L_{eq_vmc}$;
- Ordre 132 : $L_{eq_voisin} < L_{eq_vmc} < L_{eq_facade}$;
- Ordre 213 : $L_{eq_facade} < L_{eq_voisin} < L_{eq_vmc}$;
- Ordre 231 : $L_{eq_facade} < L_{eq_vmc} < L_{eq_voisin}$;
- Ordre 312 : $L_{eq_vmc} < L_{eq_voisin} < L_{eq_facade}$;
- Ordre 321 : $L_{eq_vmc} < L_{eq_facade} < L_{eq_voisin}$.

Le septième ordre est défini lorsque les niveaux relatifs entre les trois sources sont faibles. Un calcul de distance est d'abord effectué :

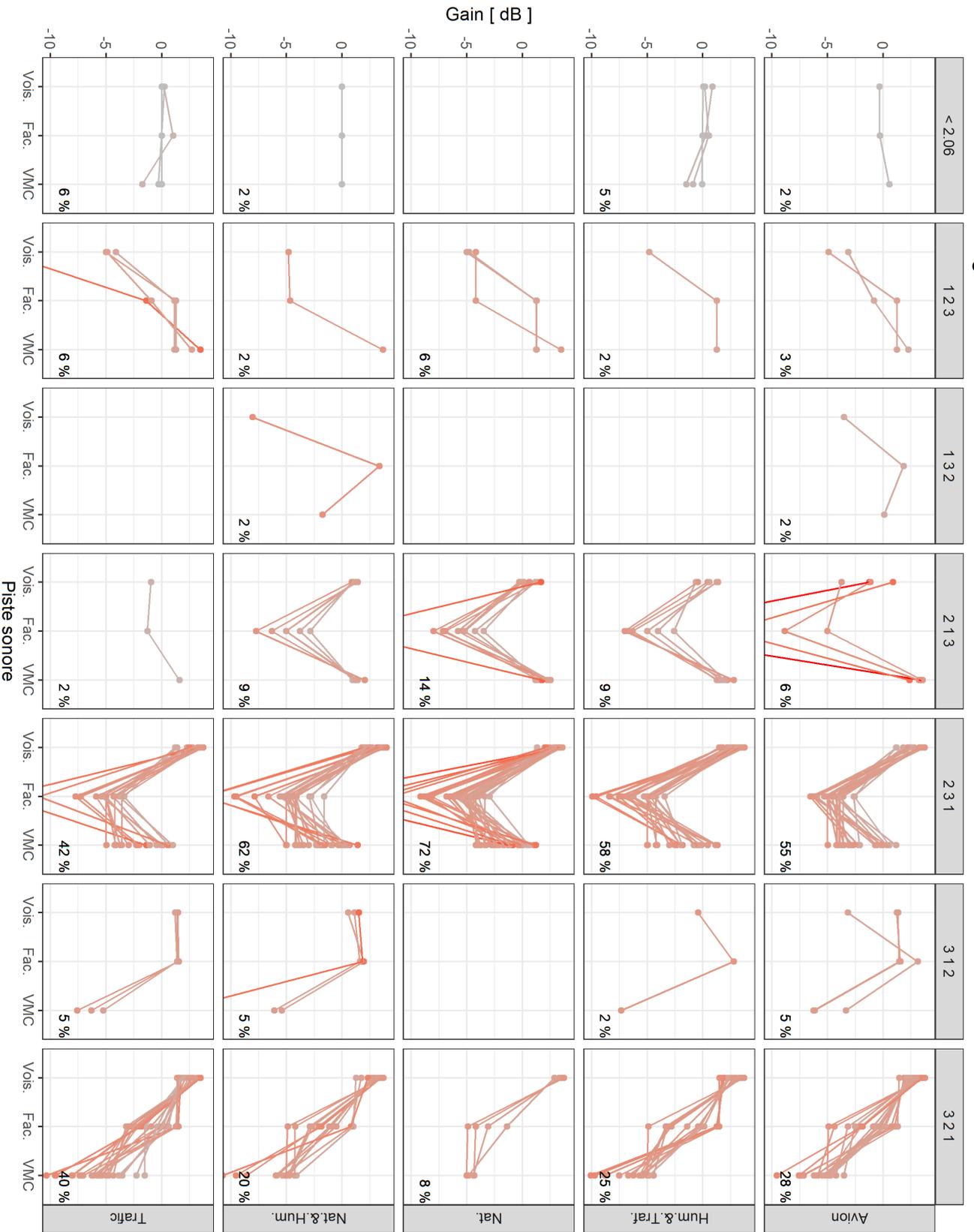
$$euc.dist = \sqrt{L_{eq_voisin}^2 + L_{eq_facade}^2 + L_{eq_vmc}^2} \quad (D.1)$$

Le critère choisi pour définir cette stratégie d'optimisation est de 2.06. En deçà de cette valeur, la situation sonore est constituée d'un mélange des trois sources à des niveaux relatifs faibles. Enfin, sur chacun des graphiques est indiqué un pourcentage décrivant la proportion de participants ayant opté pour la stratégie en question.

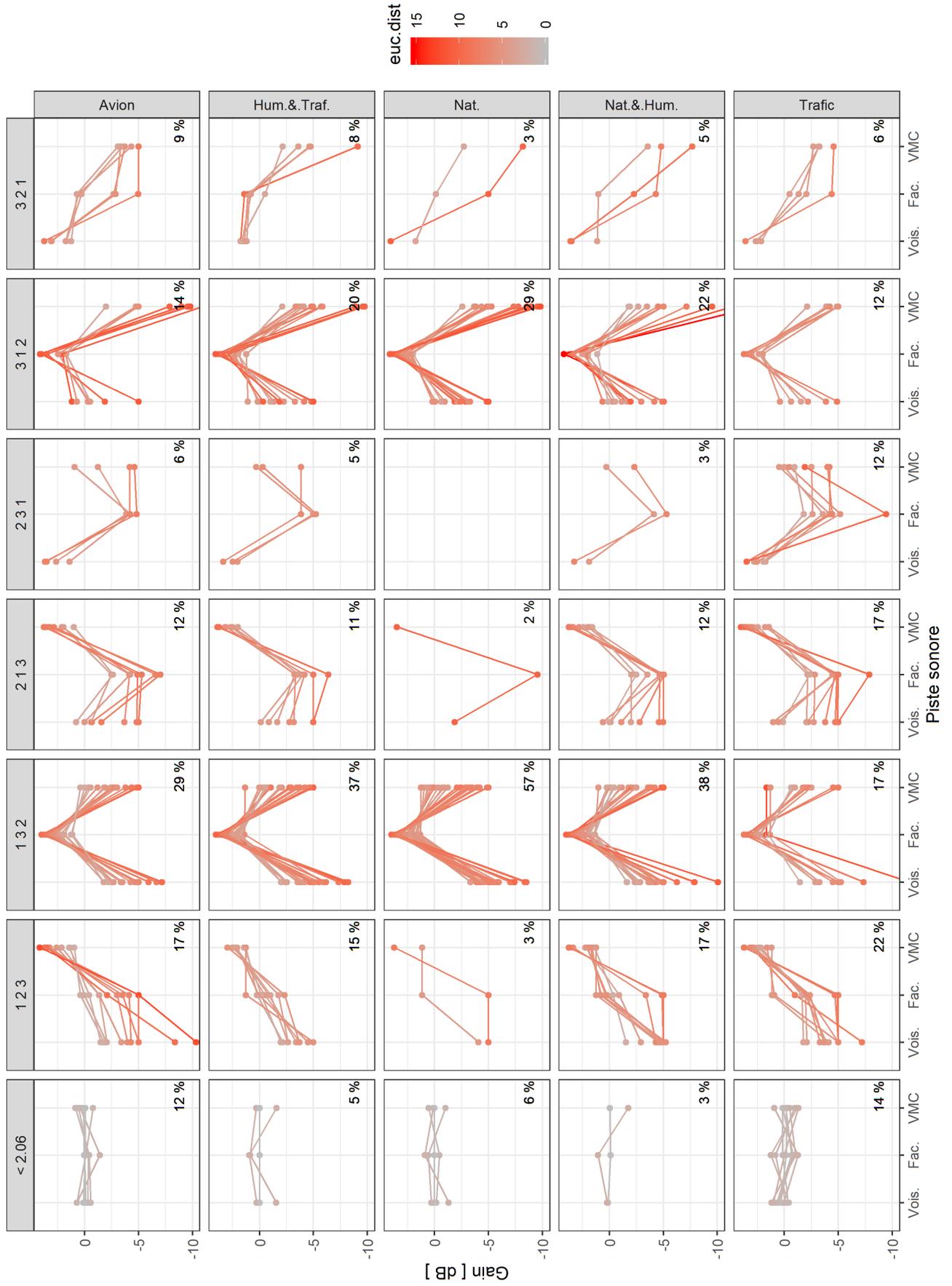
Travaux - Le plus agréable



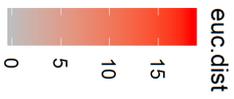
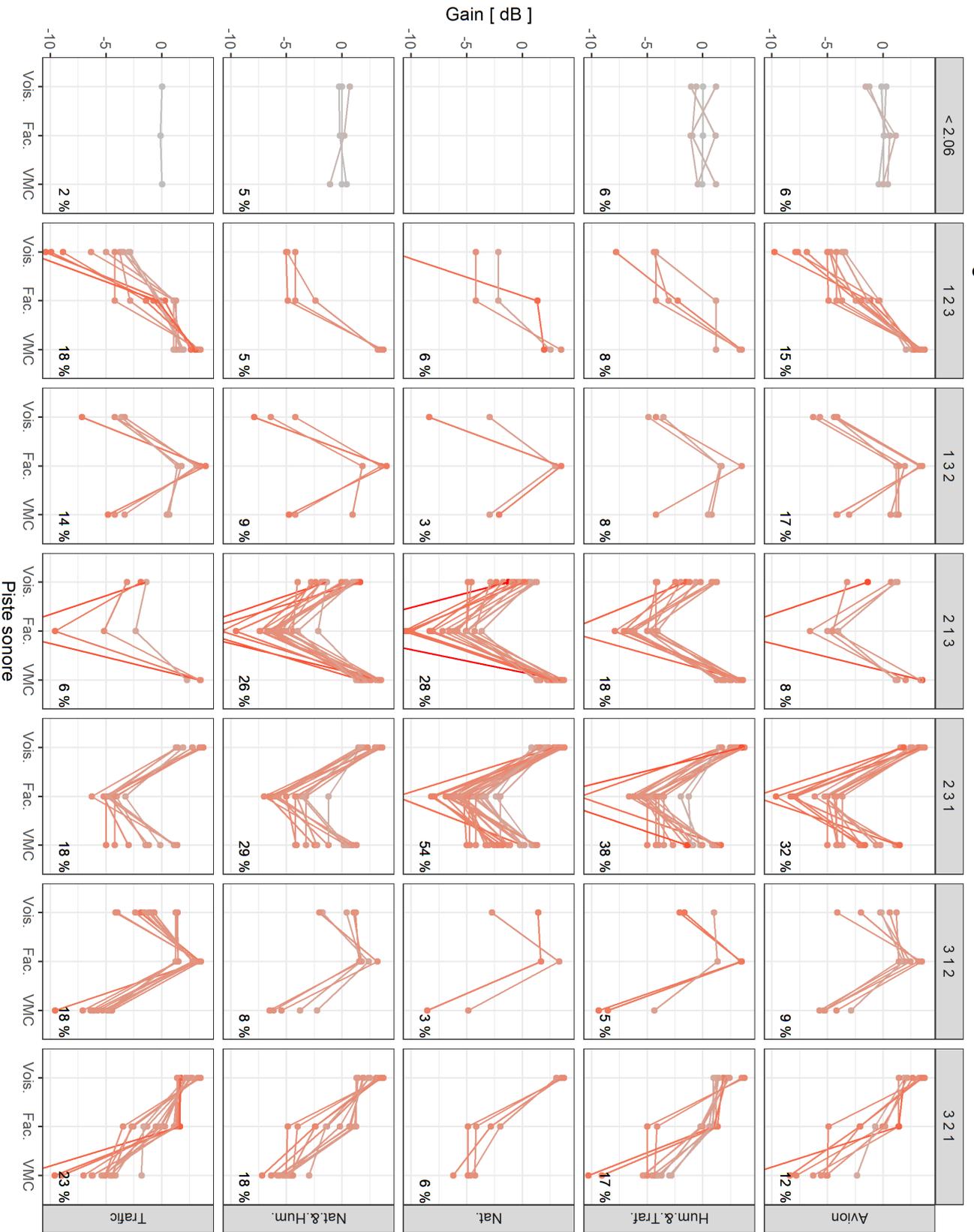
Travaux - Le moins agréable



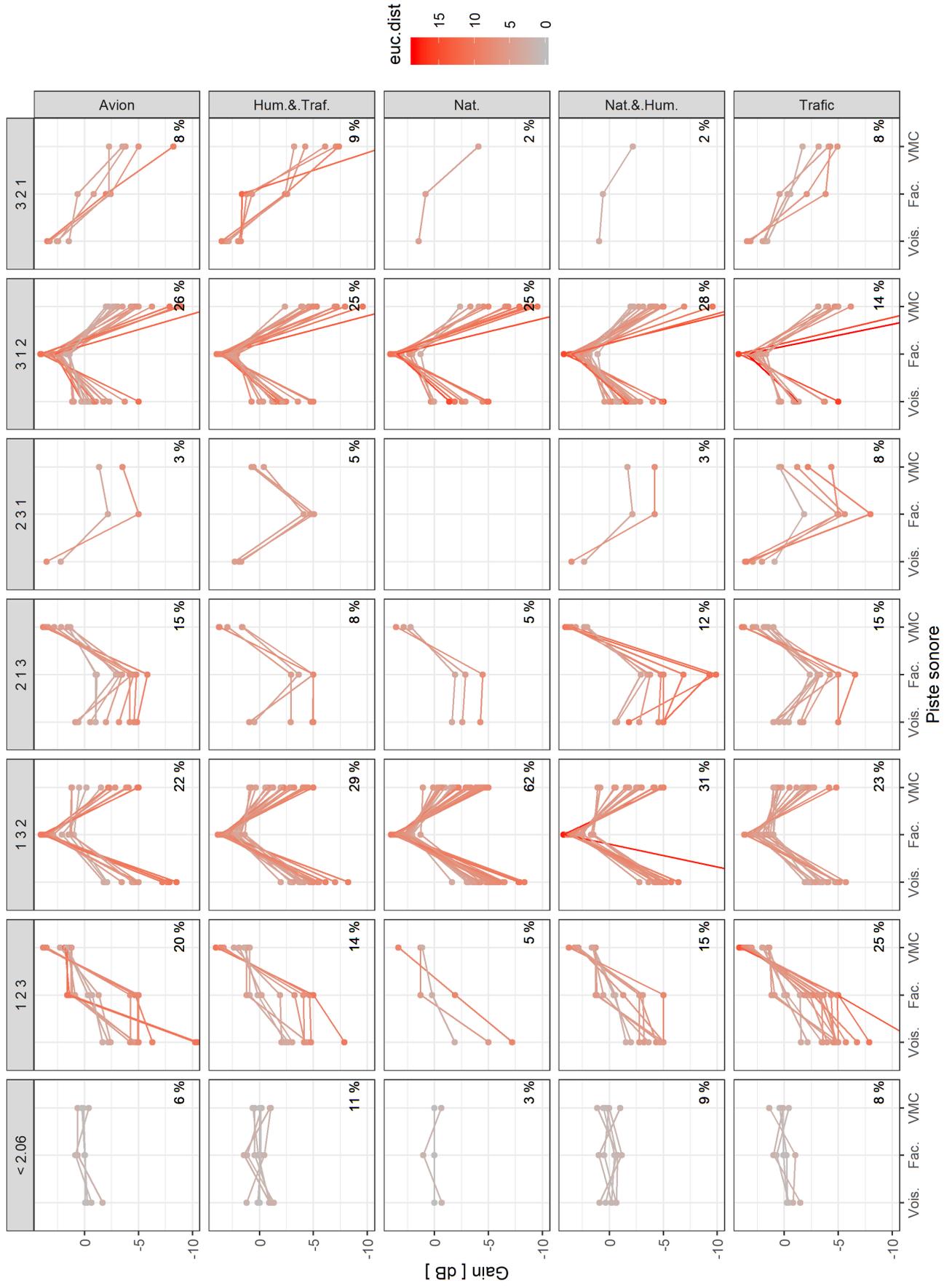
TV. Doc. - Le plus agréable



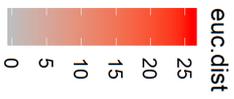
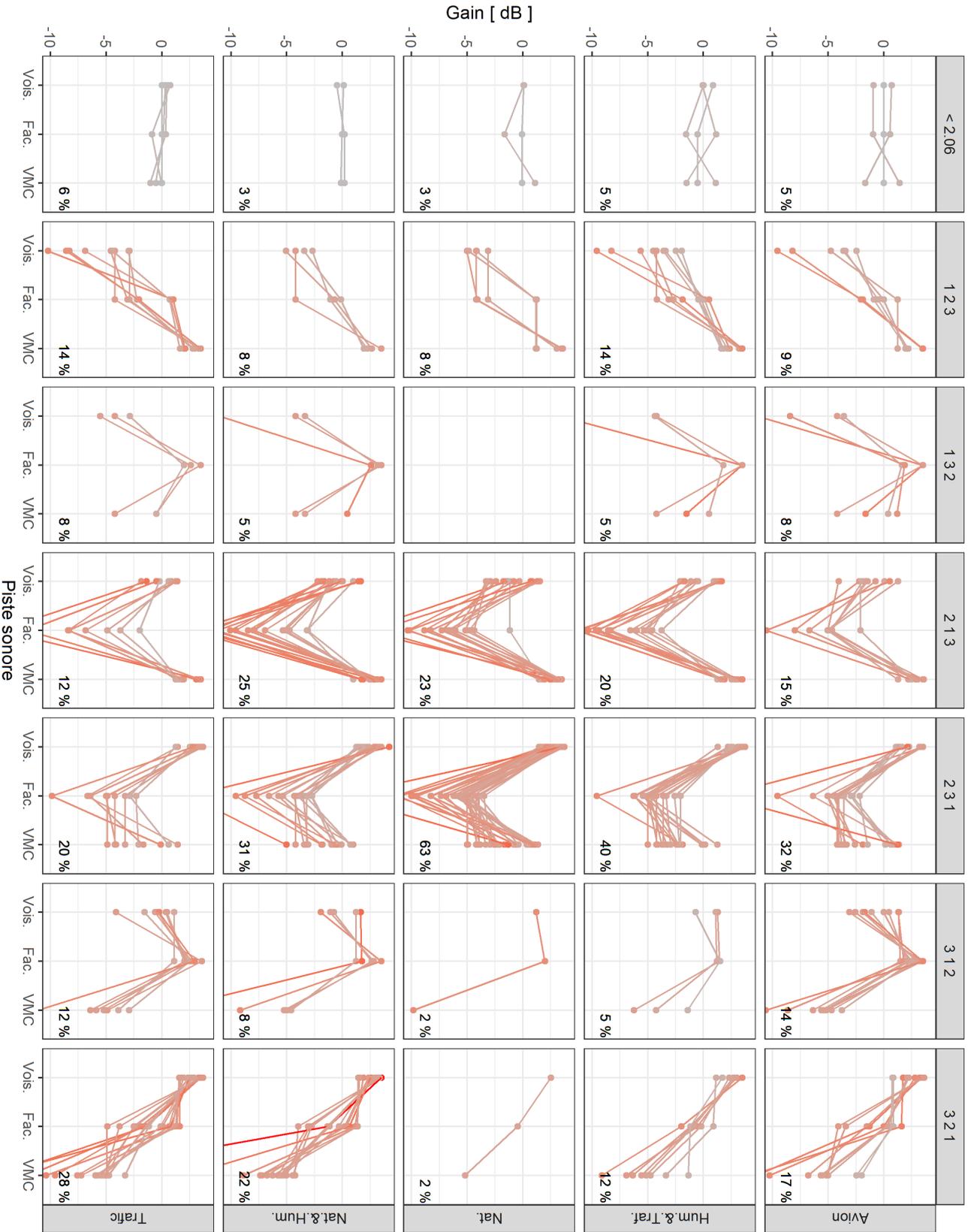
TV. Doc. - Le moins agréable



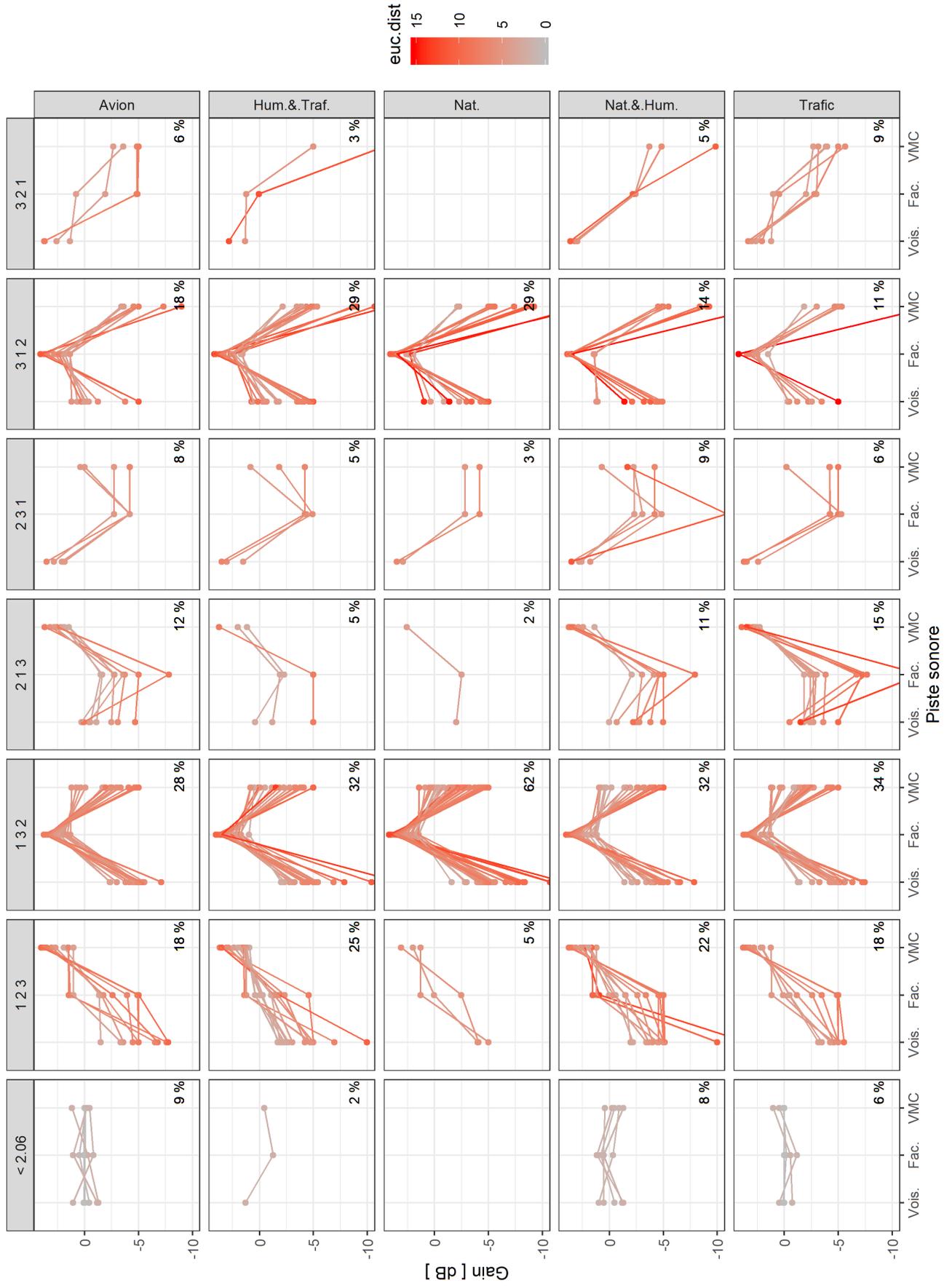
Enfants - Le plus agréable



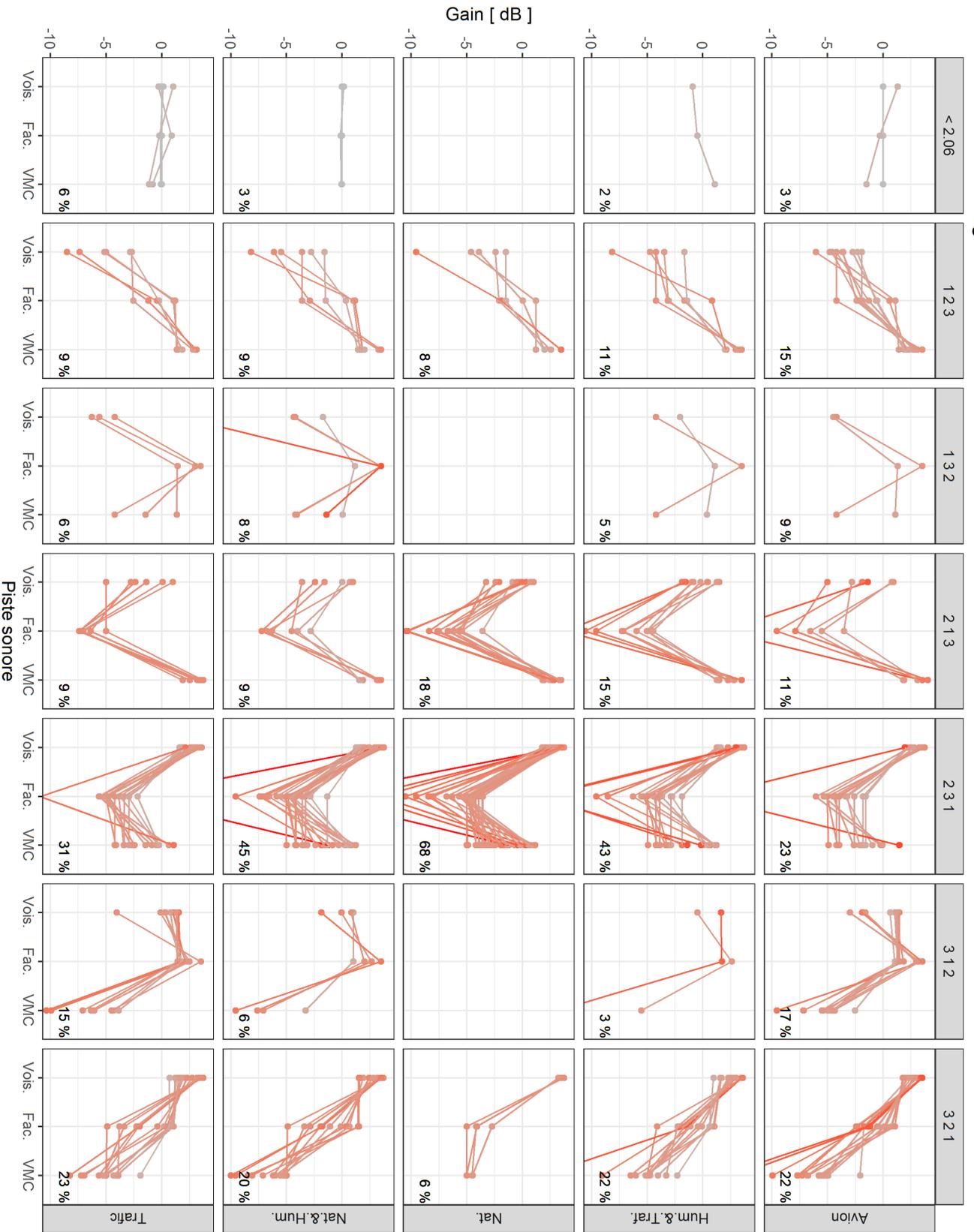
Enfants - Le moins agréable



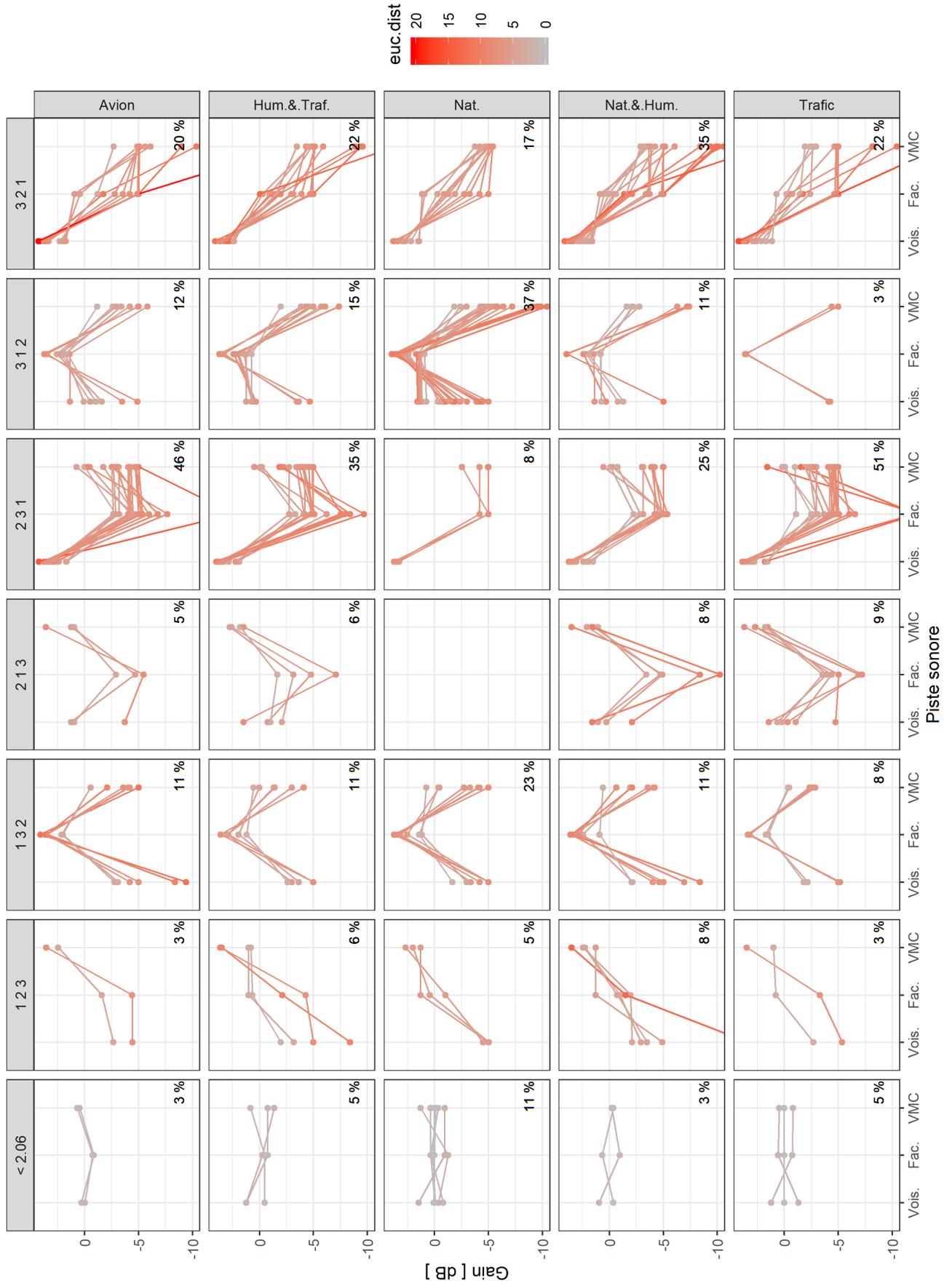
Fête - Le plus agréable



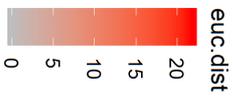
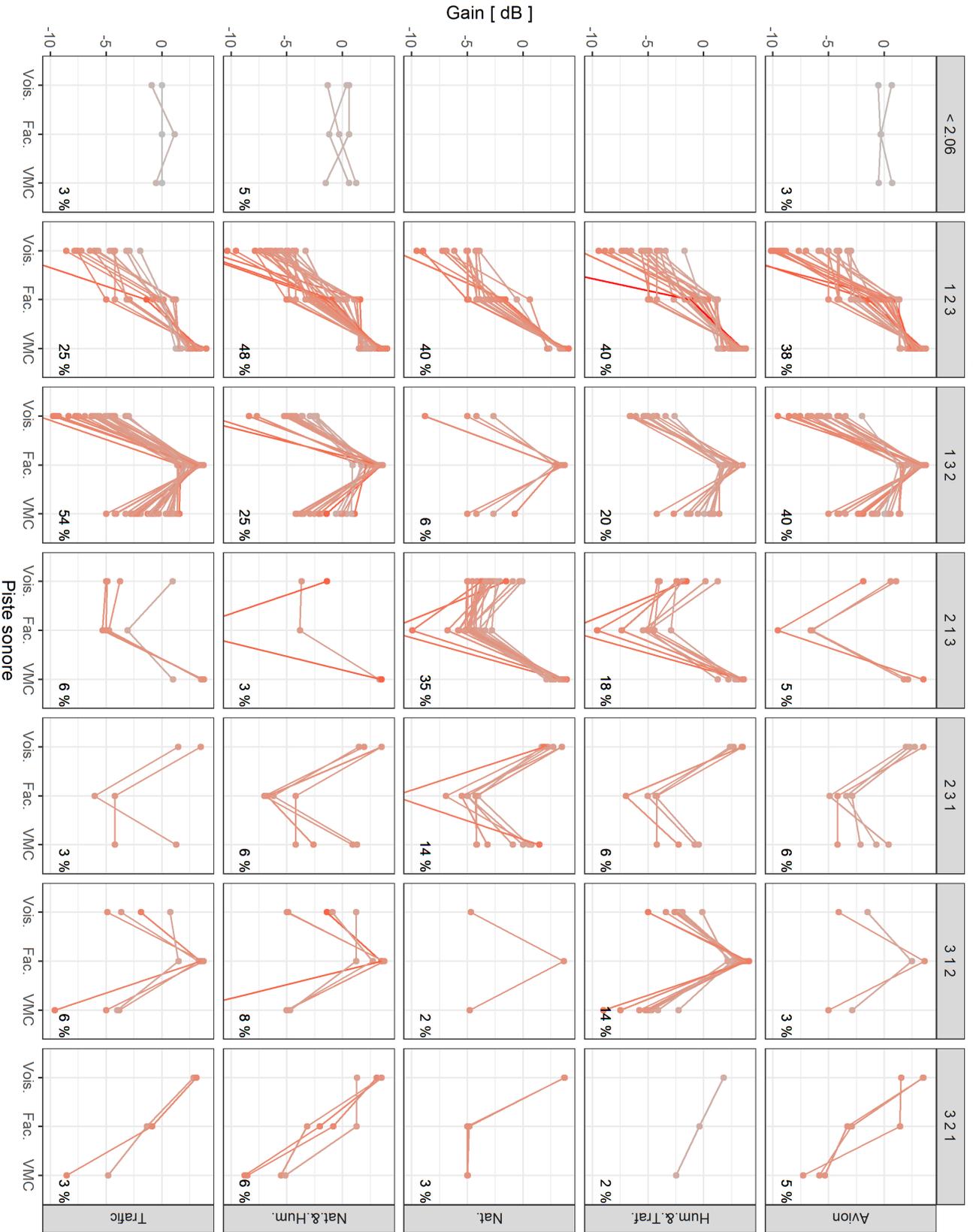
Fête - Le moins agréable



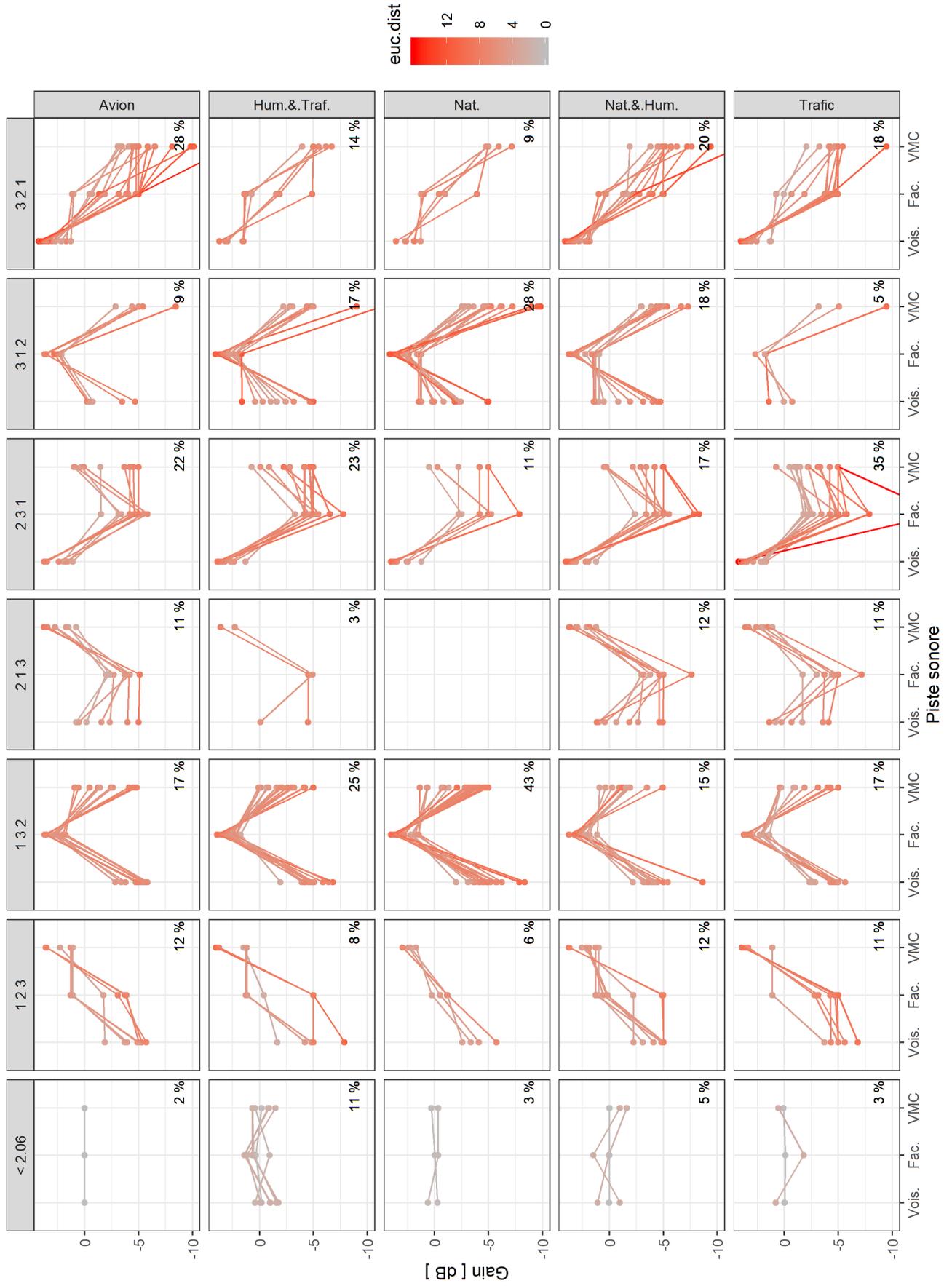
Musique classique - Le plus agréable



Musique classique - Le moins agréable



Musique Pop. - Le plus agréable



Annexe E

Questionnaire du second test d'écoute

Votre avis sur le test

* Required

1. Prénom *

2. Nom *

3. Comment évaluez-vous la durée de ce test? *

Mark only one oval.

- Beaucoup trop long
- Trop long
- Ni trop long, ni trop court
- Trop court
- Beaucoup trop court

4. Tout pris ensemble, comment évaluez vous la difficulté de ce test? *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Très facile	<input type="radio"/>	Très difficile				

**Le test était organisé en quatre parties pour chaque son.
Comment évaluez vous la difficulté de chaque partie de test?
Partie 1: Créer le son le plus agréable**

Créer le son le plus agréable

Partie 1 / 33

Voisin

Reset

Façade

Lecture

Arrêt

Ventilation

0 s

➔

1 sur 3

08/11/2019 à 13:09

5. Comment évaluer vous la difficulté de cette partie 1 du test? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Très difficile Très facile

Partie 2: le plus désagréable

Partie 1 / 33

Créer le son le moins agréable

Voisin

Reset

Façade

Lecture Arrêt

Ventilation

0 s

6. Comment évaluer vous la difficulté de cette partie 2 du test? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Très difficile Très facile

Partie 3: Comparer les ambiances

Partie 1 / 33

Comparer les ambiances

Son 1

0

Son 2

Beaucoup moins agréable

Le son 1 est

que le son 2

Beaucoup plus agréable

7. Comment évaluer vous la difficulté de cette partie 3 du test? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Très difficile Très facile

Partie 4: Ajuster le niveau de l'un des sons

Partie 1 / 33

Ajuster le niveau du son 1 pour que les sons 1 et 2 soient tous les deux aussi agréables

Son 1

Son 2

Lecture Arrêt

← Valider

8. Comment évaluer vous la difficulté de cette partie 4 du test? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Très difficile Très facile

9. Commentaire libre:

Annexe F

Tâche de lecture : Détail des textes utilisés

Texte 1

Version A : C'était les vacances scolaires, une belle journée d'automne, Martin travaillait seul chez lui et en avait assez. Il décida d'aller voir ses copains. Il sortit au parc et les retrouva. Martin était content de ne pas avoir oublié son sac. Ils allèrent vers le marchand de glaces.

Version B : C'était les vacances scolaires, une belle journée d'automne, Martin travaillait seul chez lui et en avait assez. Il décida d'aller voir ses copains. Il sortit au parc et les retrouva. Martin était content de ne pas avoir oublié son sac. Ils se dirigèrent vers leur terrain favori.

Version C : C'était les vacances scolaires, une belle journée d'automne, Martin travaillait seul chez lui et en avait assez. Il décida d'aller voir ses copains. Il sortit au parc et les retrouva. Martin était content de ne pas avoir oublié son ballon. Ils allèrent vers le marchand de glaces.

Version D : C'était les vacances scolaires, une belle journée d'automne, Martin travaillait seul chez lui et en avait assez. Il décida d'aller voir ses copains. Il sortit au parc et les retrouva. Martin était content de ne pas avoir oublié son ballon. Ils se dirigèrent vers leur terrain favori.

Texte 2

Version A : Paul marchait entre le parc et la boulangerie. Il avait bien travaillé et avait beaucoup joué après la classe et il avait faim. Il mit ses mains dans les poches. Paul toucha le papier que son père lui avait donné. Il se mit alors à courir vers sa maison.

Version B : Paul marchait entre le parc et la boulangerie. Il avait bien travaillé et avait beaucoup joué après la classe et il avait faim. Il mit ses mains dans les poches. Paul toucha le papier que son père lui avait donné. Il se mit alors à courir vers la boutique.

Version C : Paul marchait entre le parc et la boulangerie. Il avait bien travaillé et avait beaucoup joué après la classe et il avait faim. Il mit ses mains dans les poches. Paul toucha la pièce que son père lui avait donnée. Il se mit alors à courir vers sa maison.

Version D : Paul marchait entre le parc et la boulangerie. Il avait bien travaillé et avait beaucoup joué après la classe et il avait faim. Il mit ses mains dans les poches. Paul toucha la pièce que son père lui avait donnée. Il se mit alors à courir vers la boutique.

Texte 3

Version A : C'est l'été, il fait très chaud et nous sommes en maillot de bain, pieds nus. C'est maintenant l'heure du déjeuner et je dois mettre la table. Par maladresse, la vaisselle m'échappe des mains. Et un des verres tombe sur la moquette. Je le ramasse et le replace sur la table.

Version B : C'est l'été, il fait très chaud et nous sommes en maillot de bain, pieds nus. C'est maintenant l'heure du déjeuner et je dois mettre la table. Par maladresse, la vaisselle m'échappe des mains. Et un des verres tombe sur la moquette. Il y a plein de petits morceaux par terre.

Version C : C'est l'été, il fait très chaud et nous sommes en maillot de bain, pieds nus. C'est maintenant l'heure du déjeuner et je dois mettre la table. Par maladresse, la vaisselle m'échappe des mains. Et un des verres tombe sur le sol. Je le ramasse et le replace sur la table.

Version D : C'est l'été, il fait très chaud et nous sommes en maillot de bain, pieds nus. C'est maintenant l'heure du déjeuner et je dois mettre la table. Par maladresse, la vaisselle m'échappe des mains. Et un des verres tombe sur le sol. Il y a plein de petits morceaux par terre.

Texte 4

Version A : C'était une ferme au milieu des bois. Une pauvre femme y vivait avec ses nombreux animaux. Le petit coq était le roi de la basse-cour et aimait bien le montrer. Le matin, il était toujours le premier à manger. Il avait les graines pour lui tout seul.

Version B : C'était une ferme au milieu des bois. Une pauvre femme y vivait avec ses nombreux animaux. Le petit coq était le roi de la basse-cour et aimait bien le montrer. Le matin, il était toujours le premier à manger. Il réveillait tout le monde à la ferme.

Version C : C'était une ferme au milieu des bois. Une pauvre femme y vivait avec ses nombreux animaux. Le petit coq était le roi de la basse-cour et aimait bien le montrer. Le matin, il était toujours le premier levé. Il avait les graines pour lui tout seul.

Version D : C'était une ferme au milieu des bois. Une pauvre femme y vivait avec ses nombreux animaux. Le petit coq était le roi de la basse-cour et aimait bien le montrer. Le matin, il était toujours le premier levé. Il réveillait tout le monde à la ferme.

Texte 5

Version A : Tout est calme dans la cantine. Laura aperçoit John, assis, mais lui ne la voit pas. Ces deux-là ne s'apprécient vraiment pas. Elle veut le lui montrer. Les élèves retournent en récréation. C'est alors que Laura décide de jouer. Elle se lève et sort avec les autres enfants.

Version B : Tout est calme dans la cantine. Laura aperçoit John, assis, mais lui ne la voit pas. Ces deux-là ne s'apprécient vraiment pas. Elle veut le lui montrer. Les élèves retournent en récréation. C'est alors que Laura décide de jouer. Elle remplit son verre d'eau et va vers lui.

Version C : Tout est calme dans la cantine. Laura aperçoit John, assis, mais lui ne la voit pas. Ces deux-là ne s'apprécient vraiment pas. Elle veut le lui montrer. Les élèves retournent en récréation. C'est alors que Laura décide de se venger. Elle se lève et sort avec les autres enfants.

Version D : Tout est calme dans la cantine. Laura aperçoit John, assis, mais lui ne la voit pas. Ces deux-là s'apprécient vraiment pas. Elle veut le lui montrer. Les élèves retournent en récréation. C'est alors que Laura décide de se venger. Elle remplit son verre d'eau et va vers lui.

Texte 6

Version A : Léo se promenait avec ses copains dans le centre-ville. Il y avait beaucoup de monde car on était samedi. Les gens écoutaient un homme jouer de la guitare et chanter dans la rue. Il avait placé par terre devant lui sa boîte. Léo et ses amis continuèrent leur chemin.

Version B : Léo se promenait avec ses copains dans le centre-ville. Il y avait beaucoup de monde car on était samedi. Les gens écoutaient un homme jouer de la guitare et chanter dans la rue. Il avait placé par terre devant lui sa boîte. Léo s'approcha du musicien et se baissa.

Version C : Léo se promenait avec ses copains dans le centre-ville. Il y avait beaucoup de monde car on était samedi. Les gens écoutaient un homme jouer de la guitare et chanter dans la rue. Il avait placé par terre devant lui un chapeau. Léo et ses amis continuèrent leur chemin.

Version D : Léo se promenait avec ses copains dans le centre-ville. Il y avait beaucoup de monde car on était samedi. Les gens écoutaient un homme jouer de la guitare et chanter dans la rue. Il avait placé par terre devant lui un chapeau. Léo s'approcha du musicien et se baissa.

Texte 7

Version A : Victor fut réveillé par un orage. Le matin, il vit que des branches d'arbres étaient tombées sur le toit de sa maison. Il fallait et voir les dégâts. Victor alla au garage et regarda s'il avait une grande échelle en bois. Il emprunta alors celle du voisin et monta.

Version B : Victor fut réveillé par un orage. Le matin, il vit que des branches d'arbres étaient tombées sur le toit de sa maison. Il fallait y monter et voir les dégâts. Victor alla au garage et sortit une grande échelle en bois. Alors qu'il arrivait en haut, un barreau cassa.

Version C : Victor fut réveillé par un orage. Le matin, il vit que des branches d'arbres étaient tombées sur le toit de sa maison. Il fallait voir les dégâts. Victor alla au garage et regarda s'il avait une vieille échelle en bois. Il emprunta alors celle du voisin et monta.

Version D : Victor fut réveillé par un orage. Le matin, il vit que des branches d'arbres étaient tombées sur le toit de sa maison. Il fallait y monter et voir les dégâts. Victor alla au garage et sortit une vieille échelle en bois. Alors qu'il arrivait en haut, un barreau cassa.

Texte 8

Version A : Sébastien et ses amis avaient passé toute l'après-midi à se promener dans la forêt. Ils ne s'étaient pas du tout rendu compte de l'heure et se trouvaient loin de chez eux. Il faisait déjà sombre et ils étaient fatigués. Ils tombèrent nez à nez avec un petit écureuil.

Version B : Sébastien et ses amis avaient passé toute l'après-midi à se promener dans la forêt. Ils ne s'étaient pas du tout rendu compte de l'heure et se trouvaient loin de chez eux. Il faisait déjà sombre et ils étaient fatigués. C'est alors qu'ils rencontrèrent le garde forestier.

Version C : Sébastien et ses amis avaient passé toute l'après-midi à se promener dans la forêt. Ils ne s'étaient pas du tout rendu compte de l'heure et se trouvaient loin de chez eux. Il faisait déjà sombre et ils étaient perdus. Ils tombèrent nez à nez avec un petit écureuil.

Version D : Sébastien et ses amis avaient passé toute l'après-midi à se promener dans la forêt. Ils ne s'étaient pas du tout rendu compte de l'heure et se trouvaient loin de chez eux. Il faisait déjà sombre et ils étaient perdus. C'est alors qu'ils rencontrèrent le garde forestier.

Texte 9

Version A : Manon voulait un chat depuis longtemps et ses parents avaient finalement accepté. Au magasin, alors qu'elle regardait les chatons en train de jouer, elle s'approcha pour en prendre un. Le chaton qu'elle avait choisi semblait tendu. Il fut surpris puis il s'approcha doucement.

Version B : Manon voulait un chat depuis longtemps et ses parents avaient finalement accepté. Au magasin, alors qu'elle regardait les chatons en train de jouer, elle s'approcha pour en prendre un. Le chaton qu'elle avait choisi semblait tendu. Il fut surpris et commença à s'énerver.

Version C : Manon voulait un chat depuis longtemps et ses parents avaient finalement accepté. Au magasin, alors qu'elle regardait les chatons en train de jouer, elle s'approcha pour en prendre un. Le chaton qu'elle avait choisi semblait agressif. Il fut surpris puis il s'approcha doucement.

Version D : Manon voulait un chat depuis longtemps et ses parents avaient finalement accepté. Au magasin, alors qu'elle regardait les chatons en train de jouer, elle s'approcha pour en prendre un. Le chaton qu'elle avait choisi semblait agressif. Il fut surpris et commença à s'énerver.

Texte 10

Version A : Aurélie aimait bien sa classe. Tout le monde se connaissait depuis la maternelle. Cette année, il y avait une nouvelle élève. Dans la cour de l'école, Aurélie l'aperçut qui pleurait. Aurélie était connue pour être polie avec les autres. Elle s'approcha et la regardait bizarrement.

Version B : Aurélie aimait bien sa classe. Tout le monde se connaissait depuis la maternelle. Cette année, il y avait une nouvelle élève. Dans la cour de l'école, Aurélie l'aperçut qui pleurait. Aurélie était connue pour être polie avec les autres. Elle s'en approcha et la prit dans ses bras.

Version C : Aurélie aimait bien sa classe. Tout le monde se connaissait depuis la maternelle. Cette année, il y avait une nouvelle élève. Dans la cour de l'école, Aurélie l'aperçut qui pleurait. Aurélie était connue pour être sympathique avec les autres. Elle s'approcha et la regardait bizarrement.

Version D : Aurélie aimait bien sa classe. Tout le monde se connaissait depuis la maternelle. Cette année, il y avait une nouvelle élève. Dans la cour de l'école, Aurélie l'aperçut qui pleurait. Aurélie était connue pour être sympathique avec les autres. Elle s'en approcha et la prit dans ses bras.

Texte 11

Version A : Aminata et Joseph s'étaient promis de revenir dans ce restaurant car ils apprécient ce lieu. Le chef est excellent : il invente sans cesse de nouvelles recettes originales et délicieuses. Ils s'installent confortablement et lisent la fiche à disposition. Joseph lève la main car leurs amis arrivent.

Version B : Aminata et Joseph s'étaient promis de revenir dans ce restaurant car ils apprécient ce lieu. Le chef est excellent : il invente sans cesse de nouvelles recettes originales et délicieuses. Ils s'installent confortablement et lisent la fiche à disposition. Joseph lève la main et un serveur arrive.

Version C : Aminata et Joseph s'étaient promis de revenir dans ce restaurant car ils apprécient ce lieu. Le chef est excellent : il invente sans cesse de nouvelles recettes originales et délicieuses. Ils s'installent confortablement et lisent le menu à disposition. Joseph lève la main car leurs amis arrivent.

Version D : Aminata et Joseph s'étaient promis de revenir dans ce restaurant car ils apprécient ce lieu. Le chef est excellent : il invente sans cesse de nouvelles recettes originales et délicieuses. Ils s'installent confortablement et lisent le menu à disposition. Joseph lève la main et un serveur arrive.

Texte 12

Version A : Aline habitait au centre-ville. Son appartement était situé au cinquième étage. Tard dans la soirée, un groupe de jeunes gens discutaient bruyamment devant l'immeuble, empêchant Aline de dormir. Elle pensa à la journée du lendemain et se leva. Elle téléphona à son petit ami François.

Version B : Aline habitait au centre-ville. Son appartement était situé au cinquième étage. Tard dans la soirée, un groupe de jeunes gens discutaient bruyamment devant l'immeuble, empêchant Aline de dormir. Elle pensa à la journée du lendemain et se leva. Soudain, elle ouvrit la fenêtre et se pencha.

Version C : Aline habitait au centre-ville. Son appartement était situé au cinquième étage. Tard dans la soirée, un groupe de jeunes gens discutaient bruyamment devant l'immeuble, empêchant Aline de dormir. Elle pensa à la journée du lendemain et s'énerma. Elle téléphona à son petit ami François.

Version D : Aline habitait au centre-ville. Son appartement était situé au cinquième étage. Tard dans la soirée, un groupe de jeunes gens discutaient bruyamment devant l'immeuble, empêchant Aline de dormir. Elle pensa à la journée du lendemain et s'énerma. Soudain, elle ouvrit la fenêtre et se pencha.

Texte 13 Version A : Marius aimait jouer aux cartes avec ses voisins. Leur jeu préféré était le poker et Marius se débrouillait plutôt bien d'habitude. Mais ce soir-là, il n'avait fait que perdre. Il fouilla bruyamment dans la poche de sa veste. Il en sortit un chewing-gum à la menthe.

Version B : Marius aimait jouer aux cartes avec ses voisins. Leur jeu préféré était le poker et Marius se débrouillait plutôt bien d'habitude. Mais ce soir-là, il n'avait fait que perdre. Il fouilla bruyamment dans la poche de sa veste. Il en sortit un as qu'il glissa dans son jeu.

Version C : Marius aimait jouer aux cartes avec ses voisins. Leur jeu préféré était le poker et Marius se débrouillait plutôt bien d'habitude. Mais ce soir-là, il n'avait fait que perdre. Il fouilla discrètement dans la poche de sa veste. Il en sortit un chewing-gum à la menthe.

Version D : Marius aimait jouer aux cartes avec ses voisins. Leur jeu préféré était le poker et Marius se débrouillait plutôt bien d'habitude. Mais ce soir-là, il n'avait fait que perdre. Il fouilla discrètement dans la poche de sa veste. Il en sortit un as qu'il glissa dans son jeu.

Texte 14

Version A : Matilda est sportive, elle sait très bien patiner. Elle tourne, saute des obstacles, dérape sans difficultés. Aujourd'hui, Alex, fait du roller pour la première fois, il n'est pas rassuré. C'est son petit frère et Matilda aime jouer avec lui. Matilda montre les gestes à faire à Alex.

Version B : Matilda est sportive, elle sait très bien patiner. Elle tourne, saute des obstacles, dérape sans difficultés. Aujourd'hui, Alex, fait du roller pour la première fois, il n'est pas rassuré. C'est son petit frère et Matilda aime jouer avec lui. Matilda pousse alors Alex dans le dos.

Version C : Matilda est sportive, elle sait très bien patiner. Elle tourne, saute des obstacles, dérape sans difficultés. Aujourd'hui, Alex, fait du roller pour la première fois, il n'est pas rassuré. C'est son petit frère et Matilda aime l'embêter. Matilda montre les gestes à faire à Alex.

Version D : Matilda est sportive, elle sait très bien patiner. Elle tourne, saute des obstacles, dérape sans difficultés. Aujourd'hui, Alex, fait du roller pour la première fois, il n'est pas rassuré. C'est son petit frère et Matilda aime l'embêter. Matilda pousse alors Alex dans le dos.

Texte 15

Version A : Ted, le voyageur, était allé pêcher dans le petit ruisseau. Juste à côté de lui apparut une énorme silhouette : un géant. Celui-ci observait Ted d'un air curieux et menaçant. Il se dit que le petit garçon était bien dodu. Le géant fut en fait très gentil avec lui.

Version B : Ted, le voyageur, était allé pêcher dans le petit ruisseau. Juste à côté de lui apparut une énorme silhouette : un géant. Celui-ci observait Ted d'un air curieux et menaçant. Il se dit que le petit garçon était bien dodu. Soudain, le géant empoigna Ted et le souleva.

Version C : Ted, le voyageur, était allé pêcher dans le petit ruisseau. Juste à côté de lui apparut une énorme silhouette : un géant. Celui-ci observait Ted d'un air curieux et menaçant. Il se dit que le petit garçon était bien appétissant. Le géant fut en fait très gentil avec lui.

Version D : Ted, le voyageur, était allé pêcher dans le petit ruisseau. Juste à côté de lui apparut une énorme silhouette : un géant. Celui-ci observait Ted d'un air curieux et menaçant. Il se dit que le petit garçon était bien appétissant. Soudain, le géant empoigna Ted et le souleva.

Texte 16

Version A : Nous sommes en classe découverte au bord de la mer en Bretagne. Nous apprenons à naviguer sur des petits bateaux. Hier, nous avons acheté des cartes postales au village. C'est normal de donner des souvenirs aux parents. On s'est tous dirigés vers le bord de la mer.

Version B : Nous sommes en classe découverte au bord de la mer en Bretagne. Nous apprenons à naviguer sur des petits bateaux. Hier, nous avons acheté des cartes postales au village. C'est normal de donner des souvenirs aux parents. On s'est alors assis à la table avec nos cartes.

Version C : Nous sommes en classe découverte au bord de la mer en Bretagne. Nous apprenons à naviguer sur des petits bateaux. Hier, nous avons acheté des cartes postales au village. C'est normal de donner des nouvelles aux parents. On s'est tous dirigés vers le bord de la mer.

Version D : Nous sommes en classe découverte au bord de la mer en Bretagne. Nous apprenons à naviguer sur des petits bateaux. Hier, nous avons acheté des cartes postales au village. C'est normal de donner des nouvelles aux parents. On s'est alors assis à la table avec nos cartes.

Texte 17

Version A : C'était le jour des livrets. Chaque enfant devait le faire signer par ses parents. Jeanne avait eu une mauvaise note à son contrôle de maths et une autre en histoire. Elle pensait être punie par son père et sa mère. Elle s'en moquait et se présenta à eux.

Version B : C'était le jour des livrets. Chaque enfant devait le faire signer par ses parents. Jeanne avait eu une mauvaise note à son contrôle de maths et une autre en histoire. Elle pensait être punie par son père et sa mère. Elle était triste et s'effondra sur son lit.

Version C : C'était le jour des livrets. Chaque enfant devait le faire signer par ses parents. Jeanne avait eu une mauvaise note à son contrôle de maths et une autre en histoire. Elle avait peur d'être punie par son père et sa mère. Elle s'en moquait et se présenta à eux.

Version D : C'était le jour des livrets. Chaque enfant devait le faire signer par ses parents. Jeanne avait eu une mauvaise note à son contrôle de maths et une autre en histoire. Elle avait peur d'être punie par son père et sa mère. Elle était triste et s'effondra sur son lit.

Texte 18

Version A : C'était l'anniversaire d'André, toute la famille était présente pour le petit garçon. Il reçut de magnifiques livres et un nouveau cartable. André était très heureux de cette fête. Et c'était le moment préféré d'André : l'heure du gâteau. Il prit les allumettes avec précaution.

Version B : C'était l'anniversaire d'André, toute la famille était présente pour le petit garçon. Il reçut de magnifiques livres et un nouveau cartable. André était très heureux de cette fête. Et c'était le moment préféré d'André : l'heure du gâteau. Le garçon s'approcha et prit sa respiration.

Version C : C'était l'anniversaire d'André, toute la famille était présente pour le petit garçon. Il reçut de magnifiques livres et un nouveau cartable. André était très heureux de cette fête. Et c'était le moment préféré d'André : l'heure des bougies. Il prit les allumettes avec précaution.

Version D : C'était l'anniversaire d'André, toute la famille était présente pour le petit garçon. Il reçut de magnifiques livres et un nouveau cartable. André était très heureux de cette fête. Et c'était le moment préféré d'André : l'heure des bougies. Le garçon s'approcha et prit sa respiration.

Texte 19

Version A : Jack et ses amis étaient perdus dans une forêt sombre où résonnaient d'étranges bruits d'animaux qui les faisaient sursauter de peur. Jack aperçut alors une lumière, c'était une auberge. Ils se dirigèrent vers la maison éclairée, ils s'approchèrent hésitants. Ils aperçurent une ombre à la fenêtre.

Version B : Jack et ses amis étaient perdus dans une forêt sombre où résonnaient d'étranges bruits d'animaux qui les faisaient sursauter de peur. Jack aperçut alors une lumière, c'était une auberge. Ils se dirigèrent vers la maison éclairée, ils s'approchèrent hésitants. L'aubergiste ouvrit la porte pour les accueillir.

Version C : Jack et ses amis étaient perdus dans une forêt sombre où résonnaient d'étranges bruits d'animaux qui les faisaient sursauter de peur. Jack aperçut alors une lumière, c'était une auberge. Ils se dirigèrent vers la maison éclairée, ils s'approchèrent rassurés. Ils aperçurent une ombre à la fenêtre.

Version D : Jack et ses amis étaient perdus dans une forêt sombre où résonnaient d'étranges bruits d'animaux qui les faisaient sursauter de peur. Jack aperçut alors une lumière, c'était une auberge. Ils se dirigèrent vers la maison éclairée, ils s'approchèrent rassurés. L'aubergiste ouvrit la porte pour les accueillir.

Texte 20

Version A : Le match est très serré : à dix minutes du coup de sifflet final, les deux équipes sont à égalité. Malgré la fatigue, les joueurs redoublent d'efforts et attaquent de nouveau. Un joueur se retrouve alors face à un défenseur. Il dribble mais perd bêtement le ballon.

Version B : Le match est très serré : à dix minutes du coup de sifflet final, les deux équipes sont à égalité. Malgré la fatigue, les joueurs redoublent d'efforts et attaquent de nouveau. Un joueur se retrouve alors face à un défenseur. Il dribble et s'élance pour marquer un but.

Version C : Le match est très serré : à dix minutes du coup de sifflet final, les deux équipes sont à égalité. Malgré la fatigue, les joueurs redoublent d'efforts et attaquent de nouveau. Un joueur se retrouve alors face au gardien. Il dribble mais perd bêtement le ballon.

Version D : Le match est très serré : à dix minutes du coup de sifflet final, les deux équipes sont à égalité. Malgré la fatigue, les joueurs redoublent d'efforts et attaquent de nouveau. Un joueur se retrouve alors face au gardien. Il dribble et s'élance pour marquer un but.

Texte 21

Version A : Ulric était un jeune aigle. Sa mère le trouvait timide et réservé. Mais ce jour-là était un jour particulier car Ulric devait quitter sa famille pour découvrir le monde. Il salua ses frères et s'approcha de ses parents. Il demanda finalement à rester en famille.

Version B : Ulric était un jeune aigle. Sa mère le trouvait timide et réservé. Mais ce jour-là était un jour particulier car Ulric devait quitter sa famille pour découvrir le monde. Il salua ses frères et s'approcha de ses parents. Ulric se détourna puis déploya ses ailes.

Version C : Ulric était un jeune aigle. Sa mère le trouvait timide et réservé. Mais ce jour-là était un jour particulier car Ulric devait quitter sa famille pour découvrir le monde. Il salua ses frères et s'approcha de la falaise. Il demanda finalement à rester en famille.

Version D : Ulric était un jeune aigle. Sa mère le trouvait timide et réservé. Mais ce jour-là était un jour particulier car Ulric devait quitter sa famille pour découvrir le monde. Il salua ses frères et s'approcha de la falaise. Ulric se détourna puis déploya ses ailes.

Texte 22

Version A : Les randonneurs avaient marché toute la journée. Ils arrivèrent enfin à la cabane où ils allaient passer la nuit. C'était une ancienne bergerie à flanc de montagne, près d'un glacier. Louis avait très froid et voulait se reposer. Il sortit ses affaires du sac et se coucha.

Version B : Les randonneurs avaient marché toute la journée. Ils arrivèrent enfin à la cabane où ils allaient passer la nuit. C'était une ancienne bergerie à flanc de montagne, près d'un glacier. Louis avait très froid et voulait se reposer. Il s'empara de la hache et coupa du bois.

Version C : Les randonneurs avaient marché toute la journée. Ils arrivèrent enfin à la cabane où ils allaient passer la nuit. C'était une ancienne bergerie à flanc de montagne, près d'un glacier. Louis avait très froid et voulait se réchauffer. Il sortit ses affaires du sac et se coucha.

Version D : Les randonneurs avaient marché toute la journée. Ils arrivèrent enfin à la cabane où ils allaient passer la nuit. C'était une ancienne bergerie à flanc de montagne, près d'un glacier. Louis avait très froid et voulait se réchauffer. Il s'empara de la hache et coupa du bois.

Texte 23

Version A : Achille adorait cuisiner et ses frères et sœurs raffolaient de ses desserts. Ce jour-là, il fit un gâteau au chocolat. Il respecta scrupuleusement les étapes de la recette et mit le gâteau au four. Au bout d'une heure, le gâteau semblait prêt. Achille éteignit le four et alla dehors.

Version B : Achille adorait cuisiner et ses frères et sœurs raffolaient de ses desserts. Ce jour-là, il fit un gâteau au chocolat. Il respecta scrupuleusement les étapes de la recette et mit le gâteau au four. Au bout d'une heure, le gâteau semblait prêt. Achille prit un torchon et s'approcha du four.

Version C : Achille adorait cuisiner et ses frères et sœurs raffolaient de ses desserts. Ce jour-là, il fit un gâteau au chocolat. Il respecta scrupuleusement les étapes de la recette et mit le gâteau au four. Au bout d'une heure, le gâteau semblait cuit. Achille éteignit le four et alla dehors.

Version D : Achille adorait cuisiner et ses frères et sœurs raffolaient de ses desserts. Ce jour-là, il fit un gâteau au chocolat. Il respecta scrupuleusement les étapes de la recette et mit le gâteau au four. Au bout d'une heure, le gâteau semblait cuit. Achille prit un torchon et s'approcha du four.

Texte 24 Version A : C'était une belle journée d'automne. Et Sacha aimait se balader dans les sous-bois avec son chien. Sur le chemin, il trouva un joli coin avec de magnifiques champignons. Il réfléchit une minute et vit qu'ils étaient bons. Sacha laissa alors son chien les manger.

Version B : C'était une belle journée d'automne. Et Sacha aimait se balader dans les sous-bois avec son chien. Sur le chemin, il trouva un joli coin avec de magnifiques champignons. Il réfléchit une minute et vit qu'ils étaient bons. Sacha posa son panier à terre et s'accroupit.

Version C : C'était une belle journée d'automne. Et Sacha aimait se balader dans les sous-bois avec son chien. Sur le chemin, il trouva un joli coin avec de magnifiques champignons. Il réfléchit une minute et vit qu'ils étaient comestibles. Sacha laissa alors son chien les manger.

Version D : C'était une belle journée d'automne. Et Sacha aimait se balader dans les sous-bois avec son chien. Sur le chemin, il trouva un joli coin avec de magnifiques champignons. Il réfléchit une minute et vit qu'ils étaient comestibles. Sacha posa son panier à terre et s'accroupit.

Texte 25

Version A : Milan aime beaucoup lire, il dévore tous les livres que ses parents et ses amis lui proposent. Il a toujours un bouquin à la main. Il lit même en marchant dans la rue. Ce jour-là, Milan lit un roman sans regarder où il va. Une copine qu'il n'avait pas vue l'appelle.

Version B : Milan aime beaucoup lire, il dévore tous les livres que ses parents et ses amis lui proposent. Il a toujours un bouquin à la main. Il lit même en marchant dans la rue. Ce jour-là, Milan lit un roman sans regarder où il va. Il traverse la rue et avance vers un poteau.

Version C : Milan aime beaucoup lire, il dévore tous les livres que ses parents et ses amis lui proposent. Il a toujours un bouquin à la main. Il lit même en marchant dans la rue. Ce jour-là, Milan lit un roman sans regarder devant lui. Une copine qu'il n'avait pas vue l'appelle.

Version D : Milan aime beaucoup lire, il dévore tous les livres que ses parents et ses amis lui proposent. Il a toujours un bouquin à la main. Il lit même en marchant dans la rue. Ce jour-là, Milan lit un roman sans regarder devant lui. Il traverse la rue et avance vers un poteau.

Texte 26

Version A : Tous les lundis matins, les élèves sont interrogés par la maîtresse. Ils doivent présenter leur week-end devant la classe. Julie attend car c'est bientôt son tour. Julie a passé un très bon dimanche. (35) Elle essaye d'attraper une mouche qui vole.

Version B : Tous les lundis matins, les élèves sont interrogés par la maîtresse. Ils doivent présenter leur week-end devant la classe. Julie attend car c'est bientôt son tour. Julie a passé un très bon dimanche. (35) Julie se présente sur l'estrade de la classe.

Version C : Tous les lundis matins, les élèves sont interrogés par la maîtresse. Ils doivent présenter leur week-end devant la classe. Julie attend car c'est bientôt son tour. Julie lève le doigt le plus haut possible. Elle essaye d'attraper une mouche qui vole.

Version D : Tous les lundis matins, les élèves sont interrogés par la maîtresse. Ils doivent présenter leur week-end devant la classe. Julie attend car c'est bientôt son tour. Julie lève le doigt le plus haut possible. Julie se présente sur l'estrade de la classe.

Texte 27

Version A : Aujourd'hui Gabriel va à son cours d'arts plastiques avec sa sœur. Il la tient par la main en lui racontant ce qu'il va faire. Gabriel vérifie qu'il a bien ses feuilles blanches. Il entre dans la salle et voit ses amis. Il s'assoit et commence à discuter avec Tom.

Version B : Aujourd'hui Gabriel va à son cours d'arts plastiques avec sa sœur. Il la tient par la main en lui racontant ce qu'il va faire. Gabriel vérifie qu'il a bien ses feuilles blanches. Il entre dans la salle et voit ses amis. Il s'assoit à sa table et se met au travail.

Version C : Aujourd'hui Gabriel va à son cours d'arts plastiques avec sa sœur. Il la tient par la main en lui racontant ce qu'il va faire. Gabriel vérifie qu'il a bien ses feuilles blanches. Il entre dans la salle et prend ses pinceaux. Il s'assoit et commence à discuter avec Tom.

Version D : Aujourd'hui Gabriel va à son cours d'arts plastiques avec sa sœur. Il la tient par la main en lui racontant ce qu'il va faire. Gabriel vérifie qu'il a bien ses feuilles blanches. Il entre dans la salle et prend ses pinceaux. Il s'assoit à sa table et se met au travail.

Texte 28

Version A : Blandine a un très grand jardin, avec beaucoup de plantes. Son papa et son grand-père lui ont fait une belle surprise. Ils lui ont construit une cabane dans un arbre très haut. Son père va chercher sa mère et son frère. Blandine file prendre son bain avant le dîner.

Version B : Blandine a un très grand jardin, avec beaucoup de plantes. Son papa et son grand-père lui ont fait une belle surprise. Ils lui ont construit une cabane dans un arbre très haut. Son père va chercher sa mère et son frère. Blandine arrive et court vite vers l'arbre.

Version C : Blandine a un très grand jardin, avec beaucoup de plantes. Son papa et son grand-père lui ont fait une belle surprise. Ils lui ont construit une cabane dans un arbre très haut. Son père va chercher une grande échelle. Blandine file prendre son bain avant le dîner.

Version D : Blandine a un très grand jardin, avec beaucoup de plantes. Son papa et son grand-père lui ont fait une belle surprise. Ils lui ont construit une cabane dans un arbre très haut. Son père va chercher une grande échelle. Blandine arrive et court vite vers l'arbre.

Texte 29

Version A : Chloé et ses amis s’amusent pendant la récréation à mimer des situations comiques. Chloé mime une blague que son père lui avait racontée la semaine dernière. C’est une blague de toto qui lave sa voiture. La cloche sonne déjà la fin de la récréation.

Version B : Chloé et ses amis s’amusent pendant la récréation à mimer des situations comiques. Chloé mime une blague que son père lui avait racontée la semaine dernière. C’est une blague de toto qui lave sa voiture. Tous ses amis trouvent la blague très drôle.

Version C : Chloé et ses amis s’amusent pendant la récréation à mimer des situations comiques. Chloé mime une blague que son père lui avait racontée la semaine dernière. C’est une blague d’un renard qui lave sa voiture. La cloche sonne déjà la fin de la récréation.

Version D : Chloé et ses amis s’amusent pendant la récréation à mimer des situations comiques. Chloé mime une blague que son père lui avait racontée la semaine dernière. C’est une blague d’un renard qui lave sa voiture. Tous ses amis trouvent la blague très drôle.

Texte 30

Version A : Fabien est un éboueur, aujourd’hui il passe en classe pour expliquer le tri sélectif aux élèves de l’école. Il leur montre des déchets leur explique comment trier. Ensuite, les enfants choisissent tous des objets dans la classe. Le maître les félicite pour leur travail.

Version B : Fabien est un éboueur, aujourd’hui il passe en classe pour expliquer le tri sélectif aux élèves de l’école. Il leur montre des déchets leur explique comment trier. Ensuite, les enfants choisissent tous des objets dans la classe. Ils se dirigent vers les différents bacs.

Version C : Fabien est un éboueur, aujourd’hui il passe en classe pour expliquer le tri sélectif aux élèves de l’école. Il leur montre des déchets et leur explique comment trier. Ensuite, les enfants ramassent tous des objets dans la classe. Le maître les félicite pour leur travail.

Version D : Fabien est un éboueur, aujourd’hui il passe en classe pour expliquer le tri sélectif aux élèves de l’école. Il leur montre des déchets et leur explique comment trier. Ensuite, les enfants ramassent tous des objets dans la classe. Ils se dirigent vers les différents bacs.

Texte 31

Version A : Sophie adore les travaux manuels. Elle fait beaucoup de peinture, de découpages et de collages. Elle aime décorer sa chambre avec ses créations. Elle s’installe à son bureau qui lui sert d’atelier. Elle sort des feuilles colorées et son livre de modèles. Sa mère rentre et l’appelle pour manger.

Version B : Sophie adore les travaux manuels. Elle fait beaucoup de peinture, de découpages et de collages. Elle aime décorer sa chambre avec ses créations. Elle s’installe à son bureau qui lui sert d’atelier. Elle sort des feuilles colorées et son livre de modèles. Sophie choisit de réaliser un papillon bleu.

Version C : Sophie adore les travaux manuels. Elle fait beaucoup de peinture, de découpages et de collages. Elle aime décorer sa chambre avec ses créations. Elle s’installe à son bureau qui lui sert d’atelier. Elle sort des feuilles colorées et son livre d’origamis. Sa mère rentre et l’appelle pour manger.

Version D : Sophie adore les travaux manuels. Elle fait beaucoup de peinture, de découpages et de collages. Elle aime décorer sa chambre avec ses créations. Elle s’installe à son bureau qui lui sert d’atelier. Elle sort des feuilles colorées et son livre d’origamis. Sophie choisit de réaliser un papillon bleu.

Texte 32

Version A : Il est 19h, la maman d’Audrey est rentrée du travail. Elle va faire à manger. Audrey doit se préparer pour la soirée : elle va faire couler l’eau. Elle aime beaucoup pouvoir choisir entre plusieurs pyjamas le soir. Elle prend son pyjama avec les grenouilles.

Version B : Il est 19h, la maman d’Audrey est rentrée du travail. Elle va faire à manger. Audrey doit se préparer pour la soirée : elle va faire couler l’eau. Elle aime beaucoup pouvoir choisir entre plusieurs pyjamas le soir. Elle se déshabille et se glisse dans le bain.

Version C : Il est 19h, la maman d'Audrey est rentrée du travail. Elle va faire à manger. Audrey doit se préparer pour la soirée : elle va faire couler l'eau. Elle aime beaucoup pouvoir choisir entre plusieurs savons le soir. Elle prend son pyjama avec les grenouilles.

Version D : Il est 19h, la maman d'Audrey est rentrée du travail. Elle va faire à manger. Audrey doit se préparer pour la soirée : elle va faire couler l'eau. Elle aime beaucoup pouvoir choisir entre plusieurs savons le soir. Elle se déshabille et se glisse dans le bain.

Texte 33

La nuit est tombée sur le laboratoire de biologie. Cependant, une lumière est restée allumée au dernier étage de l'immeuble où sommeillent les petits animaux dans leur cage. C'est alors qu'un homme vêtu de noir entre silencieusement. Il éteint toutes les lumières du laboratoire.

Texte 34

Il y avait beaucoup de monde ce matin-là dans la gare du centre-ville car c'était un jour de départ en vacances. Farah vérifia les horaires au panneau d'affichage lumineux. Avec sa valise, elle se dirigea vers son quai et regarda vers le train. Elle vit Louis, son ami, descendre du wagon.

Texte 35

Cindy et sa maman sont allées faire les courses. Sur le chemin du retour, elles passent devant une librairie. Elles entrent et choisissent une histoire pour le soir. Elles rentrent ensuite pour préparer le dîner avec ce qu'elles ont acheté. Cindy met la table pour aider sa maman.

Texte 36

Jérémie avait un rendez-vous très important à son travail. Il ne fallait pas qu'il soit en retard car son directeur n'avait pas un caractère facile. Il sortit de chez lui et vit alors son bus arriver au bout de la rue. Il se dépêcha de fermer la porte. Il leva la main et agrippa son cartable.

Texte 37

Après deux mois d'absence, notre cousin est revenu de son voyage en Amérique. Nous allons fêter tous ensemble son retour au restaurant. La carte propose de nombreux plats qui ont tous l'air aussi délicieux les uns que les autres. Je réfléchis avant que le serveur arrive.

Texte 38

Aurélien déborde de joie : sa petite sœur est née hier ! Il a aidé ses parents à installer la chambre du bébé : c'est lui qui a choisi le papier peint et il a même consenti à lui laisser quelques jouets. Il va la voir pour la première fois cet après-midi. Ses grands-parents l'emmèneront en voiture.

Texte 39

Cette année, nous avons décidé de surprendre maman et de lui organiser une fête surprise pour son anniversaire. Nous avons décoré la maison pendant son absence et nous lui avons préparé un énorme gâteau pour l'accueillir ! Papa a promis que chacun en aurait une grosse part.

Texte 40

Ariane était souvent dans la lune. Elle s'imaginait tout un tas d'histoires plus extraordinaires les unes que les autres. Elle en oubliait parfois ce qu'elle faisait et sa mère devait souvent la rappeler à l'ordre. Elle lui demandait alors ce à quoi elle rêvait.

Texte 41

Margot était revenue de vacances. Rien n'avait changé dans sa maison et tout était propre car la voisine de Margot, Léa, s'était occupée de tout. Margot cherchait un moyen de la remercier. Elle savait que Léa aimait beaucoup les fleurs. Margot alla chez le fleuriste du quartier.

Texte 42

Comme tous les jours, Fifi ouvre la porte de chez elle avec sa propre clef car il n'y a encore personne. Elle a son petit programme : elle pose d'abord son cartable, va se laver les mains puis file dans la cuisine pour ouvrir le placard. Elle en sort du pain et du chocolat au lait.

Texte 43

C'est aujourd'hui le grand départ pour les vacances : papa arrive tant bien que mal à placer toutes nos valises dans la voiture. Il doit faire attention à ne rien casser. Tout est prêt et maman ferme la maison à clé. Nous nous installons gaiement dans la voiture.

Texte 44

Bettina est une gentille sorcière mais il lui arrive d'être un peu paresseuse. Elle reconnaît que la magie peut être parfois bien pratique. Elle doit justement nettoyer son chaudron avant son cours de potions cet après-midi. Elle attrape alors sa baguette magique.

Texte 45

En récompense de son travail, Lisa va passer la journée à son parc d'attractions préféré. Les montagnes russes ne lui font pas peur et elle s'amuse beaucoup. Elle adore sentir le vent dans ses cheveux noués par un ruban. Le ruban glisse peu à peu avec la vitesse.

Texte 46

Le soleil brille cet après-midi et la voisine nous a invités à venir jouer dans son jardin. Au milieu trône un superbe cerisier qui regorge en cette saison de cerises bien mûres. La voisine nous invite à aller chercher une échelle. Nous la plaçons près de l'arbre pour y grimper.

Texte 47

Tristan était un brave chevalier. Il n'avait qu'une mission : celle de parcourir la campagne à la recherche de pauvres gens à secourir. Armé de sa seule épée, il combattait les brigands et rapportait dans les villages les objets volés. Les paysans étaient heureux de sa venue.

Texte 48

C'est le réveillon du nouvel an et nous sommes tous un peu excités. C'est un des seuls soirs de l'année où nous pouvons nous coucher tard. Pour attendre minuit, nous comptons sur Alain qui apporte toujours sa guitare pour animer le repas. Nous nous rassemblons tout autour de lui.

Texte 49

C'était l'été, il faisait chaud et chacun profitait du soleil à sa façon. Un couple était assis à la terrasse d'un café, des enfants jouaient sur la place du village, d'autres encore achetaient des glaces. L'air sentait bon la crème solaire. Quelques vacanciers se dirigèrent vers la plage.

Texte 50

Il est midi, Colin court se laver les mains pour aller manger. Il prend un plateau et des couverts. Il se place derrière les élèves qui font la queue au comptoir. Il ne sait pas encore s'il va manger à côté d'Arthur ou bien de Tim. Colin choisit son plat et saisit une cuillère.

Texte 51

Clémence rentre faire ses devoirs avec sa copine Marine. Elles ont des divisions à faire mais Marine ne comprend pas comment les poser. Clémence propose de le lui expliquer. Elles s'installent à table et sortent leur goûter. Clémence montre la méthode avec des exemples.

Texte 52

Ces jours-ci l'école prend un air de fête car nous préparons le carnaval : les couloirs se remplissent de serpentins et de masques de toutes les couleurs. Les salles resplendissent de paillettes dorées et de jolies plumes. Il ne nous reste plus qu'à choisir un costume.

Texte 53

Alfred était un magicien très renommé. Il était à l'affiche de tous les cirques de la région. Il arrivait à faire sortir tout ce qu'il voulait de son chapeau : des colombes, des lapins... et surtout des bonbons, à la grande joie des plus petits. Il lui suffisait d'une simple formule magique.

Texte 54

C'est enfin décidé : nous partons vivre au sud de la France ! Avant de dire au revoir à nos voisins et nos amis, nous devons tout trier dans la maison. C'est aussi l'occasion de retrouver des souvenirs enfouis au fond des placards. Papa est allé chercher de grands cartons.

Texte 55

Le mois de décembre est bien avancé et le froid s'est peu à peu installé. Nous attendons impatiemment la neige pour aller jouer dehors. Nous espérons chaque soir l'arrivée des flocons pendant la nuit. J'ouvre mes volets au petit matin. La ville s'est recouverte d'un beau manteau blanc.

Texte 56

Ethan était un garçon très solitaire. Il ne prenait jamais la parole en public. Il semblait avoir peur de déranger ses camarades. Un jour, alors qu'il était seul dans son coin, il vit Pierre tomber et se blesser à quelques pas de lui. Il tourna vivement la tête et se dirigea vers lui.

Texte 57

Depuis le matin, Mathilde n'avait qu'une envie : manger des crêpes. Elle sortit les ingrédients puis versa la farine, les œufs et le lait dans le saladier. Elle prit ensuite une poêle, alluma le gaz et commença à faire sauter les crêpes. Son frère fut ravi en entrant dans la cuisine.

Texte 58

Sarah sortit de bon matin se promener dans la forêt. Elle enfila ses bottes et son imperméable au cas où il pleuvrait. Sur le chemin, elle trouva un lièvre blessé à la patte. Elle décida de le ramener tout en se demandant comment le sauver. Arrivée chez elle, elle monta à la salle de bain.

Texte 59

Aujourd'hui n'est pas une journée comme les autres à l'école car nous sommes en sortie : nous allons visiter le musée du Moyen Âge. Nous sommes tous émerveillés par les objets rassemblés ici : armures, épées, costumes. Le guide s'arrête pour nous raconter une histoire.

Texte 60

Pour le concert de ce soir, nous avons revêtu nos plus beaux habits. La salle est grande et très impressionnante. La lumière s'éteint, les musiciens entrent sur scène. Nous faisons silence pour le chef d'orchestre. Les premières notes retentissent. La musique est belle et jouée avec passion.

Texte 61

Le soleil se lève à peine sur la ferme des Marronniers. Petit Jean baille, s'étire et se lève, encore un peu endormi. Comme tous les matins, il attrape son panier à œufs, enfle ses grosses chaussures et sort en direction du poulailler. Il traverse la cour et parvient à la grille.

Texte 62

Le vol de la grande bijouterie de la place fait la une de tous les journaux. Heureusement, l'inspecteur Déclic est là pour résoudre le mystère. Il examine la pièce dans ses moindres détails et parvient à déceler l'identité du voleur. Il part bravement à la recherche de sa cachette.

Texte 63

Catastrophe ! Norbert le sorcier ne retrouve plus sa baguette ! Impossible de se rappeler où il a bien pu la laisser. Il est bien ennuyé car le grand concours de sorcellerie commence dans quelques heures. Il sèche ses larmes et se met à réfléchir. Il repense alors au dernier sort qu'il a jeté.

Texte 64

Papy Jules était célèbre dans le village pour sa paëlla. Tout le monde en raffolait et convoitait sa recette. Tous... sauf son petit-fils qui n'avait encore jamais osé le lui dire. Mais il en avait assez de mentir et surtout de manger de la paëlla. Il décida de prendre son courage à deux mains.

Bibliographie

- AES (1996) AES recommended practice for professional audio - Subjective evaluation of loudspeakers, in : AES20-1996, (cf. p. 41, 58, 157).
- ALHARR, Y. et al. (avr. 2016) Impact of Indoor Environmental Quality on Occupant Well-being and Comfort : A Review of the Literature in : International Journal of Sustainable Built Environment, **5** : DOI : [10.1016/j.ijsbe.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.006) (cf. p. 1).
- AMPHOUX, P. et M. LEROUX (1989) *Le bruit, la plainte, et son contexte* CRESSON (cf. p. 14).
- AUGOYARD, J.-F., P. AMPHOUX et G. CHELKOFF (1985) La production de l'environnement sonore. Analyse exploratoire sur les conditions sociologiques et sémantiques de la production des phénomènes sonores sur les habitants et usagers de l'environnement urbain, Thesis (cf. p. 12, 31).
- AUMOND, P. et al. (mai 2017) Modeling Soundscape Pleasantness Using perceptual Assessments and Acoustic Measurements Along Paths in Urban Context in : Acta Acustica united with Acustica, **103** : 430-443 DOI : [10.3813/AAA.919073](https://doi.org/10.3813/AAA.919073) (cf. p. 62).
- BADDELEY, A. D. (1968) A 3-minutes reasoning test based on Grammatical Transformation in : Psychonomic Science, **10** :10, 341-347 (cf. p. 111).
- BAILHACHE, S., J. JAGLA et C. GUIGOU (2014) CSTB - Projet Environnement et ambiances : effet des basses fréquences sur le confort acoustique - tests psychoacoustiques, rapp. tech. Centre Technique Scientifique du Bâtiment (cf. p. 104).
- BALANANT, N. (2018) Rénovation : Améliorer l'acoustique des logements collectifs, rapp. tech. (cf. p. 103).
- BALANANT, N., C. GUIGOU et M. VILLENAVE (2014) Acoubois : Enquêtes perceptives sur le confort acoustique, Report Qualitel FCBA CSTB (cf. p. 17, 25, 27, 60, 62).
- BANBURY, S. P. et D. C. BERRY (1998) Disruption of office-related tasks by speech and office noise in : British Journal of Psychology, **89** : (3), 499-517 DOI : <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1998.tb02699.x> (cf. p. 36).
- BANBURY, S. P., W. J. MACKEN et al. (2001) Auditory Distraction and Short-Term Memory : Phenomena and Practical Implications in : Human Factors, **43** :1 PMID : 11474757, 12-29 DOI : [10.1518/001872001775992462](https://doi.org/10.1518/001872001775992462) URL : <https://doi.org/10.1518/001872001775992462> (cf. p. 2).
- BAUER, D. F. (1972) Constructing Confidence Sets Using Rank Statistics in : Journal of the American Statistical Association, **67** :339, 687-690 DOI : [10.1080/01621459.1972.10481279](https://doi.org/10.1080/01621459.1972.10481279)

- URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1972.10481279> (cf. p. 132, 140, 145).
- BEDEAU, L. et al. (2010) *Les français et les nuisances sonores - Enquête TNS Sofres Online Multimedia* (cf. p. 16-18, 31).
- BENDAVID, R. et M. CHASLES-PAROT (2014) *Sondage IFOP : Les Français et les nuisances sonores Online Multimedia* (cf. p. 1, 16, 17, 27, 31).
- BERGLUND, B., A. PREIS et K. RANKIN (1990) Relationship between loudness and annoyance for ten community sounds in : *Environment International*, **16** :4 Public Health Implications of Environmental Noise, 523-531 ISSN : 0160-4120 DOI : [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(90\)90021-W](https://doi.org/10.1016/0160-4120(90)90021-W) URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041209090021W> (cf. p. 11).
- BERKHOUT, A. (1988) A Holographic Approach to Acoustic Control in : *Journal of the Audio Engineering Society*, **36** : 977-995 (cf. p. 51).
- BIAP (2002) *Classification audiométrique des déficiences auditives* Recommandation biap 02/1 bis URL : <https://www.biap.org/fr/recommandations/recommandations/ct-02-classification-des-deficiences-auditives/149-rec-02-01-fr-classification-audiometrique-des-deficiences-auditives/file> (cf. p. 7, 67).
- BONEBRIGHT, T. L. (2001) Perceptual structure of everyday sounds : Multidimensional scaling approach, in : *International Conference on Auditory Display, ICAD* (cf. p. 29).
- BROCOLINI, L., C. LAVANDIER et al. (2019) Energy Production Plant Noise Unpleasantness Reduction : The Benefits of a Sound Design Approach in : *Acta Acustica united with Acustica*, **105** :1, 162-173 DOI : [10.3813/AAA.919297](https://doi.org/10.3813/AAA.919297) (cf. p. 77).
- BROCOLINI, L. et E. PARIZET (2015) Influence of tonal components on the unpleasantness of airplane noise at take-off, in : *INTER-NOISE and NOISE-CON*, t. 250, 4390-4396 (cf. p. 33).
- BROCOLINI, L., E. PARIZET et al. (2014) Influence du type de source sonore sur l'évaluation de la gêne et de la performance dans les bureaux ouverts in : *CFA 2014*, (cf. p. 35).
- BROWN, A., J. KANG et T. GJESTLAND (2011) Towards standardization in soundscape preference assessment in : *Applied Acoustics*, **72** :6, 387-392 ISSN : 0003-682X DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.01.001> URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X11000028> (cf. p. 62).
- BROWN, L. et B. DE COENSEL (sept. 2018) A study of the performance of a generalized exceedance algorithm for detecting noise events caused by road traffic in : *Applied Acoustics*, **138** : 101-114 DOI : [10.1016/j.apacoust.2018.03.031](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.03.031) (cf. p. 105).
- BULL, M. (2007) *Sound moves : iPod culture and urban experience* Routledge (cf. p. 13, 14).
- CAIN, B. (juil. 2007) A Review of the Mental Workload Literature in : *English*, 35 (cf. p. 35, 37).

- CHAMPELOVIER, P., M. HUGOT et J. LAMBERT (2010) État de l'art des méthodes d'évaluation de la perception et de la gêne due au bruit des transports, en laboratoire, Rapport INRETS-LTE numéro 1001 (cf. p. 33).
- CHELKOFF, G. (1993) Du confort acoustique au confort sonore : évolutions des pratiques et de l'architecture du logement, in : Evolution des modes de vie et architectures du logement. Paris : Plan Construction et Architecture, SEGAUD, Marion et, TOUZERY Lucien (Ed) chap. Recherches n42, 71-82 URL : <http://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-01168071> (cf. p. 12-14, 31).
- CHELKOFF, G. et al. (1991 1991) Bien-être sonore à domicile : architectures du logement et potentiel de confort sonore, Report CRESSON, Ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01373744> (cf. p. 12).
- CHEVRET, P. (2017) Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception, HDR Institut National de Recherche et de Sécurité (cf. p. 150).
- CONSEIL EUROPÉEN, P. européen et (2002) *Directive 2002/49/CE du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement* version 189 Journal officiel des Communautés Européennes URL : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:FR:PDF> (cf. p. 11).
- DEDIEU, R., C. LAVANDIER et C. CAMIER (2017) Les sources sonores dans deux contextes : les bureaux ouverts et le logement résidentiel - Analyse bibliographique, Rapport Saint-Gobain Research Paris (cf. p. 15).
- DEDIEU, R., C. LAVANDIER, C. CAMIER et S. BERGER (sept. 2019) Pleasantness of typical acoustic environments inside a living room in a European residential context, in : ICA 2019, Aachen URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02489915/> (cf. p. 59).
- DEFRANCE, C. A. (2017) Réguler les sonorités de l'espace public nocturne : Le cas particulier d'un quartier parisien en gentrification, Oberkampf, Thèse Université Paris Ouest Nanterre La Défense (cf. p. 12, 31, 32).
- DELAITRE, P. (2013) Caractérisation des zones calmes en environnement urbain, Thèse Université de Cergy-Pontoise (cf. p. 62).
- DELIGNIÈRES, D. (1993) La perception de l'effort et de la difficulté in : Cogn. Perform., 183-218 (cf. p. 35).
- DUBOIS, D. (2000) Categories as acts of meaning : The case of categories in olfaction and audition. in : Cognitive Science Quarterly, **1** : 35-68 (cf. p. 29).
- EBISSOU, A. (2013) Gêne sonore en bureaux ouverts : Impact de la présence de plusieurs voix intelligibles, Thèse INSA de Lyon (cf. p. 35, 36, 111, 150).

- ELLERMEIER, W., M. EIGENSTETTER et K. ZIMMER (mai 2001) Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity in : *The Journal of the Acoustical Society of America*, **109** : 1464-73 DOI : [10.1121/1.1350402](https://doi.org/10.1121/1.1350402) (cf. p. 11, 31).
- ELLERMEIER, W., M. MADER et P. DANIEL (jan. 2004) Scaling the Unpleasantness of Sounds According to the BTL Model : Ratio-Scale Representation and Psychoacoustical Analysis in : *Acta Acustica united with Acustica*, **90** : 101-107 (cf. p. 11).
- EY (2016) Le coût social des pollutions sonores, Report ADEME Conseil National du Bruit URL : https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/ADEME%20CNB_Cout_social_des_pollutions_sonores_Rapport_2016_05_04.pdf (cf. p. 1).
- FARINA, A. (2000) Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, in : 110th AES Convention, (cf. p. 41, 45, 47).
- FIELDS, J. et al. (2001) Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys : Research and a recommendation in : *Journal of Sound and Vibrations*, **242** :4, 641-679 (cf. p. 33).
- GAVER, W. W. (1993) What in the World Do We Hear? An Ecological Approach to Auditory Event Perception in : *Ecological psychology*, **5** :1, 1-29 (cf. p. 29).
- GAVER, W. W. (1988) *Everyday Listening and Auditory Icons*, thèse de doct. University Of California, San Diego (cf. p. 33, 109, 154).
- GAYSSOT, J.-C., M. AUBRY et L. BESSON (1999) *Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation* URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000211449> (cf. p. 40).
- GERZON, M. A. (1975) The Design of Precisely Coincident Microphone Arrays for Stereo and Surround Sound, in : 50th AES Convention, (cf. p. 51).
- GIORDANO, B. L., J. MCDONNELL et S. MCADAMS (2010) Hearing living symbols and nonliving icons : category specificities in the cognitive processing of environmental sounds in : *Brain Cogn*, **73** :1, 7-19 ISSN : 1090-2147 (Electronic)0278-2626 (Linking) DOI : [10.1016/j.bandc.2010.01.005](https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.01.005) URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20188452> (cf. p. 30).
- GRIEFAHN, B. (2008) Determination of noise sensitivity within an internet survey using a reduced version of the Noise Sensitivity Questionnaire in : *The Journal of the Acoustical Society of America*, **123** :5, 3449-3449 DOI : [10.1121/1.2934269](https://doi.org/10.1121/1.2934269) URL : <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.2934269> (cf. p. 5, 65, 74).
- GUASTAVINO, C. (2007) Categorization of environmental sounds in : *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, **61** :1, 54-63 ISSN : 1878-7290 1196-1961 DOI : [10.1037/cjep2007006](https://doi.org/10.1037/cjep2007006) (cf. p. 28, 30, 62, 161).
- GUSKI, R. (sept. 1997) Psychological Methods for Evaluating Sound Quality and Assessing Acoustic Information in : *Acta Acustica united with Acustica*, **83** : 765-774 (cf. p. 11).

- GUYOT, F. (1996) Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation, Thèse LMA (cf. p. 29).
- GYGI, B., G. P. K. KIDD et C. S. WATSON (2007) Similarity and categorization of environmental sounds in : Perception and Psychophysics, **69** :6, 839-855 ISSN : 0031-5117 DOI : [10.3758/Bf03193921](https://doi.org/10.3758/Bf03193921) URL : [%3CGo%20to%20ISI%3E://WOS:000250255000001](https://www.wos.com/doi/10.3758/Bf03193921) (cf. p. 29, 30).
- HAKA, M. et al. (juin 2009) Performance effects and subjective disturbance of speech in acoustically different office types - A laboratory experiment in : Indoor air, **19** : 454-67 DOI : [10.1111/j.1600-0668.2009.00608.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00608.x) (cf. p. 36).
- HILL, S. et al. (août 1992) Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales in : Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, **34** : 429-439 DOI : [10.1177/001872089203400405](https://doi.org/10.1177/001872089203400405) (cf. p. 36).
- HOLLANDER, M. et A. W. DOUGLAS (1973) Nonparametric Statistical Methods in : New York : John Wiley and Sons, 139-146 (cf. p. 115, 124, 125, 128, 129, 132, 134, 135, 138-140, 145, 146).
- HONGISTO, V. (2005) A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance in : Indoor Air, **15** :6, 458-468 ISSN : 1600-0668 DOI : [10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x) URL : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x> (cf. p. 150).
- HONGISTO, V., M. MÄKILÄ, A. HAAPAKANGAS et al. (2013a) Acoustic satisfaction in multi-storey buildings built after 1950 – preliminary results of a field survey, in : *Internoise*, (cf. p. 17, 18, 21-25, 27).
- (2013b) Acoustic satisfaction in multi-storey buildings built after 1950 – preliminary results of a field survey, in : *Internoise13'*, (cf. p. 60).
- HONGISTO, V., M. MÄKILÄ et M. SUOKAS (2015) Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction in : *Building and Environment*, **85** : 309-320 ISSN : 03601323 DOI : [10.1016/j.buildenv.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.010) (cf. p. 104).
- HONGISTO, V., D. OLIVA et J. KERÄNEN (2014) Subjective and Objective Rating of Airborne Sound Insulation Living Sounds in : *Acta Acustica united with Acustica*, **100** :5, 848-863 ISSN : 1610-1928 DOI : [doi:10.3813/AAA.918765](https://doi.org/10.3813/AAA.918765) URL : <http://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaau/2014/00000100/00000005/art00010> (cf. p. 104).
- HOUSTON, B. K. (1969) Noise, task difficulty, and Stroop color-word performance in : *J. Exp. Psychol.*, **82** :2, 403 DOI : [10.1037/h0024492](https://doi.org/10.1037/h0024492) (cf. p. 36).
- ISO10140-2 (2010) Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 2 : Mesurage de l'isolation au bruit aérien, International standard (cf. p. 52).

- ISO12354-1 (2017) Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1 : Airborne sound insulation between rooms, International standard (cf. p. 52, 55-57, 64, 65, 104, 105).
- ISO12354-3 (2017) Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3 : Airborne sound insulation against outdoor sound, International standard (cf. p. 52, 55, 57, 64, 65, 104, 105).
- ISO16283-1 (2014) Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1 : Airborne sound insulation, International standard (cf. p. 40).
- ISO3382-2 (2008) Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 2 : Durée de réverbération des salles ordinaires, International standard (cf. p. 40).
- ISO717-1 (2013) Building acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1 : Airborne sound insulation, International standard (cf. p. 40, 65, 104, 105).
- JAHANPOUR, É. (2019) Développement et mise en oeuvre d'une approche psycho-physio-acoustique pour le contrôle temps réel de l'impact du bruit en cabine d'hélicoptère, Thèse ISAE-SUPAERO (cf. p. 35, 37).
- JONES, D. M., C. MILES et J. PAGE (1990) Disruption of proofreading by irrelevant speech : Effects of attention, arousal or memory ? in : Applied Cognitive Psychology, **4** :2, 89-108 DOI : [10.1002/acp.2350040203](https://doi.org/10.1002/acp.2350040203) URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acp.2350040203> (cf. p. 36).
- KELLONIEMI, A. et al. (2005) Detection of subwoofer depending on crossover frequency and spatial angle between subwoofer and main speaker, in : 118th convention, sous la dir. d'AES Barcelona, Spain (cf. p. 44, 58, 157).
- KIDD, G. R. et C. S. WATSON (2003) The perceptual dimensionality of environmental sounds in : Noise Control Engineering Journal, **51** :4, 216-231 ISSN : 0736-2501 DOI : [Doi10.3397/1.2839717](https://doi.org/10.3397/1.2839717) URL : [%3CGo%20to%20ISI%3E://WOS:000189317200005](https://www.isinet.com/doi/abs/10.3397/1.2839717) (cf. p. 30).
- KOSTALLARI, K. et al. (avr. 2018) Gêne et fatigue ressentie en présence du bruit en open-space : expérience en laboratoire, in : sous la dir. de CFA'18 Le Havre (cf. p. 2).
- LAFAY, G. (2016) Simulation de scènes sonores environnementales, Application à l'analyse sensorielle et à l'analyse sémantique, Thesis (cf. p. 28, 62).
- LAVANDIER, C. et al. (mar. 2011) Impact of aircraft sound quality combined with the repetition of aircraft flyovers on annoyance as perceived activity disturbance in a laboratory context in : Applied Acoustics, **72** : 169-176 DOI : [10.1016/j.apacoust.2010.11.005](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.005) (cf. p. 2).
- LÊ, S., J. JOSSE et F. HUSSON (2008) FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis in : Journal of Statistical Software, **25** :1, 1-18 URL : http://factominer.free.fr/more/article_FactoMineR.pdf (cf. p. 69, 72, 74).

- LEMAY, S. et al. (2004) Practice Effect and Test-Retest Reliability of Attentional and Executive Tests in Middle-Aged to Elderly Subjects in : *The Clinical Neuropsychologist*, **18** :2 PMID : 15587675, 284-302 DOI : [10.1080/13854040490501718](https://doi.org/10.1080/13854040490501718) URL : <https://doi.org/10.1080/13854040490501718> (cf. p. 36).
- LINKWITZ, S. H. (1976) Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers in : *J. Audio Eng. Soc*, **24** :1, 2-8 URL : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2649> (cf. p. 44).
- LJUNGGREN, F., C. SIMMONS et K. HAGBERG (2013a) Findings from the AkuLite project : Correlation between measured vibro-acoustic parameters and subjective perception in lightweight buildings, in : *Internoise 2013 INNSBRUCK AUSTRIA*, (cf. p. 17-20, 26, 27, 62).
- LJUNGGREN, F., C. SIMMONS et K. HAGBERG (2013b) Findings from the AkuLite project : Correlation between measured vibro-acoustic parameters and subjective perception in lightweight buildings, in : *Internoise*, (cf. p. 60).
- LJUNGGREN, F., C. SIMMONS et R. ÖQVIST (2017) Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, part II in : *Applied Acoustics*, **123** : 143-151 ISSN : 0003-682X DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.014> URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17300956> (cf. p. 104).
- MAFFIOLO, V. (1999) De la caractérisation sémantique et acoustique de la qualité sonore de l'environnement urbain, Thesis (cf. p. 28).
- MALGRANGE, M. et R. DEDIEU (2018) In-site evaluation of acoustic comfort in open-offices located on the 8th floor of the CBX skyscraper – Courbevoie, France, Note technique Saint-Gobain Research Paris (cf. p. 2).
- MARCELL, M. M. et al. (2000) Confrontation naming of environmental sounds in : *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, **22** : 830-864 DOI : [10.1076](https://doi.org/10.1076) (cf. p. 29).
- MARQUIS-FAVRE, C., E. PREMAT et D. AUBREE (2005) Noise and its effects - A review on qualitative aspects of sound. Part II : Noise and annoyance in : *Acta Acustica United with Acustica*, **91** :4, 626-642 ISSN : 1610-1928 URL : [%3CGo%20to%20ISI%3E://WOS:000230803000002](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000230803000002) (cf. p. 34).
- MAUCHLY, J. W. (juin 1940) Significance Test for Sphericity of a Normal n -Variate Distribution in : *Ann. Math. Statist.*, **11** :2, 204-209 DOI : [10.1214/aoms/1177731915](https://doi.org/10.1214/aoms/1177731915) URL : <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731915> (cf. p. 153).
- MILLER, S. (2001) Workload measures : a literature review, Report National Advanced Driving Simulator Iowa City U. S. (cf. p. 35, 37).
- MOORE, B. C. J. et B. R. GLASBERG (1997) in : *An introduction to the psychology of hearing*, (cf. p. 48).

- MOREL, J. (2012) Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel, Thèse Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (cf. p. 29, 63, 105).
- NEMENYI, P. (1963) Distribution-free Multiple Comparisons, thèse de doct. Princeton University (cf. p. 125, 126, 128, 129).
- NIELSEN, J. R., J. H. RINDEL et F. R. MORTENSEN (1998) *Subjective evaluation of noise from neighbours with focus on low frequencies* Department of acoustic technology, Technical university of Denmark Lyngby, Denmark (cf. p. 104).
- ÖHRSTRÖM, E. et al. (août 2006) Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness in : *Journal of Sound and Vibration*, **295** : 40-59 DOI : [10.1016/j.jsv.2005.11.034](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.034) (cf. p. 13, 31).
- OLEKSIK, G. et al. (avr. 2008) Sonic Interventions : Understanding and Extending the Domestic Soundscape, in : CHI2008, Association for Computing Machinery, Inc. URL : <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/sonic-interventions-understanding-and-extending-the-domestic-soundscape/> (cf. p. 13, 14).
- OSWALD, C., S. TREMBLAY et D. JONES (oct. 2000) Disruption of comprehension by meaning of irrelevant sound in : *Memory* (Hove, England), **8** : 345-50 DOI : [10.1080/09658210050117762](https://doi.org/10.1080/09658210050117762) (cf. p. 36).
- PAAS, F. G., J. E. TUOVINEN et al. (2003) Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory in : *Educ. Psychol. Rev.*, **38** : (1), 63-71 (cf. p. 35).
- PAAS, F. G. et J. J. VAN MERRIËNBOER (1994) Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks in : *Educ. Psychol. Rev.*, **6** : (4), 351-371 (cf. p. 35).
- PARIZET, E., N. HAMZAOUI et G. SABATIE (2005) Comparison of some listening test method : a case study in : *Acta Acustica United with Acustica*, **91** : 356-364 (cf. p. 34, 65, 67).
- PEDERSEN, C. S., H. MOLLER et K. P. WAYE (2006) Low-frequency noise complaints - a detailed investigation of twenty two cases, in : *Internoise 2006*, sous la dir. d'INTER-NOISE Honolulu, Hawaii, USA (cf. p. 104).
- PEDERSEN, K. et al. (1998) Digital loudspeaker techniques for loudspeaker and room, Master Thesis Aalborg University (cf. p. 48).
- PÉREZ-BOUGUET, A., G. RETOURNÉ et A. DE ASENÇAO (2017) *Acoustique : Enquête qualitative Ifop : Comment les particuliers perçoivent-ils leur environnement sonore ? L'acoustique en rénovation de logement* Online Multimedia (cf. p. 12).
- PÉREZ-BOURGUET, A., G. RETOURNÉ et A. DE ASENÇAO (2017a) *Guide d'entretien IPSOS pour ISOVER : Comment les particuliers perçoivent-ils leur environnement sonore ?* Report (cf. p. 26).

- (2017b) *Rapport d'étude IPSOS pour ISOVER : Comment les particuliers perçoivent-ils leur environnement sonore ?* Report (cf. p. 26).
- PULKKI, V. (1997) Virtual Sound Source Positioning using Vector Base Amplitude Panning in : Audio engineering society, (cf. p. 51, 58, 157).
- QUALITEL, A. (2016) *Acoustique : Etude sur les basses fréquences dans les logements collectifs* Online Multimedia URL : https://www.qualite-logement.org/fileadmin/user_upload/documents/Referentiels_Documentation/Dossiers_Thematiques/DOSSIER_THEMATIQUE_Acoustique_Web.pdf (cf. p. 17-20, 22, 25).
- RAMOS, G. et J. J. LOPEZ (2006) Filter Design Method for Loudspeaker Equalization Based on IIR Parametric Filters in : Audio engineering society, **54** :12, 1162-1178 (cf. p. 47, 48, 50, 58, 157).
- RANDELL, S. et L. GILROY (mar. 2001) Effects of background music on word processed writing in : Computers in Human Behavior - COMPUT HUM BEHAV, **17** : 141-148 DOI : [10.1016/S0747-5632\(00\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0747-5632(00)00043-1) (cf. p. 36).
- RASMUSSEN, B. (2010) Sound classification schemes in Europe - Quality classes intended for renovated housing in : COST Action TU701, (cf. p. 1, 2, 15).
- (mai 2018) Building acoustic regulations in Europe - Brief history and actual situation, in : Reykjavik, Iceland : BNAM 2018 (cf. p. 1).
- RICCIARDI, P. et al. (sept. 2015) Sound quality indicators for urban places in Paris cross-validated by Milan data in : journal of the acoustics society of america, **138** : 2337 DOI : [10.1121/1.4929747](https://doi.org/10.1121/1.4929747)] (cf. p. 105).
- ROCHA, N. S. da et al. (2012) The EUROHIS-QOL 8-item index : comparative psychometric properties to its parent WHOQOL-BREF in : Value Health, **15** :3, 449-57 ISSN : 1524-4733 (Electronic) 1098-3015 (Linking) DOI : [10.1016/j.jval.2011.11.035](https://doi.org/10.1016/j.jval.2011.11.035) URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22583455> (cf. p. 6, 65, 74).
- ROYSTON, P. (1982) Algorithm AS 181 : The W test for Normality in : Applied Statistics, **31** : 176-180 DOI : [10.2307/2347986](https://doi.org/10.2307/2347986) (cf. p. 125).
- RYCHTÁRIKOVÁ, M. et al. (2012) Does the living noise spectrum adaptation of sound insulation match the subjective perception ?, in : 9th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2012 (cf. p. 104).
- SAMUELS, S. E. et J. PARNELL (2004) Peak noise events occurring in road traffic noise, in : Proceedings of Acoustics 2004, sous la dir. d'A. 2004, 307-312 (cf. p. 105).
- SCHLEGEL, R. et K. GILLILAND (jan. 1990) Evaluation of the Criterion Task Set. Part 1. CTS Performance and Swat Data - Baseline Conditions in : 178 (cf. p. 148).
- SCHLITTMIEIER, S. J. et al. (2008) The impact of background speech varying in intelligibility : Effects on cognitive performance and perceived disturbance in : Ergonomics, **51** :5 PMID : 18432448, 719-736 DOI : [10.1080/00140130701745925](https://doi.org/10.1080/00140130701745925) eprint : <https://doi.org/10.1080/00140130701745925>

1080/00140130701745925 URL : <https://doi.org/10.1080/00140130701745925> (cf. p. 36, 150).

SERVICE D'ÉTUDE SUR LES TRANSPORTS les routes, e. l. a. (2009) *Prévision du bruit routier 1 – Calcul des émissions sonores dues au trafic routier* Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable, et de l'aménagement du territoire Bagneux : SETRA, 133 (cf. p. 29).

SHINGLEDECKER, A. C. (1984) *A task battery for applied human performance assesment research* Airforce aerospace medical research laboratory, 33-37 (cf. p. 109, 111).

SIDA, K. (2016) Confort acoustique dans une chambre à coucher. Test d'écoute et évaluation subjective pour un cas d'étude, Mémoire de Master 2, rapp. tech. UPMC Saint-Gobain (cf. p. 31).

STEVENS, S. S. (1946) On the Theory of Scales of Measurement in : *Science*, **103** :2684, 677-680 (cf. p. 33).

— (1951) *Mathematics, measurement, and psychophysics* (cf. p. 33).

— (1975) *Introduction to its Perceptual, Neural, and Social Prospects* (cf. p. 33).

STROOP, J. R. (1935) Studies of interference in serial verbal reactions. in : *Journal of Experimental Psychology*, **18** :6, 643-662 DOI : [10.1037/h0054651](https://doi.org/10.1037/h0054651) (cf. p. 2).

SUSINI, P. et al. (1998) Caractérisation perceptive de bruits in : *Acoustique et Techniques*, **13** : 11-15 (cf. p. 29).

TU901, C. A. (2011) Towards a common framework in building acoustics, Rapport COST office (cf. p. 1).

VANDERVEER, N. (1979) *Ecological Acoustics : Human Perception of Environmental Sounds* Cornell University URL : <https://books.google.com/books?id=mkvHnQEACAAJ> (cf. p. 29).

VARDAXIS, N.-G. et D. BARD (2018) Review of acoustic comfort evaluation in dwellings : Part III—airborne sound data associated with subjective responses in laboratory tests in : *Building Acoustics*, **25** :4, 289-305 DOI : [10.1177/1351010X18788685](https://doi.org/10.1177/1351010X18788685) URL : <https://doi.org/10.1177/1351010X18788685> (cf. p. 1).

VARDAXIS, N. (2019) EVALUATION OF ACOUSTIC COMFORT IN APARTMENT BUILDINGS, eng thèse de doct. Lund University ISBN : 978-91-7895-222-9 URL : http://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/publications/tvba1000/web_TVBA-1016.pdf (cf. p. 60).

VENETJOKI, N. et al. (sept. 2006) The effect of speech and speech intelligibility on task performance in : *Ergonomics*, **49** : 1068-91 DOI : [10.1080/00140130600679142](https://doi.org/10.1080/00140130600679142) (cf. p. 36).

VIDAL, A. (2017) Diffusion de son 3D par synthèse de champs acoustiques binauraux, Thesis URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01501975/document> (cf. p. 47).

- VORLAENDER, M. (jan. 2008) *Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality* Springer, Berlin, Heidelberg DOI : <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9> (cf. p. 60).
- VORLAENDER, M. et P. DIETRICH (2008) Transfer path analysis and synthesis for auralization, in : *Acústica 2008*, Coimbra (cf. p. 60).
- WIERWILLE, W. W. et F. T. EGGEMEIER (1993) Recommendations for Mental Workload Measurement in a Test and Evaluation Environment in : *Human Factors*, **35** :2, 263-281 DOI : [10.1177/001872089303500205](https://doi.org/10.1177/001872089303500205) eprint : <https://doi.org/10.1177/001872089303500205> URL : <https://doi.org/10.1177/001872089303500205> (cf. p. 36).
- ZIARAN, S. (2013) Low Frequency Noise and Its Assessment and Evaluation in : *Archives of acoustics*, **38** :2, 265-270 DOI : [10.2478/aoa-2013-0032](https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0032) (cf. p. 104).