

Mémoire de fin d'études

**PERTINENCE DES
TRAITEMENTS DYNAMIQUES
POUR L'ÉCOUTE DE MUSIQUE
CLASSIQUE DANS UN
ENVIRONNEMENT BRUYANT**

VERS UN OUTIL DE LECTURE ADAPTATIF

Robin Rieuvynet

Directeur Interne : Etienne Hendrickx

Directeur Externe : Jean-Louis Nathan

Rapporteur : Mireille Faure

Soutenu le 13 juin 2016 à Saint-Denis.

Mémoire de section Son



Remerciements

Un grand merci à Etienne Hendrickx et Jean-Louis Nathan qui m'ont généreusement partagé leurs connaissances.

Merci à Frédéric d'Oria-Nicolas et au label Fondamenta pour leur intérêt et leur participation.

Merci à Etienne Petit pour l'entretien qu'il m'a accordé, pour avoir participé à l'initiation du thème de ce mémoire, et pour les bons moments passés à Medici.

Merci à Nicolas. Merci à Alice et Clémence pour leur terrasse.

Merci à Alexandre B., Alice, Thomas, Simon, Cédric, Alexandre D., Aloyse, Antoine, Matthias, Olivier, Jean, Clément, Nicolas et Gilles d'avoir participé au test perceptif.

Résumé

Ce mémoire vise à analyser les difficultés qui sont celles de l'écoute d'un enregistrement classique dans un milieu bruyant, et à préparer le développement d'un outil permettant d'améliorer qualitativement cette écoute.

Nous avons ainsi décrypté l'évolution des traditions d'écoute de la musique classique, jusqu'à l'établissement des conditions actuelles les plus rencontrées grâce à un sondage réalisé auprès de soixante-quatre mélomanes.

Nous avons analysé les problèmes rencontrés lors de l'écoute dans des environnements bruyants et envisagé des solutions techniques pour les résoudre, tout en sensibilisant notre lecteur aux points sensibles de ces solutions.

Enfin, un test perceptif nous a permis de déterminer avec précision quels types de traitements entreprendre sur les contenus musicaux en fonction des ambiances dans lesquels ils sont destinés à être écoutés.

Abstract

This thesis aims for analysing the difficulties of listening to classical music in a noisy environment, and to prepare the development of a tool that would permit to improve the quality of this listening.

We described the evolution of the listening traditions of classical music, until the establishment of a sum-up of all the actual conditions thanks to a pool carried out with 64 classical music lovers.

We analyzed the problems encountered during the actual listening of classical music in noisy environments and tried to solve them technically, while making our readers aware of the sensitive points of these solutions.

Finally, a perceptual test enabled us to determinate precisely what processing should be used on these musical excerpts according to the background sounds it aims for being listened to meanwhile.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Introduction	8
I Etat de l’art	10
1 L’écoute de la musique classique	10
1.1 Histoire de l’écoute de la musique savante	10
1.2 Ce qu’internet a changé	13
1.3 Mise en place d’un sondage en ligne	16
2 Problématiques liées au contenu	25
2.1 A propos du caractère sacré de la dynamique en musique classique	25
2.2 Caractère de la nuance	26
2.3 Interprétation des nuances	27
2.4 Les habitudes de production de la musique classique	28
2.5 Entretiens avec deux professionnels de la production classique . .	35
3 Le Masquage et ses conséquences sur l’écoute	42
3.1 Principe du masquage sonore	42
3.2 Le masquage dans le cas de l’écoute de la musique classique dans des milieux bruyants	46
3.3 Comment démasquer ?	49
3.4 Quelles sont les risques des traitements globaux sur la musique classique	53
II Test perceptif et résultats	55

4	Mise en place du test perceptif	55
4.1	Approche générale	55
4.2	Mise en place du dispositif	57
4.3	La diffusion des ambiances	61
4.4	Choix des extraits musicaux	62
4.5	Application des traitements	65
4.6	Réalisation d'un interface utilisateur	70
5	Résultats et analyse	72
5.1	Problèmes rencontrés	72
5.2	Résultats généraux	72
5.3	Résultats généraux sur l'appréciation de la dynamique	73
5.4	Résultats et analyse des préférences de mixage en fonction des lieux	79
5.5	Conclusions générales - Possibilité d'application	84
	Conclusion	87
	Annexe 1	88
	Annexe 2	91
	Annexe 3	93
	Bibliographie	97

Introduction

Nous partons du constat que le **mixage de la musique classique** est souvent **mal adapté à une écoute nomade**, dans un milieu urbain ou une voiture par exemple. En effet, certains passages des oeuvres sont parfois inaudibles, ou très fortement masqués dans ce type d'écoute.

Or, nous avons vu ces dernières années une évolution de la manière d'écouter de la musique. L'apparition des baladeurs, le développement de casques de qualité, ou l'amélioration des systèmes de diffusion sonores dans les voitures sont des facteurs qui ont conduit à la *nomadisation* de l'écoute, pour le meilleur et pour le pire. Et si l'ère de l'écoute de fichiers "mp3" de mauvaise qualité avec des écouteurs de qualité tout aussi médiocre semble doucement prendre fin, c'est sans doute pour laisser place à une écoute plus respectueuse de la qualité sonore, et qui attirera certainement un bon nombre d'audiophiles.

Notre ambition n'est pas de revoir les méthodes de mixage utilisées actuellement en musique classique, mais de les **compléter avec des outils qui permettraient de rendre possible et agréable l'écoute dans des environnements bruyants**.

L'utilisation dans ce cadre de la **diffusion web**, en pleine expansion dans le domaine de la musique enregistrée, nous paraît pertinente. Elle nous permettra en effet de nous affranchir des standards liés au format CD, et de pencher pour une solution adaptative. Notre but est de permettre à l'utilisateur de **choisir son mixage en fonction des conditions d'écoute** dans lesquelles il se trouve.

Nous étudierons donc pour cela dans un premier temps et avec finesse, les différents enjeux de l'écoute de musique classique de nos jours, son histoire, et

comment l'améliorer. Nous tenterons par la suite à l'aide d'un test perceptif de déterminer les préférences des mélomanes parmi les différentes techniques qui auront été abordées en première partie.

Première partie

Etat de l'art

Dans cette première partie, nous allons nous attacher à l'écoute de la musique classique dans notre société, ses particularités, son évolution au cours du temps, et sur les innovations envisageables pour la rendre meilleure à l'avenir. On définit la *musique classique* par opposition à la musique folklorique, légère, de variétés, au jazz ou à la musique contemporaine, comme la musique et les œuvres des musiciens composées dans le cadre de la tradition musicale occidentale¹. Cette étude permettra donc ensuite d'orienter notre recherche quant au développement d'un système efficace pour une optimisation de l'écoute de musique classique sur le Net. Nous nous appuierons sur un sondage qui nous dévoilera les conditions d'écoute les plus fréquentes pour un public mélomane, et aussi celles qui pourraient être rendues possibles par la mise au point d'un système d'optimisation de l'écoute en fonction des conditions.

Commençons tout d'abord par retracer l'historique de l'écoute de musique classique, afin d'avoir un avis éclairé sur l'évolution qu'elle pourrait avoir.

1 L'écoute de la musique classique

1.1 Histoire de l'écoute de la musique savante

Il est tout d'abord bon de rappeler que dans la grande majorité des civilisations, la musique a dans un premier temps été une forme d'expression sociale. Elle était jouée par des individus pour exprimer un sentiment, rythmer une tâche, communiquer avec des esprits, ou calmer des phénomènes non maîtrisés par l'homme (on retrouve ce type de cérémonies dans la culture Amérindienne en particulier). On découvre donc dans ces formes primitives deux **caractéristiques majeures de la musique** : elle est **sociale** et elle est **sacrée**. Cette musique primitive est

1. Repéré sur Larousse en ligne : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/classique/16417>

localisée dans un lieu particulier et dédié, comme le montrent les recherches menées par le préhistorien Michel Dauvois dans trois grottes d'Ariège², qui démontra que les peintures rupestres étaient concentrées dans des zones des grottes particulièrement réverbérantes, et donc que les hommes avaient certainement procédé à des rites sonores face à ces peintures. La musique classique est également localisée dans un lieu particulier, le lieu de culte religieux : l'église. Cela date en effet des origines de la musique chrétienne, qui apparaît en premier lieu dans le chant chrétien, puis grégorien, qui consistait à une simple lecture chantée des textes sacrés, et était pratiqué principalement dans les lieux de culte.

Cette musique a ensuite connu une longue évolution avec l'introduction des instruments à la renaissance, et l'influence de la musique profane, jouée par les troubadours. On note l'introduction de l'orgue dans les églises au XII^{ème} siècle, il a alors un simple rôle de guide-chant³.

A cette période, on distingue alors deux écoutes distinctes, l'une religieuse qui concerne principalement la messe, et l'une profane avec la musique de chambre, pour petit orchestre, qui est jouée pour les nobles au sein de leur propriétés.

C'est également avec l'apparition de l'opéra que la musique classique sort une nouvelle fois de l'église, pour cette fois s'approprier un lieu construit spécialement pour sa diffusion qui porte le nom du courant musical : l'Opéra. Cette pratique est étendue avec la construction d'auditoriums, ou de « concert halls » dédiés à la représentation et à l'écoute de la musique classique.

Jusqu'au XX^{ème} siècle, la musique ne peut être enregistrée, et l'on recense donc trois lieux principaux pour sa diffusion : l'**église**, le **salon** ou la **chambre particulière**, et enfin l'**Opéra** ou les **auditoriums** dédiés à son écoute. On comprend bien que l'écoute est dans chacun des cas très silencieuse, que les lieux sont acoustiquement favorables à sa diffusion, et que la musique n'est donc soumise à aucune contrainte en ce qui concerne sa dynamique.

2. Iégor Reznikoff, Michel Dauvois, "La dimension sonore des grottes ornées", *Bulletin de la Société préhistorique française*, Volume 85, Numéro 8, 1988, pp. 238-246

3. Norbert Dufourcq, *Le Livre de l'orgue français, tome 3 : La facture*, Editions A. et J. Picard, 1979, 316pp.

Avec l'arrivée de l'enregistrement musical, la donne change. Un des premiers enregistrements que l'on peut encore écouter est celui de la première danse Hongroise de Brahms, enregistrée en 1889, sur un cylindre de cire. Bien sûr, cet enregistrement est difficilement audible, on distingue à peine un tempo. Cependant, au début des années 1900, les techniques de prise de son se développent, et leur qualité s'accroît d'année en année. En 1948 sont commercialisés les premiers disques microsillon, qui marquent l'essor de l'écoute domestique, de par leur qualité et la possibilité d'une écoute stéréophonique à partir de 1958.

Cette écoute est donc dans un premier temps limitée à une écoute domestique, puisque le support de lecture, la platine, est encombrant et dépendant en énergie. Dans les premiers enregistrements sur microsillon, les valeurs de la dynamique globale sont assez faibles. Cela est dû aux restrictions induites par différents éléments de la chaîne, des micros en passant par la bande magnétique, et finalement le support de restitution. De plus le bruit de fond est encore assez important, et une faible dynamique permet donc de le compenser, de le rendre inaudible. On estime en moyenne que la dynamique d'un disque vinyl est de 50dB⁴.

À cette période, les problèmes de bruit ambiant dans l'écoute de musique classique sont donc assez restreints.

Les premières limites de l'écoute de musique enregistrée apparaissent avec les autoradios, qui se standardisent dans les voitures à partir des années 1950. L'écoute de musique classique est donc techniquement possible en voiture sur les stations radio dédiées, mais elle devait être extrêmement difficile, du fait du caractère bruyant des automobiles de l'époque. Cependant, les stations radios sont dès le début sensibilisées à ce problème et appliquent donc une compression. Il est très difficile cependant d'avoir des données précises sur les conditions d'écoute à cette époque. Avec les cassettes audio, puis les CD, qu'il est également possible d'écouter en voiture, ce même problème continue, d'autant plus que la dynamique

4. Collectif d'auteurs sous la direction de Denis Mercier, *Le livre des techniques du son*, Paris, Dunod, Collection Audio-Photo-Video, 2012, 584 pp

globale des CD de musique classique est souvent très élevée, du fait des nouvelles possibilités techniques qu'offrent le numérique.

Enfin, dans les années 2000, l'écoute mobile devient encore plus répandue avec l'apparition des baladeurs. Ainsi, les possibilités de conditions d'écoute se multiplient : dans la rue, dans les transports, au travail... De plus, les systèmes de restitutions utilisés sont souvent assez sommaires, limités à des écouteurs donc la restitution fréquentielle absolument pas optimale.

Au début des baladeurs « mp3 », les capacités de mémoire étaient très limitées et les formats utilisés étaient donc très compressés en débit. C'est une période de dégradation de l'exigence en matière de qualité d'écoute, et l'on peut penser (sans toutefois pouvoir avancer de chiffre précis, qui nécessiterait une étude bien plus approfondie) que le mélomane est resté fidèle à une écoute de qualité, au prix de l'immobilité. Cependant, une évolution rapide des capacités de mémoire permet aujourd'hui de pouvoir avoir à disposition une quantité presque illimitée de musique, en qualité CD, sur son baladeur, et d'écouter avec un casque de grande qualité. On suggère donc qu'une écoute mobile de musique classique est désormais tout à fait possible, et elle est d'ailleurs déjà pratiquée comme le montrera notre sondage présenté en I.1.3.

1.2 Ce qu'internet a changé

Depuis l'arrivée d'Internet dans les foyers, l'écoute de la musique sur CD, indépendamment de son style, a chuté de manière extrêmement rapide.

D'un point de vue économique, cela a totalement bouleversé l'industrie de la distribution musicale en général. En effet, en 2002, le nombre de CD vendus en France était de 150 millions, pour seulement 35 millions en 2015. Cependant, en 2015 toujours, près de 18 milliards de titres ont été écoutés en streaming. Mais sur le marché total de la vente de musique enregistré, qui est de 426 millions d'euros en 2015 en France selon le rapport annuel du SNEP (Syndicat National de l'Edition Phonographique), seulement 42% viennent des ventes numériques, on note donc un énorme décalage entre la consommation et le profit. Cela est notamment

dû aux services gratuits proposés par les sites de streaming.

Pour la musique classique, l'évolution est la même. De plus l'apparition des sites de streaming de haute qualité tel que « Qobuz » ou « Tidal » s'adresse particulièrement à un public exigeant quant à la qualité sonore. L'écoute de musique classique est donc maintenant ouverte au marché en ligne.

Les principales plateformes de streaming accessibles en France sont :

- Deezer
- Spotify
- Qobuz
- Tidal
- Apple Music
- Google All Music Access

Parmi ces différentes plates-formes on note une cohérence globale des prix, mais une différence sur la qualité audio des contenus proposés, avec des offres à un prix supérieur proposant une écoute en streaming en qualité FLAC, et donc sans réduction de débit. Les autres plateformes sont limitées à une qualité avec une réduction de débit mp3 à 320kb/s qui permet donc une écoute que l'on peut considérer comme transparente⁵.

Les technologies de diffusion sur Internet ont également évolué vers la mobilité. En effet, l'accès à Internet sur les mobiles a récemment permis une écoute sur les sites de streaming dans n'importe quel environnement, via le réseau 4G étendu, à une majeure partie du territoire comme le montre la carte ci-dessous. Par exemple, la RATP prévoit une couverture totale sur son réseau en 2017, qui permettra donc d'écouter de la musique sur Internet partout dans le métro ou le RER.

5. Agata Rogowska, "Audibility of Lossy Compressed Musical Instrument Tones", *Aes Convention 138*, 2015

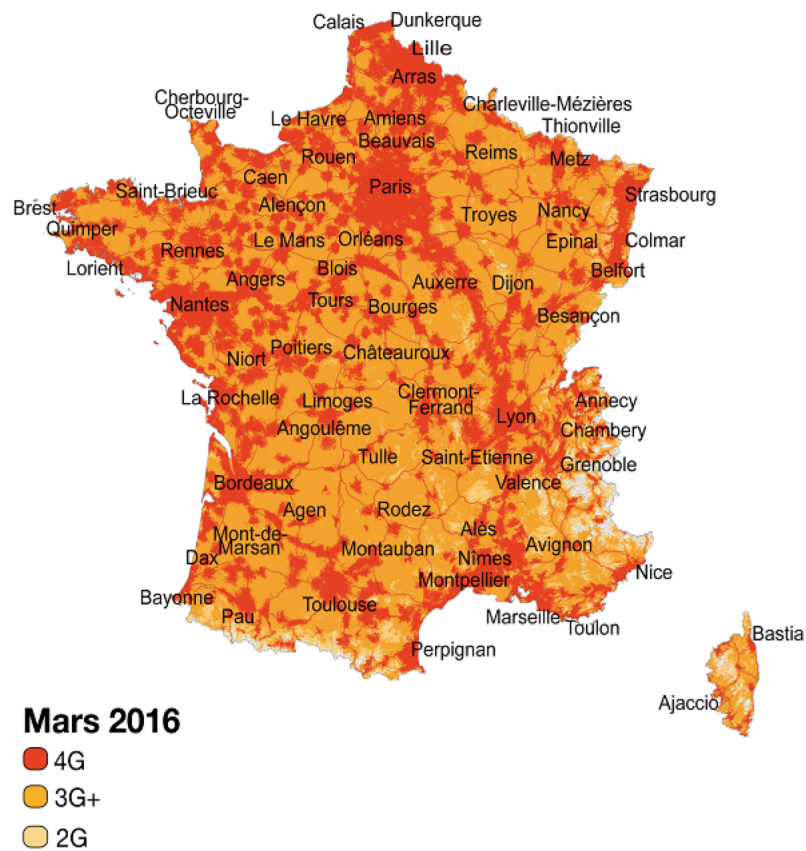


FIGURE 1 – Carte de la couverture internet mobile du réseau Orange en mars 2016 - Source : Orange France

On peut donc conclure que les technologies récentes et l'évolution du marché de la musique enregistrée mènent vers une tendance commune qui est celle de la mobilité. La musique doit être accessible partout, à tout moment, en en bonne qualité à l'aide d'un seul abonnement à une plate-forme de streaming : voici la tendance actuelle.

1.3 Mise en place d'un sondage en ligne

Approche et diffusion du questionnaire

Afin de pouvoir mettre en place correctement le test perceptif qui sera l'objet de la partie II., nous nous devons de connaître quelles sont les conditions dans lesquelles les gens écoutent de la musique classique dans la réalité. Il est également important de savoir quel est leur avis sur les mixages qu'ils écoutent dans des environnements bruyants, afin de pouvoir envisager concrètement une solution pour rendre l'écoute plus agréable dans ces environnements. Nous avons mis en place un web-questionnaire, réalisé à partir de l'outil Google Forms, et l'avons adressé à un public mélomane. Le questionnaire a été diffusé par mail auprès de trois publics différents :

- les élèves du Conservatoire de Musique de Tours.
- les élèves et anciens élèves de la formation FSMS (formation aux métiers du son) du CNSM (Conservatoire National Supérieur de Musique) de Paris.
- des contacts personnels amateurs de musique classique.

Dans une première question, nous demandons tout d'abord :

1. A quelle fréquence écoutez vous de la musique classique ?

- a. tous les jours
- b. toutes les semaines
- c. tous les mois
- d. très rarement

Une grande majorité de «tous les jours» (62,5%) et de «toutes les semaines» (34,4%) nous permet de justifier que le public interrogé répond bien au critère

énoncé ci-dessus de *public mélomane*.

Cela m'a donc permis de recevoir les avis de personnes sensibles à la fois à la musique et son interprétation et à sa qualité sonore. On peut donc qualifier ce public de très exigeant vis-à-vis des points sensibles dont traite ce mémoire.

Questionnaire et Résultats

Tout d'abord, les deux premières questions visent à connaître les conditions d'écoute favorites de ces sujets. Elles se devront d'être précises en questionnant à la fois le lieu d'écoute, qui sera facilement lié à une ambiance sonore donnée, et le système de restitution utilisé. Les questions sont les suivantes :

2. Dans quelles conditions en écoutez vous le plus souvent ? Précisez le lieu et le système de diffusion (enceintes, casque, écouteurs...).

3. Dans quelles autres conditions en écoutez vous fréquemment ? Précisez le lieu et le système de diffusion (enceintes, casque, écouteurs...).

Tout d'abord, il est important de noter qu'une grande partie des réponses pour les questions 2 et 3 n'ont pas pu être exploitées, soit car elles n'étaient pas complètes, soit car elles ne pouvaient pas être considérées comme sérieuses pour un très petit nombre. Pour la question 2, cela concerne 21 réponses sur 64 au total, et pour la question 3, cela concerne 18 réponses sur 58. Le reste des réponses est parfois multiple : certaines personnes ont précisé jusqu'à 3 conditions d'écoute et système de restitution à la question 2. On considère que chacune de ces réponses peut être exploitée indépendamment, car les personnes peuvent effectivement être à même de rencontrer plusieurs conditions d'écoute qu'ils considèrent de fréquence égale. Le tableau ci dessous donne la repartition des réponses pour les questions 2 et 3.

SYSTEME DE RESTITUTION / CONDITION D'ECOUTE	NOMBRE D'OCCURRENCES QUEST. 2	NOMBRE D'OCCURRENCES QUEST. 3
Enceintes / Environnement calme (bureau ou chez soi)	29	15
Casque / Transport	4	5
Casque / Rue	4	2
Casque / Environnement calme (bureau ou chez soi)	13	9
Casque / Voiture	1	1
Autoradio (enceintes) / Voiture	0	7
Casque / Avion	1	1

FIGURE 2 – Résultat du sondage effectué auprès d'un échantillon de 64 amateurs de musique classique.

Ces résultats nous permettent tout d'abord une conclusion très simple : la plupart des sujets qui ont répondu ont pour **habitude d'écouter de la musique classique dans un environnement calme : 42 sur 64** réponses pour le **premier choix** (question 2) et **24 sur 58** réponses pour le **second choix** (question 3). Cela nous montre une tendance globale de cet échantillon de population à éviter l'écoute dans un environnement bruyant. Ces chiffres sont à mettre en regard avec les modes d'écoute des autres styles musicaux, en particulier les musiques actuelles. Une étude menée en 2013 sur 600 personnes par Maxime Varloteaux dans le cadre de son mémoire de master 1 au sein de l'Université de Reims Champagne-Ardenne lui permet en effet d'affirmer que « la musique est principalement écoutée en déplacement » et que les modes d'écoute favorisés sont l'ordinateur et le baladeur mp3. Une autre étude réalisée par Claire Hannecart en collaboration avec le pôle de coopération pour les musiques actuelles en Pays de la Loire nous permet de noter que « 93% des jeunes écoutent de la musique sur leur téléphone portable et 70% le font plusieurs fois par jour ». Même si tous nos répondants au sondage ne sont pas des jeunes, cela nous permet de différencier l'écoute de musique classique de celle des autres styles musicaux : il existe bien une écoute propre à ce style musical, et qui nécessite donc a priori un contexte calme pour une écoute plus active que celle des autres styles de musique.

De plus, on note que dans ces environnements calmes, l'écoute favorite est celle aux enceintes, alors que le casque est lui plutôt réservé aux environnements

bruyants ce qui est tout à fait logique étant donné qu'il est difficile d'écouter de la musique sur enceintes dans un lieu public.

On note également que sur les 38 personnes ayant répondu sérieusement à la question 2, 10 écoutent donc de la musique classique en premier lieu dans un environnement bruyant. Cela représente **26% de l'échantillon**, il est donc intéressant d'essayer d'adapter les mixages classiques afin de rendre plus agréable l'écoute dans les conditions que ces gens rencontrent.

Très peu de personnes ayant répondu écoutent de la musique dans les transports, ce qui montre quelles sont en effet sensibles aux problèmes de dynamique qui apparaissent avec les environnements bruyants. Un des sujets précise même dans sa réponse qu'il écoute rarement dans le métro justement à cause de ces problèmes de dynamique.

Pour ce qui est de l'écoute en voiture, les résultats sont assez clairs : aucun des sujets n'a choisi cette option en premier choix alors que 7 l'on fait en deuxième choix. Cela représente donc 12% de l'échantillon pour le second choix. On peut donc envisager d'une part que les sujets interrogés n'ont pas souvent l'occasion de prendre la voiture (une grande partie de l'échantillon est parisienne) et, d'autre part, on peut noter qu'une partie non négligeable écoute tout de même parfois du classique en voiture et que c'est donc une condition d'écoute à prendre en compte dans la suite de l'étude.

On peut donc à l'aide de ces deux premières questions tirer des conclusions sur les conditions les plus répandues pour l'écoute la musique classique. Elles sont ci-dessous exposées en pourcentage du nombre de réponses totales.

SYSTEME DE RESTITUTION / CONDITION D'ECOUTE	POURCENTAGE QUEST. 2	POURCENTAGE QUEST. 3
Enceintes / Environnement calme (bureau ou chez soi)	45,3	25,9
Casque / Transport	6,3	8,6
Casque / Rue	6,3	3,4
Casque / Environnement calme (bureau ou chez soi)	20,3	9
Casque / Voiture	1,6	1,7
Autoradio (enceintes) / Voiture	0	12,1
Casque / Avion	1,6	1,7

FIGURE 3 – Resultat du sondage effectué auprès d'un échantillon de 64 amateurs de musique classique.

On établit donc l'ordre de préférence pour le premier choix :

1. Enceintes / Environnement calme
2. Casque / Environnement calme
4. Casque / Transports
4. Casque / Rue
6. Casque / Voiture
6. Casque / Avion

Et pour le deuxième choix :

1. Enceintes / Environnement calme
2. Casque / Environnement calme
3. Autoradio / Voiture
4. Casque / Transports
5. Casque / Rue
7. Casque / Avion
7. Casque / Voiture

On se doit de prendre en compte dans l'analyse de ces résultats que les se-

conds choix peuvent être indiqués comme tels non-pas parce que le sujet préfère écouter dans les conditions qu'il a mises en premier choix, mais parce qu'il est difficile pour lui d'écouter dans les conditions qu'il a mises en second choix pour des causes qui seront analysées en partie I.3.

Ensuite, nous devons également savoir quelles ont été les réactions de ces personnes aux mixages actuels lorsqu'ils étaient dans des conditions bruyantes. La question suivante est naturellement orientée vers le problème de la dynamique :

4. En écoutant de la musique classique à volume suffisant dans un environnement bruyant (train, voiture, métro...), avez vous déjà eu du mal à entendre certains passages ?

Une extrême majorité de gens a énoncé avoir déjà eu du mal à entendre certains passages à l'écoute de musique classique dans un environnement bruyant : 98,4%.

Si la réponse est positive, la question suivante est alors :

5. Si oui, quelle a alors été votre réaction ?

- a. Ne rien faire
- b. Ajuster le volume
- c. Passer à un autre titre
- d. Arrêter d'écouter de la musique dans cet environnement.

Si oui, quelle a alors été votre réaction ? (63 réponses)

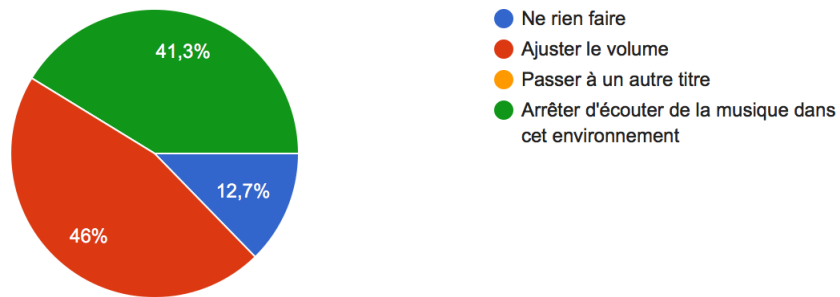


FIGURE 4 – Répartition statistique des réponses à la quatrième question du sondage.

Les deux réactions qui reviennent le plus souvent sont le fait de changer le volume ou d'arrêter d'écouter de la musique dans cet environnement, avec des fréquences très proches.

La réaction consistant à ajuster le volume revient à réaliser une compression dynamique manuellement. Cela montre une gêne de l'auditeur à écouter dans des conditions bruyantes, et donc une mauvaise adaptation du mixage à l'environnement d'écoute. On peut donc avancer que de proposer un mixage adapté aux environnements bruyants serait reçu positivement par les personnes qui ajustent le volume.

L'autre réaction consistant à arrêter d'écouter de la musique dans cet environnement montre également une mauvaise adaptation du mixage aux conditions bruyantes. Cependant, ces personnes n'envisagent même pas de continuer à écouter un tel mixage dans ces conditions, ou même à écouter de la musique dans ces conditions. On peut donc penser qu'une partie de ces personnes serait prête à écouter un mixage adapté à ces conditions, mais qu'une autre partie préfère tout simplement ne pas y écouter de musique.

Puis une dernière question permet de déterminer quel est l'avis des sujets sur

la réduction de dynamique dans le cas d'un contenu de musique classique écouté en milieu bruyant.

6. Seriez vous prêt à continuer à écouter de la musique classique dans un environnement bruyant si le volume était égalisé (en respectant l'écriture musicale) de manière à ce que toutes les parties soient parfaitement audibles ?

Parmi les personnes ayant répondu qu'elles ont déjà eu du mal à entendre des passages de la musique classique qu'elles écoutaient dans un environnement bruyant, 73% se disent prêtes à en écouter si le volume était égalisé de manière que tous les passages soient audibles dans cet environnement bruyant. Une seule personne ayant répondu ne jamais avoir eu du mal à entendre des passages de la musique classique qu'elle écoutait dans un environnement bruyant, elle a répondu positivement à la dernière question, mais cela n'est donc pas très significatif.

Conclusions du sondage

On peut conclure qu'une majorité non négligeable des personnes interrogées sont demandeuses d'un mixage adapté aux conditions d'écoute bruyantes en général. Cela justifie donc pleinement la suite de notre étude et donc la tentative de mise en place d'un outil permettant d'adapter le mixage de la musique classique aux conditions d'écoute.

Pour la suite de notre étude et la mise en place du test perceptif, nous avons décidé de déterminer 4 conditions d'écoute qui sont représentatives de ce que peut rencontrer le mélomane, représenté ici par notre échantillon de population. Nous avons donc vu que les deux conditions les plus largement rencontrées sont l'écoute en intérieur au casque et sur enceintes. Ce cas est en fait le moins intéres-

sant puisque c'est en quelque sorte la condition d'écoute idéale, celle où le bruit ambiant est le plus faible et gêne donc le moins l'écoute. Nous prendrons donc un des deux cas seulement, comme référence, celui le plus fréquent, et donc **l'écoute aux enceintes dans un appartement**. Puis nous avons vu que les deux événements les plus fréquents qui arrivaient ensuite étaient le cas d'une écoute au casque dans les transports (bus/RER/métro/train) et d'une **écoute au casque dans la rue**, nous retiendrons donc également ces deux conditions d'écoute. Une étude de tous les moyens de transport publics serait extrêmement difficile dans le temps imparti pour ce mémoire, nous allons donc synthétiser l'écoute en transport par une **écoute dans le RER au casque**, car elle paraît la plus probable et se rapproche naturellement du train. Enfin, nous avons remarqué que même s'il s'agit d'une écoute moins fréquente, une partie non négligeable de l'échantillon avait donné en deuxième choix **l'écoute sur autoradio en voiture**, qui sera donc également retenue. Elle représente de plus un cas typique où l'écoute de musique classique est souvent problématique.

2 Problématiques liées au contenu

Dans cette partie, nous allons aborder les différents points sensibles qu’il existe entre le contenu dont il s’agit ici « la musique classique enregistrée », et notre proposition d’améliorer son mixage en fonction de différentes conditions d’écoute. Tout d’abord, nous allons nous attacher au contenu musical et plus en particulier à la dynamique des morceaux classiques, et donc à l’importance des nuances. Nous avons pu interviewer deux professionnels de la musique classique : le directeur de production de medici.tv, spécialiste de la diffusion de musique classique sur Internet, et le directeur du label Fondamenta, également pianiste de renommée internationale.

2.1 A propos du caractère sacré de la dynamique en musique classique

Il est tout d’abord nécessaire de rappeler une définition : celle de la nuance. On la définit comme « chacun des différents degrés d’intensité que l’on peut donner aux sons. (Ces degrés sont indiqués par des termes en général italiens, allant de pianissimo à fortissimo, et par des signes : < [crescendo] et > [decrescendo] ou [diminuendo], qui modifient les nuances.) ». ⁶ Dans une œuvre classique, les nuances font partie intégrante de l’écriture d’une œuvre, et ne pas les respecter serait donc s’écarter de l’intention du compositeur, de la même manière que l’on changerait une note. Par exemple, dans ce court extrait de « Asturias » d’Isaac Albeniz, arrangé pour guitare seule par Steve Shorter, on trouve cinq indications de nuance qui constituent un aspect très important de cette œuvre : l’alternance des pianissimos et des mezzofortes donne toute son expressivité à cet extrait.

6. Repéré dans Larousse en ligne : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/nuance/55172>



FIGURE 5 – Extrait d’«Asturias» d’Isaac Albeniz (1892), arrangé pour guitare seule par Steve Shorter

Ces nuances apparaissent dans l’écriture à partir de la période dite classique, qui vient après la période baroque (celle-ci se termine symboliquement par la mort de J.S. Bach en 1750). Depuis cette époque, leur usage devient de plus en plus fréquent, avec les courants romantique, moderne puis contemporain. Comme suite logique de la musique classique, la musique contemporaine développe de plus son propre système de notation avec par exemple les « partitions graphiques », et aujourd’hui, il est possible de trouver des passages où seules les nuances sont indiquées, les notes étant laissées au libre choix du musicien.

Ainsi, il n’est pas envisageable de diffuser une pièce classique sans ses nuances, que ce soit une version enregistrée ou jouée en concert. En effet, comme nombre de ces pièces ont été écrites avant que l’on puisse les enregistrer, le respect de la partition est primordial, puisqu’il représente la volonté du compositeur.

2.2 Caractère de la nuance

Comme nous l’avons vu précédemment, la nuance, par définition, indique à l’instrumentiste quelle intensité donner à la note qu’il va jouer.

Il est prouvé que dans l’interprétation instrumentale, l’intensité est liée au

timbre : « L'enrichissement progressif en partiels aigus au fur et à mesure de la montée en nuance »⁷ est démontré pour le piano, et peut être élargi à bien d'autres instruments. On peut donc dire que la nuance instrumentale n'est pas seulement ressentie à travers l'intensité de la note, mais également à travers son timbre. On rappelle que le timbre d'un instrument, et par extension d'une note, est son contenu fréquentiel.

Or nous savons que les traitements utilisés en post-production audio permettent de changer l'intensité des notes sans changer ou en changeant très peu le contenu spectral de la musique. Nous reviendrons plus précisément sur ces traitements dans la partie consacrée au masquage fréquentiel.

On peut donc facilement imaginer la création d'un mixage audio où **sans modifier l'aspect "timbral" des nuances, nous ajustons leurs intensités** de manière à les rendre audibles dans les environnements d'écoute. Cette notion est primordiale pour la suite de ce mémoire, et régira à chaque fois notre travail sur la dynamique.

2.3 Interprétation des nuances

De plus, selon les chefs d'orchestres et les interprètes, les nuances ne sont jamais jouées de la même manière, et on parle donc à chaque fois d'une *interprétation* de la pièce. La question se pose donc : jusqu'où peut aller l'interprétation musicale ?

Comme l'écrit Louis Allix dans son étude intitulée *L'authenticité comme norme de l'interprétation musicale* : « nous avons constaté que chercher à reconstituer de la façon la plus exacte possible les propriétés sonores que les œuvres du répertoire possédaient au moment de leur création ne respectait pas l'esprit de liberté dans lequel une grande partie de ces ouvrages avaient été créés. ».⁸ Il existe donc

7. Xavier Boutillon, "Le piano : Modélisation physique et développements technologiques", Colloque de Physique C2, supplément au n°2, T.51 [tiré à part sans mention d'éditeur]

8. Louis Alix, « L'authenticité comme norme de l'interprétation musicale », *Savoirs en Prisme*, n° 2, «Normes, marges, transgressions», 2013, p. 173-198

plusieurs courants d'interprètes. Certains sont attachés à une interprétation la plus fidèle possible aux conditions de création de l'oeuvre, cela implique parfois l'utilisation d'instruments d'époque, de l'accordage de l'époque, ou encore de la disposition d'orchestre originale. D'autres se laissent une certaine liberté, en se permettant des arrangements dans l'agencement des parties, ou encore dans les tempi et les nuances.

La dynamique des oeuvres est donc également malléable, et l'on peut envisager d'en prévoir plusieurs versions en fonction de l'environnement d'écoute.

2.4 Les habitudes de production de la musique classique

La prise de son

La tradition de l'enregistrement de musique classique dit souvent qu'il doit être le plus fidèle et transparent possible. Colin Symes affirme en 2004 dans son ouvrage *Setting the Record Straight : A Material History of Classical Recording (Music/Culture)* : « Dans les cercles de musique classique, [...] ils n'ont jamais abandonné l'idée que le concert était l'articulation ultime de la musique et que le phonographe devait s'y référer. Les modes de représentation de la musique classique sur disque qui ont abandonné cette référence au concert ont eu tendance, à de rares exceptions près, à être marginalisées. ». Ce référentiel absolu du concert date des premières expériences sonores d'Edison, qui tentait au début du XXème siècle à démontrer qu'il était possible de réaliser un enregistrement qui est exactement fidèle à la réalité ; autrement dit qu'on ne puisse pas distinguer le son direct de l'enregistrement. À ces fins, il enregistrait des chanteurs, et réunissait à la fois l'enregistrement et le chanteur dans une session de « concert-démonstration » afin de prouver au public que les deux ne pouvaient pas être différenciées. Ces expériences montrent bien la volonté première de l'enregistrement, retranscrire le réel avec le plus de fidélité possible.

Cette volonté de transparence vis à vis du concert a depuis longtemps été

abandonné dans la production de musique actuelle, notamment avec l'arrivée des premiers effets et traitements au milieu du XX^{ème} siècle. L'apparition du métier de producteur / réalisateur sonore avec des personnalités telles que Georges Martin (célèbre producteur des Beatles) donne une autre dimension au travail du son, qui devient un élément à part entière de la création. Cependant, le milieu de la musique classique a gardé ses distances vis-à-vis de cet aspect de la production musicale.



FIGURE 6 – John Lennon et George Martin au Studio EMI, le 30 Mars 1967

Dans le courant des années 1950, la musique dite « électroacoustique » a su exploiter les nouvelles techniques et utiliser l'enregistrement comme un outil de création. Ce sont donc des personnalités comme Pierre Schaefer qui ont lancé un

mouvement musical moderne, puis l'ont théorisé⁹. C'est alors la première fois dans l'histoire de la musique qu'il apparaît une véritable révolution dans le concept d'instrument tel qu'on l'entendait avant 1950. Ainsi, des compositeurs comme Pierre Henry ou Pierre Boulez utiliseront comme instrument des sources sonores du quotidien, ou encore des enregistrements qu'ils modifieront. Alors, la volonté de transparence vis-à-vis du concert dont nous avons parlé auparavant n'a plus aucun sens puisque le concert n'est autre qu'une diffusion de l'enregistrement lui-même. Il y a donc inversion des rôles, et l'enregistrement devient le référentiel sur lequel le concert se base. Ce courant musical a une influence non négligeable sur l'univers de l'enregistrement audio, puisqu'il considère pour la première fois le matériau sonore comme un outil de création.

D'un point de vue technique, la prise de son considérée comme la plus pure est celle au couple de microphones, placé au point d'écoute optimal pour l'auditeur. C'est aussi la technique primitive de prise de son multipiste, puisque les premiers enregistreurs étaient limités à deux pistes et ne permettaient donc pas l'utilisation de microphones dits *de proximité* (proches des instruments par rapport au couple principal). De plus, l'utilisation d'un couple permet à la fois de capter le son émis par les instruments mais également la réverbération de la salle, et donc son empreinte sonore, ce que ne permettrait pas un microphone placé en proximité. C'est donc la manière la plus directe de retranscrire ce qu'un auditeur placé au niveau du couple de microphones entendrait. Cette technique est restée utilisée dans le cadre de l'enregistrement d'orchestre classique pour deux raisons techniques :

- au vu du nombre d'instrumentistes, il serait techniquement très coûteux d'utiliser un microphone, et donc une piste audio de l'enregistreur par instrument.
- les instruments étant très proches les uns des autres, le phénomène de diapho-

9. Pierre Schaeffer, *À la recherche d'une musique concrète*, Paris, Editions du Seuil, 232 pp, 1952

nie serait très important et les différentes pistes correspondantes aux instruments seraient donc très difficiles à mixer entre elles.

De nos jours, les possibilités techniques ont nettement évolué, et un enregistrement multipiste est très simple à mettre en place. De ce fait, la plupart des ingénieurs du son utilisent des micros de proximité en complément du couple principal. Souvent ce dispositif est utilisé pour ramener une sensation de présence sur certains instruments, mais toujours dans la volonté de ne pas travestir leur timbre original.

La post-production

La post-production d'un enregistrement classique est souvent beaucoup moins chronophage que dans le cas des autres styles musicaux. En effet, le principe de transparence s'applique au moment du mixage, et même si de nombreux ingénieurs du son utilisent des traitements, c'est le plus souvent pour corriger des défauts de prise de son, et rétablir le réalisme sonore. Par exemple, une prise de son rapprochée entraîne principalement deux déformations majeures du son enregistré par rapport au son que produit naturellement un instrument :

- la dynamique est modifiée, un phénomène de dynamique instantanée apparaît et accentue les variations naturelles de volume sonore de l'instrument.
- un phénomène de résonance apparaît dans les fréquences graves en approchant un microphone d'un instrument, dans les fréquences graves.

Ces phénomènes doivent donc être compensés au mixage pour se rapprocher du son naturel de l'instrument.

Dans la production de la musique classique, **l'étape du mastering est souvent mêlée au mixage**. Dans son mémoire écrit dans le cadre de la formation

FSMS du CNSM de Paris, Mathilde Genas analyse la place de cette étape dans le processus de production¹⁰. Elle a mené une enquête auprès de 20 professionnels du son classique. Parmi les sujets, 19 d'entre eux affirment « qu'il est très rare qu'un mixage soit envoyé en studio de mastering ». On rappelle que le métier d'ingénieur mastering consiste à mêler les différents morceaux d'un disque pour en faire un *programme*, et donc à s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble, et, le cas échéant, effectuer les corrections permettant cette homogénéité. Cela montre bien que la finalisation du disque est souvent faite au stade du mixage dans le cas d'un disque classique.

La même étude menée par Mathilde Genas montre que l'ingénieur du son de mixage prend souvent en charge le travail d'un ingénieur de mastering dans le cas de la musique classique. En effet tous les sujets interrogés disent effectuer des modifications sur le «BUS MASTER»¹¹. Nous allons donc lister les différents traitements utilisés qui ont été répertoriés dans cette étude.

- Suivi de niveau manuel : permet de compenser les niveaux faibles en les rehaussants, et ainsi diminuer la dynamique globale.
- Limiteur : Utilisé pour réduire les pics de volumes soudains, et permet ainsi d'augmenter le volume global sans que le programme ne sature.
- Compresseur : pour réduire la dynamique globale de manière automatique.
- Compresseur multibande : permet de réduire la dynamique d'une ou plusieurs bandes de fréquences. Il est moins utilisé que le précédent et permet de corriger la couleur trop forte d'une salle, ou un mode acoustique qui n'a pas pu être évité à la prise.
- Compresseurs en parallèle : utilisé de la même manière que le compresseur, mais avec un rendu différent.
- Egalisation fréquentielle : utilisé pour corriger la couleur globale d'une salle, ou donner un « grain » particulier au son.

10. Mathilde Genas, Quel mastering pour la musique classique ?, Mémoire du CNSM de Paris, département techniques du son, 2015

11. Bus Master : chemin du signal dans une console de mixage dans lequel les différentes pistes audio sont mélangées

On voit donc que la plupart des ingénieurs du son utilisent des traitements globaux sur leurs mixages, ce qui revient donc à un travail de mastering. On note également dans cette étude qu'un bon nombre d'entre eux sont sensibles au fait de réduire la dynamique afin de rendre le mixage plus facile à écouter dans des conditions variées.

Un des ingénieurs du son interrogés parle de la norme de diffusion TV, dénommée EBU R128. On rappelle que cette norme concerne tous les contenus diffusés à la TV et leur impose un niveau de loudness¹² moyen égal à -23 LUFS à plus ou moins 1 LUFS près et un niveau maximum à -1dBTP. Cela impose donc pour les programmes une dynamique contrôlée. Il dit que l'application d'une telle norme à la musique pourrait être intéressante, car elle permettrait une homogénéité des contenus : « *Avec le développement de la musique dématérialisée, cette norme va sans doute peu à peu s'étendre à la musique seule afin que les niveaux soient tous comparables quelque soient les médias.* »

Cette enquête révèle également qu'une des préoccupation majeure de l'ingénieur du son de musique classique est la gestion de la dynamique « globale » du programme dont il réalise le mixage. En effet, la plupart des ingénieurs du son interrogés déclarent que dans le but d'augmenter le niveau moyen, ils atténuent les fortes crêtes, ou bien ils remontent les bas niveaux, ce qui revient bien à diminuer la dynamique globale. Pour la plupart d'entre eux, la mesure avec laquelle cette réduction de dynamique est opérée dépend de la diffusion du mixage réalisé. Par exemple, l'un des sujets déclare à propos de la gestion de la dynamique globale :

« *Tout dépend du support :*

- *pour un disque, on laissera presque toute la dynamique*
- *pour la radio, on compresse en direct pour ne pas descendre en dessous de -30dB environ même dans les très doux et on s'autorise à monter jusqu'à -1dB*
- *pour un programme TV, il faut suivre la norme EBU R128, qui impose de réduire la dynamique et d'avoir un certain niveau moyen »*

12. Loudness (*anglissisme*) : en acoustique, attribut d'un son qui détermine le niveau sonore ressenti par l'auditeur. Repéré sur Encyclopædia Britannica : <http://global.britannica.com/science/loudness>

Cela nous montre bien que malgré des habitudes de mixage qui tendent à très peu traiter la dynamique d'une oeuvre classique, beaucoup d'ingénieurs du son sont bien conscients qu'il est nécessaire d'adapter le mixage en fonction du support de diffusion.

L'illusion de la transparence

Nous avons à plusieurs reprises évoqué dans cette partie la notion de transparence du son, que nous allons tenter ici de définir plus clairement. On parle donc de la transparence de la chaîne audio, du champ sonore émis par les instruments jusqu'au contenu restitué par les instruments. La transparence audio pourrait donc être définie ainsi : « *caractéristique de la chaîne audio lui permettant de restituer strictement le même signal que celui qui a été capté* ». L'intuition nous dira bien sûr que ce genre de configuration est totalement irréalisable, mais nous allons tout de même le démontrer en plusieurs points.

- du point de vue fréquentiel : on sait bien que tous les éléments de la chaîne audio ont une réponse fréquentielle non linéaire. Souvent, ils sont même parfois choisis pour leur irrégularité fréquentielle qui peut leur conférer une sonorité, un « grain particulier ». C'est le cas par exemple des microphones DPA 4041, largement utilisés en musique classique, dont la courbe de réponse est donnée ci dessous (source DPA France) :

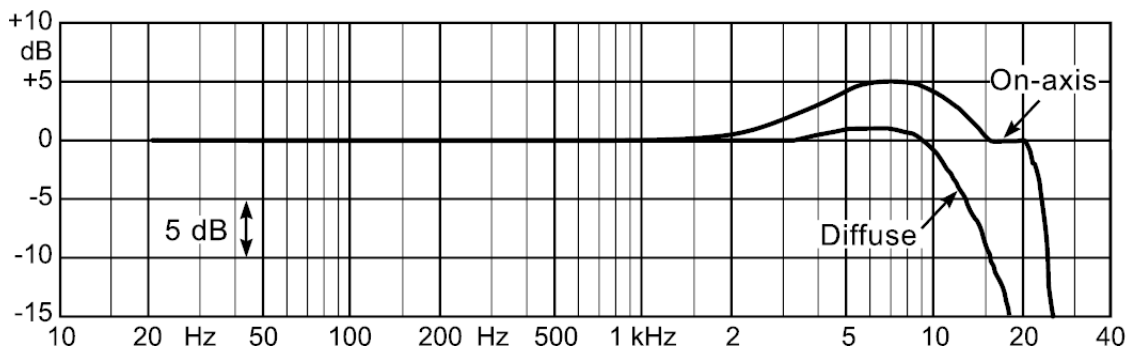


FIGURE 7 – Courbe de réponse en fréquence du DPA 4041 (source DPA France)

- du point de vue de la spatialisation, on ne peut pas espérer retranscrire tous les placements réels des instruments de manière exacte, et cela même ne serait certainement pas agréable à l'oreille.
- lors d'une écoute domestique, il est extrêmement rare que les conditions acoustiques, ou que le système de restitution permette une écoute optimale comme elle peut l'être en studio.

On se rend bien compte que la volonté de transparence d'un mixage n'est qu'une illusion, et que bien que l'esthétique sonore pût se vouloir naturaliste, et respecter le contexte de la performance, il est vain de tenter d'obtenir un mixage totalement transparent. De plus, on peut penser qu'il est plus logique de vouloir s'adapter à l'écoute réelle, qui n'est certes pas toujours optimale, et de donner ainsi la possibilité aux auditeurs de recevoir la musique dans les meilleures conditions possibles.

2.5 Entretiens avec deux professionnels de la production classique

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai pu mener deux entretiens avec des personnes travaillant au sein de structures de production de la musique classique :

Etienne Petit et Frédéric D’Oria-Nicolas. Le choix de ces personnes est venu avec la particularité de mon sujet, qui vise donc à traiter d’une écoute dans des conditions de la vie courante, c’est pourquoi je ne me suis donc pas orienté vers des ingénieurs du son, et j’ai préféré m’adresser à des personnes responsables de la production. Nous avons également choisi Etienne Petit pour sa connaissance des problématiques liées à la diffusion web, qui nous paraît être une fin logique pour une adaptation du mixage classique à différentes conditions d’écoute.

Entretien avec Etienne Petit, directeur de production chez medici.tv

La société MUSEEC/medici.tv voit le jour en 2008, sous l’impulsion d’Hervé Boissière qui fut auparavant directeur artistique chez Warner Classic puis Naïve Classic, et donc un homme d’influence dans le milieu de la production et la distribution de musique classique.

Sa démarche se détache de celles des maisons de disques cités ci-dessus, puisqu’il se focalise uniquement sur la diffusion web. En effet, dans les débuts des années 2000, les ventes des disques classiques sont en recul, et un album peine souvent à se vendre à plus de quelques milliers d’exemplaires. Il advient donc de trouver un nouveau modèle économique pour la musique classique et donc d’autres médias de diffusion adaptés aux nouvelles technologies. Et c’est ce que tente de faire Hervé Boissière avec le site medici.tv.

The logo for medici.tv features the word "medici" in a large, black, serif font, followed by ".tv" in a smaller, black, sans-serif font. A small red dot is positioned between the "i" and the "t".

FIGURE 8 – Logo de l’entreprise MUSEEV/medici.tv

Etienne Petit occupe de poste de *Production Manager* au sein de cette société depuis sa création, et il est donc chargé de la production des films réalisés pour

medici.tv, du processus technique de diffusion live, et également du contrôle de la qualité artistique des contenus diffusés en live ou en replay. Il est donc très sensible à la qualité sonore des contenus, et également au fait que la diffusion Web diffère de celle sur CD ou autres supports.

Durant cet entretien, nous avons traité la question de l'exception de la diffusion sur Internet (au niveau sonore). Son avis est que « *la grande différence est que lors d'une diffusion à la radio ou la TV, les personnes écoutent sur un device¹³ dont le standard est peut être meilleur que pour des enceintes d'ordinateur, des enceintes de bureau ou autre. Cela doit influencer les choix du streaming par rapport au device sur lequel il est regardé* ». Cela nous montre bien que l'on peut être sûr qu'il existe une réelle différence entre les conditions d'écoute sur Internet et les autres, d'abord par leur diversité, et aussi par l'hétérogénéité de leur qualité. En effet, pour une diffusion TV, on sait que les gens vont écouter le son soit sur les enceintes intégrées de leur TV, soit sur des enceintes adaptées, soit plus rarement, au casque. Et cela dans un environnement la plupart du temps calme puisque l'on ne peut regarder la TV que chez soi. On peut donc facilement adapter la diffusion à ces conditions, en moyennant et c'est d'ailleurs ce que permet la norme EBU R128 citée plus haut.

Nous avons également abordé la question de la réduction de débit, qui est encore nécessaire lors de la diffusion en streaming, du fait de la bande passante réduite de certains utilisateurs d'internet. En parlant de la différence entre la diffusion web et les autres médias « *les contraintes de débit et d'encodage ne sont pas les mêmes* ». « *Pour du live nous utilisons un débit de 160 kbits/s, la Philharmonie Live délivre un débit de 192 kbits/s, Culturebox 96 kbits/s et Arte concert 128kbits/s* ». On rappelle pour mémoire que le débit en qualité CD (16bits, 44,1 KHz) est de 1,4 Mbits/s. Il explique cela : « *la contrainte est au niveau des technologies de streaming actuelles, qui imposent que le débit audio soit le même pour tous les flux de diffusion vidéo, et comme on pense un flux très bas pour une consommation en 3G, on est obligé de garder un flux audio qui ne soit pas très élevé* », « *si on veut être disponibles pour des mauvaises connexions, l'audio s'en trouve impacté* » et

13. Device (*anglisme*) : appareil permettant de diffuser un contenu multimédia

que « *les mobiles et les tablettes représentent 30% des consommateurs* » dans le cas de medici.tv.

Pour ce qui est du traitement de la dynamique audio dans les productions de medici.tv, il précise qu'il existe un traitement particulier adapté au streaming. « *le but de beaucoup d'ingénieurs du son avec qui on travaille et qui adaptent le travail pour le streaming est souvent d'être moins compressés que pour la TV, la démarche est vraiment d'être le plus fidèles possibles.* ». En effet, précisément dans le cas de la diffusion d'un contenu vidéo, les conditions d'écoute sont à envisager différemment que pour de la musique seule : « *comme il y a un contenu vidéo, les gens ont davantage tendance à regarder medici dans un endroit calme* ». Cependant, étant donné que medici.tv travaille avec des équipes techniques différentes, il existe parfois des différences entre les prestations sur le traitement de la dynamique et du niveau de référence du son. Cela entraîne parfois des problèmes à la diffusion qui doivent être réglés en accord avec la production « *on est parfois confronté au problème du volume de base qui est trop faible. Comme on travaille avec des prestataires du monde entier, il arrive qu'on demande de corriger le volume.* » , « *il arrive parfois que l'on ait une compression très forte, laide, et il arrive parfois au contraire qu'il n'y en ait pas assez* ».

On peut donc conclure de cet entretien que dans le cas précis de la diffusion de vidéo de musique classique, les problématiques sont proches de celles de la diffusion de son seul, à la différence que les conditions d'écoute ne sont pas les mêmes puisque les gens sont amenés à regarder le contenu dans des conditions plus calmes. Cependant, cela soulève la question de la réduction de débit, qui est également utilisée par les sites de streaming de musique comme nous l'avons vu précédemment.

Entretien avec Frédéric D'Oria-Nicolas, fondateur et directeur artistique du label Fondamenta

Le Label Fondamenta a été créé par le pianiste Frédéric d'Oria-Nicolas en 2008. Il en assure également la direction artistique. Frédéric d'Oria-Nicolas est avant tout un pianiste de renommée internationale : repéré lors du Festival International

de Colmar, il fera ensuite des classes prestigieuses en Italie, Finlande puis en Russie où il étudiera pendant 7 ans dans la classe de Tatiana Zelikman. Il obtient par la suite de nombreux prix comme celui de Révélation Classique de l'Année en 2009.



FIGURE 9 – Logo du label Fondamenta

Son perfectionnisme dans le travail du son, autant dans l'interprétation musicale que dans la production, devient une ligne directrice du label Fondamenta. Pour chaque production, le choix de la microphonie, de la salle, et de l'esthétique propre fait l'objet d'un travail minutieux.

De plus, le label est le premier à proposer un concept de double mastering pour chacun de ses albums : un CD dit « Fidelity », destiné à être écouté sur un très bon système de sonorisation et dans des conditions propices, et un CD dit « Mobility », destiné à être écouté en voiture, avec des écouteurs, ou sur son ordinateur. Ces deux masterings font l'objet d'un travail de mixage très fin et de recherches sur des traitements dynamiques et fréquentiels appropriés qui ont suscité notre intérêt et abouti à un entretien avec Frédéric d'Oriat Nicolas.

Sa démarche de travail sonore vient donc de sa carrière musicale : « *on peut fabriquer un son au piano, l'essentiel de mon travail [en tant que musicien] résidait sur la qualité du son et la qualité du phrasé, mais pour moi, les conditions de qualité d'enregistrement n'étaient pas adaptées* »

Pour chacun des projets mis en œuvre par le label, un soin très particulier est apporté à l'adéquation entre le traitement du son, l'œuvre et l'interprétation : «

ce qui est important, c'est de comprendre le répertoire joué et de l'enregistrer dans des conditions adaptées ». Cela joue beaucoup sur le choix du lieu : *« beaucoup de maisons de disque ont seulement deux lieux, et quand l'un n'est pas disponible, ils font dans l'autre » « pour nous les salles changent toujours car le répertoire change toujours »*.

Puis nous avons abordé les particularités du double mastering proposé par le label, et tout d'abord l'origine de ce concept : *« au bout de deux ou trois productions, au moment du mastering, on réduisait la dynamique, et je trouvais cela toujours moins bien (que le mixage original) »*. Le label a donc lancé un format qui permet deux écoutes différentes, au moyen de deux disques physiques dans la même pochette, et donc pour la même musique. *« Ce que l'on faisait sur les premiers albums c'est un compromis, et l'ADN du label c'est de n'en faire aucun... pourquoi on ne pourrait pas faire deux CDs différents ? »*, *« le résultat est plus cher, plus compliqué, mais nous avons eu raison de le faire puisque Sony est venu nous voir et ils sont maintenant nos distributeurs en France »*.

Le concept a été lancé fin 2010, et le résultat est selon Frédéric D'Oria-Nicolas très satisfaisant : *« maintenant en France, on vend 500 ou 600 copies alors qu'à l'époque on en vendait 20. »*

Nous nous sommes ensuite penchés sur la réalisation technique d'un tel concept : *« pour le mastering Mobility, on fait une première mouture, puis on le teste, en voiture. On fait de l'autoroute, on fait de la ville, et on le teste dans plusieurs voitures, et on fait toujours plusieurs corrections après »*, *« c'est quelque chose qui est fait à la feuille, au fader »*. *« Le Fidelity c'est vraiment le master [le mixage sans retouche de mastering], c'est à dire qu'on normalise juste le fichier et on l'envoie »*. Pour le directeur artistique, la réalisation de ces masterings Mobility implique un travail technique très poussé : *« le travail sur la version Mobility va parfois au-delà du mastering. On se dit des fois : il suffirait de monter les micros d'appoint par exemple, et on refait donc parfois un mixage »*. Il est très important de garder l'esprit de l'oeuvre en tête durant ce travail pour que ce mastering à la dynamique réduite respecte l'esprit de la performance musicale *« il y a deux choses qui priment avant tout, c'est qu'il ne faut ni trahir le texte musical, ni*

trahir ce que l'interprète a voulu faire », « il faut faire tout ce qui est possible techniquement pour que l'auditeur comprenne la volonté de l'interprète ».

Enfin, à la question : *pour vous serait-il intéressant de réaliser un mastering par condition d'écoute ?* Il nous répond « *pour moi un seul Mobility est suffisant pour toutes les conditions d'écoute bruyantes* », en avançant cela comme un argument d'expérience.

Pour conclure sur cette partie, on dira que l'on voit donc que malgré une tradition très ancrée dans le milieu de l'enregistrement classique, tourné vers la transparence, la plupart des ingénieurs du son se permettent des traitements dynamiques et fréquentiels. Cela est souvent réalisé dans le but de rendre le mixage plus *transportable*, c'est-à-dire pour qu'il puisse être écouté dans des conditions assez variées. De plus on a vu que le label Fondamenta allait jusqu'à réaliser deux masterings différents pour chaque disque, l'un destiné à une écoute dans des conditions optimales et l'autre à une consommation en déplacement, dans une voiture ou dans d'autres environnements bruyants. Cela montre bien l'importance d'une adaptation du mixage aux conditions dans lesquelles est écoutée la musique. La pratique actuelle est de réaliser, comme le souligne Frédéric d'Oria-Nicolas, un compromis entre les différentes conditions d'écoute rencontrées, en se basant sur l'expérience et donc sans chercher à optimiser pour une condition d'écoute en particulier. Il est donc intéressant de chercher une solution technique qui permettrait d'adapter le mixage de la musique à différentes conditions d'écoute rencontrées, ce qui fera principalement l'objet de notre seconde partie.

Mais d'abord, nous allons nous intéresser au phénomène physique qui est à la cause de ces désagréments lors de l'écoute dans les environnements bruyants : le masquage.

3 Le Masquage et ses conséquences sur l'écoute

3.1 Principe du masquage sonore

Le principe du phénomène du masquage auditif se produit lorsqu'un son fort empêche de percevoir un son faible. On appelle pattern de masquage d'un son (masquant) la zone du plan amplitude / fréquence dans laquelle on ne peut plus entendre un son pur, quand ce son est émis en simultané. Le graphe ci-dessous nous donne un exemple :

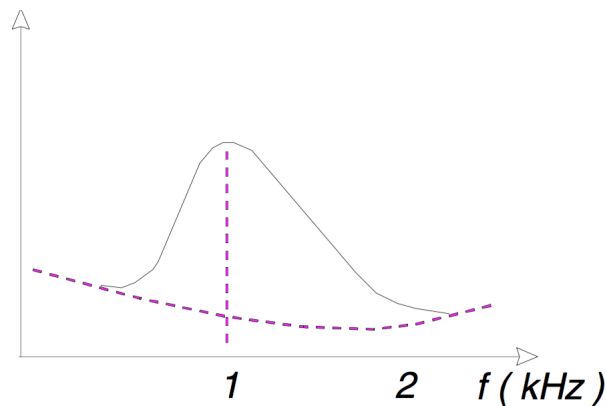


FIGURE 10 – Exemple d'un pattern de masquage par un signal sinusoïdal pur à 1KHz

La mesure d'un pattern de masquage peut se faire de manière empirique, en proposant des sons purs à des intensités et fréquences variables, superposés à l'écoute du son masquant. On détermine alors une courbe d'intensité en fonction de la fréquence, correspondante au seuil de masquage du son masquant, c'est ce que l'on nomme alors « pattern de masquage ». Le graphique ci-dessous montre le principe de l'expérience qui permet de déterminer ces courbes.

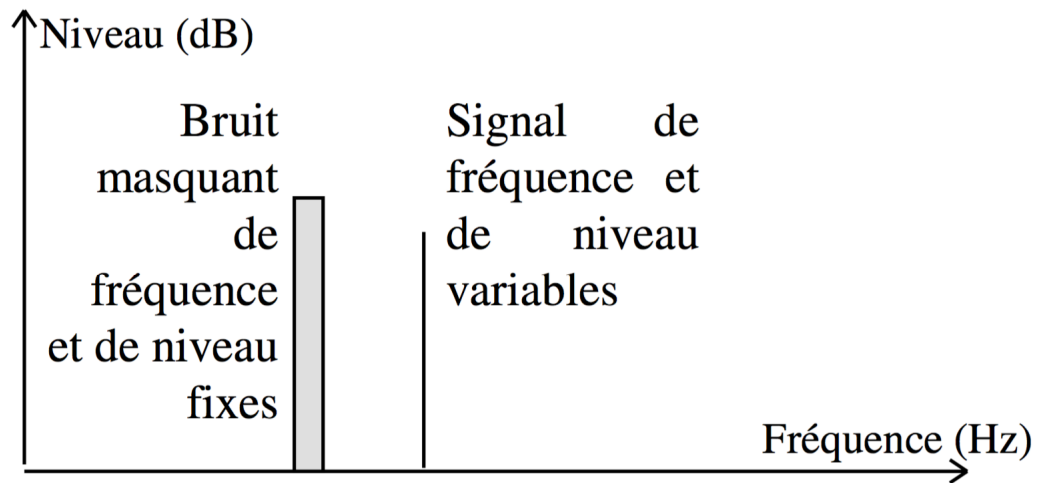


FIGURE 11 – Principe de l'expérience de détermination d'un pattern de masquage

On trouve donc que les patterns de masquage ont en général une pente plus faible à droite qu'à gauche, ce que l'on peut traduire simplement par : « les graves masquent les aigus ». Cela s'explique en partie par la formation de l'oreille interne. Permettons-nous d'abord quelques rappels sur son fonctionnement.

L'oreille interne intervient dans le processus de l'audition après l'oreille externe (partie située entre le pavillon de l'oreille et le tympan) et l'oreille moyenne (qui se situe du tympan jusqu'à l'entrée de la cochlée, appelée la fenêtre ovale). Elle est constituée, pour la partie permettant l'audition, d'un tube, rempli d'un liquide incompressible, enroulé sur lui-même et dans lequel sont présents les capteurs qui permettent de transformer l'onde sonore mécanique en onde électrique (signaux nerveux) : c'est la cochlée. L'onde sonore est donc transmise par l'oreille moyenne et se propage dans le liquide contenu dans ce tube. Sur toute sa longueur, des petits capteurs (appelés cellules ciliées) permettent de détecter chacun une fréquence donnée. Les fréquences hautes sont détectées au début de la cochlée et les fréquences basses à la fin. Le schéma ci-dessous donne une idée de l'architecture

globale de l'oreille interne et de la forme de la cochlée :

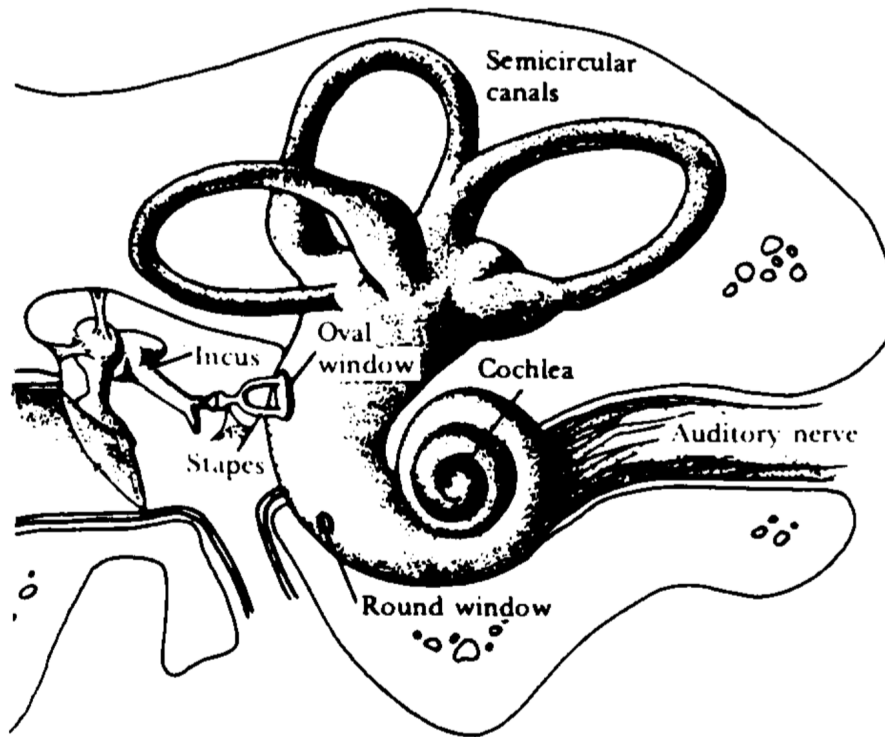


FIGURE 12 – Schéma descriptif de la cochlée humaine

La cochlée est donc formée de telle manière que les fréquences basses sont captées à l'extrémité de la membrane basilaire, et elles rencontrent donc les autres fréquences avant, et elles sont donc à même de les masquer. De même, on remarque que la forme du pattern de masquage correspond à celle du pattern d'excitation produit par le son masquant sur l'oreille interne. Il est donc prouvé que toute la zone fréquentielle qui est excitée par le son masquant (et qui correspond à une partie des cellules ciliées) est dès lors moins réceptive à d'autres sons qui arriveraient dans le même temps.

Pour déterminer un modèle mathématique de ce masquage, on peut se baser

sur les expériences de Fletcher¹⁴ qui ont permis de déterminer les courbes d'accord psychoacoustique. Celles-ci représentent pour un son pur très faible le niveau du masqueur (bruit à la bande fréquentielle courte) nécessaire pour ne plus entendre ce son pur, en fonction de la fréquence du masqueur. L'établissement de ces courbes ont abouti à un modèle mathématique permettant de déterminer le seuil de détection d'un son pur dans le bruit, basé sur les hypothèses suivantes :

- le système auditif périphérique peut être considéré comme un ensemble de filtres linéaires recouvrants, les « filtres auditifs ».
- la détection d'un signal dans un bruit fait appel à un et seulement un de ces filtres, celui de rapport signal sur bruit (RSB) maximum.
- seules les composantes du bruit qui passent dans ce filtre ont une incidence sur le masquage.
- le seuil de détection de la sinusoïde est environ égal au niveau du bruit dans le filtre.

$$P_s = K * W(f) * N(f)df$$

Où P_s est la puissance minimale du signal pour la détection, K est le rapport des puissances du signal et du masque à la sortie du filtre au seuil de détection, $W(f)$ est une fonction de pondération qui donne la forme du filtre auditif, et $N(f)$ est le spectre de puissance à long terme du masque.

Ce modèle nous permet de déterminer les patterns de masquage pour chacun des points de la membrane basilaire (qui porte les cellules ciliées). En effet si l'on

14. Fletcher H., *Auditory Patterns*, Rev. Mod. Phys.12, 1940, pp 47-65

suppose qu'un seul filtre auditif est utilisé, que ce filtre est linéaire, et qu'au seuil de perception du signal le masque produit une sortie constante sur ce filtre, alors la courbe de pattern est obtenue en inversant la forme du filtre auditif.

On peut donc conclure pour le cas précis de notre étude que le masquage de la musique dépend de quatre facteurs à tout instant : l'intensité sonore du masqueur, celle de la musique, la répartition fréquentielle du masqueur, et celle de la musique. On comprend bien qu'une analyse étendue à chaque instant est impossible à réaliser. Nous nous baserons par la suite donc sur l'analyse fréquentielle et l'intensité moyenne sur des extraits de 10 secondes choisis comme représentatifs des sons masquants complexes étudiés. Pour les extraits musicaux susceptibles d'être masqués, nous les analyserons au cas par cas, selon les extraits choisis en partie II.

3.2 Le masquage dans le cas de l'écoute de la musique classique dans des milieux bruyants

Tout d'abord, nous avons vu dans le paragraphe précédent que le masquage était souvent localisé en fonction de la zone fréquentielle du masqueur. On travaillait alors avec des masqueurs limités à une fréquence ou une très petite zone fréquentielle. Or dans cette partie, nous allons voir que les bruits masquants, qui sont donc les ambiances correspondant à différentes conditions d'écoute, occupent une zone fréquentielle très large, et que leur étude est donc plus complexe. Rappelons tout d'abord les 4 conditions que nous avons retenues à l'issue du sondage réalisé en I-1) :

- l'écoute en voiture sur les enceintes de l'autoradio
- l'écoute au casque dans le RER
- l'écoute au casque dans la rue
- l'écoute sur des enceintes dans un appartement

Afin de connaître les effets de masquage induits par ces quatre environnements, nous avons mis en place un procédé de captation. Elle se fera au format 4.0, à l'aide d'une croix IRT, pour des besoins qui seront expliqués plus tard dans ce mémoire. Pour cette partie nous n'utiliserons qu'un seul canal des quatre captés, nous avons choisi arbitrairement le canal avant gauche. Les microphones utilisés sont des OKTAVA MK12, de directivité cardioïde. L'enregistreur est un MARENIUS 4 pistes. De plus nous avons réalisé cette captation en l'étalonnant, pour pouvoir réaliser toute l'analyse qui va suivre en se basant sur le niveau acoustique de ces ambiances, mesuré en dB(C) acoustique.

Cet étalonnage est réalisé à l'aide d'un sonomètre. Lors de la captation de chaque ambiance, un top est donné au début à la voix, et on note la valeur mesurée par le sonomètre exactement trois secondes après ce top, mesurées à l'aide d'un chronomètre. Le délai de 3 secondes permet que le sonomètre ne soit plus influencé pas le son du « top » à la voix. Celui-ci est systématiquement placé en mode « slow - dB(C) » afin d'obtenir des valeurs assez stables (mode slow) et d'être homogène sur l'ensembles des mesures (dB(C)).

Nous obtenons donc un enregistrement, d'une durée de 5 minutes pour chaque ambiance. Nous allons par la suite en extraire 10 secondes pour réaliser une analyse fréquentielle intégrée sur cet extrait. Celui-ci est choisi comme étant représentatif de l'ambiance, et ne doit pas contenir de bruit soudain qui sortirait du caractère d'ambiance. Une fois cet extrait choisi, il est donc analysé à l'aide d'un script Matlab présenté en annexe 1. Le résultat est donné directement en dB(C) en fonction de la fréquence et correspond donc au niveau acoustique réel du son capté. L'analyse fréquentielle est réalisée sur 1024 points, intégrés sur les 10 secondes de l'extrait, pour permettre un traitement rapide et précis. Cette analyse ne pourra bien sûr pas être utilisée pour un procédé *scientifique* de démasquage, elle n'a qu'une valeur indicative. En effet, elle ne représente qu'un fragment de l'ambiance, à un instant donné, dans des conditions données, et n'est donc pas représentative de

cette ambiance. Une étude approfondie des 4 conditions consisterait à déterminer des niveaux et des analyses fréquentielles moyennes pour chaque condition, sur un grand nombre d'exemples (on pourrait prendre chacune des lignes du RER de Paris, pour être complet sur ce sujet). Ce n'est bien sûr pas réalisable dans le cadre de ce mémoire, et nous allons donc utiliser ces résultats comme indication pour la mise en place des traitements utilisés pour le test perceptif présenté en partie II.

Pour retrouver la valeur de l'intensité acoustique à partir du signal numérique capté, on utilise le VU-mètre du logiciel Reaper qui nous permet de déterminer à l'instant exact des 3 secondes après le top quelle est la valeur en dBFS du signal. On sait alors que cette valeur correspond à la valeur réelle acoustique mesurée sur le terrain. Une simple soustraction permet alors de déterminer l'intensité acoustique à tout moment en fonction de l'intensité du signal numérique.

Par exemple, si le signal capté était à 60 dB(C) 3 secondes après le le « top » et qu'il est à -20dBFS à ce moment dans l'enregistrement, on sait alors qu'il suffit de rajouter 80dB à la mesure numérique de l'enregistrement pour obtenir la valeur réelle en dB(C). Dans l'élaboration du script, nous avons étendu cela à l'analyse fréquentielle, pour obtenir la courbe réelle en dB(C) en fonction de la fréquence.

Nous montrons en annexe 3 les quatre graphes obtenus pour l'analyse fréquentielle des ambiances captées.

Pour chacun des graphes obtenus, la zone fréquentielle la plus présente se situe dans les fréquences graves. Elle s'étend jusqu'à 300Hz dans le cas du RER, et débute entre 20 et 30Hz pour les quatre cas traités. Les deux ambiances qui paraissent a priori le plus propices au masquage sont le RER et la voiture, car les

niveaux moyens sont les plus élevés.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant quelles sont les possibilités pour limiter ou pour annuler le masquage en traitant de manière adéquate la musique.

3.3 Comment démasquer ?

Tout d'abord, le masquage d'un contenu musical écouté dans un environnement bruyant dépend non seulement du volume du son masquant mais également du volume d'écoute de la musique. En effet, il existe toujours un certain volume d'écoute pour lequel on est soumis à aucun masquage puisque tout le contenu musical est assez fort pour être entendu à n'importe quel moment. Cependant, dans les passages forts, cela peut être désagréable, voire dangereux pour l'audition. Concernant le niveau d'écoute, l'Organisation Mondiale de la Santé préconise dans son rapport "Écouter sans risque" un niveau moyen de 85dB, 8 heures par jour au maximum. Aucune précision n'étant disponible sur la mesure de ce niveau, on entendra qu'il s'agit de dBC, le plus probable pour un tel niveau sonore. On peut donc prendre ce niveau comme référence du niveau moyen, mais il est bien sûr ajustable, et il est du choix de chacun de trouver le niveau qui lui convient, dans la mesure du raisonnable. Cependant, pour un niveau d'écoute agréable, on remarque que certains passages sont nécessairement masqués dans les mixages très dynamiques. C'est donc à ces cas particuliers que nous allons nous intéresser.

De plus, il est important de noter que la notion de masquage possède une grande part de subjectivité. En effet, même si un son n'est pas masqué à proprement parler, c'est-à-dire que l'on peut l'entendre, son écoute peut être altérée par l'ambiance sonore, et donc il est parfois nécessaire d'être bien au-dessus du seuil de masquage pour pouvoir apprécier les passages les plus faibles. Pour la suite du mémoire, les opérations de démasquage seront donc effectuées selon le bon sens, afin que que l'écoute soit, à tout moment de la musique, confortable dans le sens où elle n'est pas gênée par l'ambiance du lieu.

Pour éviter ce masquage en cas d'écoute dans un milieu bruyant, nous avons vu que les ingénieurs du son classique réalisent déjà dans la plupart des cas deux grands types de traitements :

- compression dynamique
- correction fréquentielle

Nous avons vu dans l'entretien avec Frédéric D'Oriat Nicolas que ce sont également les deux opérations effectuées lors de la réalisation d'un mastering Mobility destiné à être écouté dans des conditions bruyantes. Nous allons donc détailler les différentes manières d'effectuer ces opérations de manière simple, en jugeant leurs avantages et leurs inconvénients. Intéressons-nous tout d'abord à la compression dynamique.

Le but de cette opération est de faire en sorte que le niveau le plus faible du morceau soit parfaitement audible pour les conditions d'écoute dans lesquelles on se place, et que le niveau le plus fort reste confortable.

Une première manière de réduire la dynamique est de faire un suivi au fader du contenu musical. Cela consiste à moduler le volume général du morceau en augmentant celui des passages pianissimos et/ou en diminuant celui des fortissimos. la conséquence directe est de réduire l'écart entre les niveaux les plus hauts et les niveaux les plus bas, et donc par définition de compresser la dynamique. L'avantage majeur est que cela est fait par un ingénieur du son censé être sensible au contenu musical, et donc il peut s'adapter à l'écriture musicale, de manière que cette compression s'entende le moins possible. Le désavantage est le temps nécessaire à cette opération.

On peut également utiliser un outil automatisé, appelé compresseur. Ce compresseur peut être soit numérique soit analogique, soit sous forme de plug-in dans le logiciel de traitement du son, soit un périphérique externe. Nous n'allons pas ici traiter des différences qu'il existe entre ces outils, mais seulement décrire leur réglages (qui sont les mêmes pour tous) que nous serons amenés à utiliser dans le cadre de ce mémoire :

- le **seuil**, permet de déterminer à partir de quelle valeur du signal en dB le compresseur agit.
- le **ratio** permet de déterminer le taux de réduction appliqué au-delà du seuil.
- le **temps d'attaque** permet de déterminer le temps entre la détection d'un signal au-dessus du seuil et la pleine action du compresseur.
- le **temps de retour** permet de déterminer le temps de retour du compresseur à son état neutre.

Les avantages du compresseur sont qu'il fonctionne automatiquement une fois réglé, et qu'il permet également de plus facilement contrôler "scientifiquement" la dynamique. Autrement dit, connaissant la dynamique d'un morceau, on peut choisir de la réduire jusqu'à une valeur cible avec un compresseur, ce qui est plus difficile à faire à la main. Son principal désavantage est le fait qu'il ne prenne pas en compte l'écriture de l'oeuvre et donc qu'il peut parfois ne pas être respectueux de l'écriture musicale.

Le limiteur est un cas extrême de compresseur de seuil 0 et de ratio infini. Il permet principalement d'éviter la saturation numérique et peut être utilisé principalement dans le cas de sons percussifs très brefs.

Il est également possible d'utiliser des outils de correction fréquentielle. Le but

de cette opération est de remonter certaines fréquences qui sont masquées par l'environnement sonore. Pour les différentes ambiances étudiées, on a vu que le masquage est sensible principalement dans les basses fréquences, le travail consistera alors à remonter une zone fréquentielle plus ou moins large pour la rendre audible à tout moment.

L'équaliseur permet d'augmenter ou de diminuer certaines zones fréquentielles. Dans notre cas, son utilisation est difficile, car elle implique une déformation fréquentielle sur l'ensemble du morceau, et donc aussi dans les passages forts. Dans ces passages, une remontée des basses fréquences, surtout entre 100 et 200Hz entraîne une sensation brouillonne du fait de l'augmentation de la résonance de la salle et des instruments. Elle ne sera donc pas utilisée ici.

Une adaptation envisageable serait de faire un suivi d'une zone de fréquence en particulier, et de la remonter seulement dans les passages de faible niveau.

Le compresseur multibande fonctionne de la même manière qu'un compresseur, appliqué seulement sur une zone fréquentielle donnée. Les paramètres de réglages sont donc les mêmes que ceux du compresseur, auxquels on peut ajouter les paramètres classiques de deux filtres, un passe haut et un passe bas, qui permettent d'isoler les zones fréquentielles sur lesquelles on travaille. Les paramètres de ces filtres sont :

- la fréquence de coupure
- la pente du filtre

Cet outil apparaît particulièrement adapté ici, et nous l'utiliserons donc de manière que les fréquences basses masquées soient augmentées dans les passages faibles, et rétablies à leur niveau naturel dans les passages forts. Cela préviendra donc d'une déformation du timbre dans les passages forts et de cette sensation

brouillonne.

3.4 Quelles sont les risques des traitements globaux sur la musique classique

Dans son articles intitulé "La Perspective Sonore" ¹⁵, Jean Chatauret nous décrit les effets néfastes de la compression sur la perspective sonore d'un mixage. Il avance que la compression tend à augmenter artificiellement la réverbération, et donc à détruire la perspective sonore mise en place au mixage.

Le terme de perspective sonore s'applique ici à l'effet de profondeur et aux placements spatiaux recherchés par le mixeur. Grâce à l'utilisation de plus ou moins de réverbération (artificielle ou naturelle), on peut lors du mixage placer les instruments comme dans une scène sonore. Or, on a vu que la compression avait pour effet de remonter tous les bas niveaux dans le mixage, et la réverbération est la plupart du temps mixée à des niveaux faibles, elle est donc sujette à être augmentée par la compression.

De plus, comme nous l'avons vu précédemment, le respect de l'intention de l'interprète et de l'écriture musicale est primordial en musique classique, et il est donc indispensable de s'assurer que ces conditions soient respectées.

Une étude intitulée "Quality and loudness jugements for music subjected to compression limiting" ¹⁶, a montré que l'usage violent d'un limiteur entraînait une détérioration significative de la qualité d'expérience pour l'auditeur moyen.

Un étude danoise s'est quant à elle intéressée à "L'effet perceptif de la com-

15. Jean Chatauret, "La perspective sonore", *Communications*, 2009, Volume 85, Numéro 1, pp. 139-154

16. Naomi B. H. Croghan, Kathryn H. Arehart, James M. Kates, "Quality and loudness jugements for music subjected to compression limiting", *JASA*, Numéro 132, pp 1177-1188, 2012

pression dynamique sur les enregistrements de musiques actuelles" ¹⁷. Elle propose l'écoute comparative de deux versions de plusieurs extraits sonores : une version originale et un re-master, d'avantage compressé. On trouve alors que 54,3% préfèrent la version originale en moyenne, mais cette donnée, n'est pas considérée comme significative au vu du nombre de sujets, et on peut donc conclure que pour l'échantillon observé, on ne note pas de réelle préférence, sauf pour les versions où le taux de compression dépasse 8dB, dans quel cas 70% préfèrent le master moins compressé. Pour ce qui est de la sensation de profondeur, on ne remarque aucune différence entre les extraits. On peut donc conclure que dans le cas de la musique actuelle, les auditeurs ne sont pas sensibles à une grande différence de perspective sonore avec la compression. On peut alors avancer avec prudence que c'est peut-être également le cas pour de la musique classique, ce que nous analyserons en deuxième partie.

17. Jens Hjortkjær, Mads Walther-Hansen, "Perceptual Effects of Dynamic Range Compression in Popular Music Recordings", *JAES*, 2014, Volume 62 Issue 1/2 pp. 37-41

Deuxième partie

Test perceptif et résultats

En première partie, nous avons analysé le principe de masquage de la musique par une ambiance d'écoute bruyante, nous avons également donné des solutions techniques pour éviter ce masquage. Nous avons examiné les enjeux de ces traitements sur le contenu classique, et tenté de déterminer comment adapter le mixage à des environnements bruyants tout en respectant la sensibilité toute particulière de cette musique. Il convient donc maintenant de mettre en pratique cette tentative d'adaptation du mixage, et également de la mettre à l'épreuve d'un public expert afin de prouver ou non sa viabilité. C'est donc ce que nous allons faire à travers la mise en place du test perceptif qui sera le fil conducteur de cette partie.

4 Mise en place du test perceptif

4.1 Approche générale

L'intérêt de la réalisation d'un tel test perceptif est de déterminer une préférence du public mélomane pour un certain type de mixage (ou mastering, mais nous avons vu auparavant que ce terme est rarement utilisé dans le cas de la musique classique). Nous allons donc mettre en place un test de préférence, qui consiste à comparer plusieurs extraits, afin de déterminer les choix des sujets.

Notre variable dépendante pour ce test perceptif est « l'adaptation aux conditions d'écoute ». La question posée aux sujets pour chacune des sessions, qui leur propose 4 versions du même extrait à écouter dans une ambiance donnée est : « *Dans quelle mesure le mixage vous paraît-il adapté aux conditions d'écoute ?* ». Cette question amène donc le sujet à écouter en fonction de l'ambiance sonore dans laquelle il est alors plongé.

Nos variables indépendantes sont :

- le mixage : brut, compressé, compressé en multibande, et suivi au fader.
- l'extrait musical : "Gaspard de la nuit" de Ravel, l'ouverture de la "9^{ème} symphonie" de Beethoven, la "Symphonie numéro 1" de Sibelius et "Le Nozze di Figaro" de Mozart.
- l'ambiance sonore dans laquelle est plongé le sujet : rue, RER, voiture et appartement.

Nous allons utiliser une échelle de type continue, qui varie de « pas adaptée du tout » pour la note la plus basse à « très adaptée » pour la plus haute. Cette échelle nous permet d'accéder au ressenti du spectateur sans le distraire avec un choix de nombre. Elle est par la suite discrétisée en une note de 0 à 100.

Il existe donc 16 combinaisons au total pour les 4 extraits musicaux choisis et les 4 ambiances. Le test sera donc divisé en 16 sessions, une pause sera imposée au sujet après la huitième session. Nous avons choisi pour la durée des extraits une vingtaine de secondes, et on estime donc la durée du test entre 30 et 45 minutes selon les sujets.

Le critère de recrutement des sujets est qu'ils doivent écouter de la musique classique en étant exigeants quant à sa qualité sonore et à sa compréhension musicale. Le panel de sujet sera donc dans l'idéal constitué de 15 experts de la musique classique (musiciens ou mélomanes), qui peuvent aussi avoir des compétences complémentaires dans les métiers du son.

4.2 Mise en place du dispositif

Comme notre étude porte sur une écoute bien particulière, en condition, dans un environnement bruyant, nous avons donc logiquement choisi de tenter de réaliser un test qui soit le plus immersif possible, dans le but de recréer les conditions d'écoute réalistes.

Nous nous sommes en grande partie inspirés sur le dispositif mis en place lors de l'étude menée par John Kean, Eli Johnson, et Dr. Ellyn Sheffield intitulée « Study of Audio Loudness Range for Consumers in Various Listening Modes and Ambient Noises Level », donnée en conférence pour l'AES. Il s'agit alors de plonger un sujet dans une ambiance bruyante et de lui permettre de régler le volume d'un extrait à sa guise pendant sa diffusion. Cela leur a donc permis d'enregistrer les variations du volume demandées par le sujet et de l'analyse en regard de l'évolution dynamique du contenu.

Le sujet est placé au centre d'une écoute en 4.0 MeyerSound, et le stimulus est diffusé par d'autres enceintes frontales ProAc, en stéréo. On rappelle à ce stade qu'une écoute en 4.0 correspond à 4 haut-parleurs situés à égale distance autour de l'auditeur et formant un carré entre elles (elles sont équidistantes de leurs voisines). Ce type d'écoute permet une immersion de l'auditeur au coeur d'une scène sonore. Nous développerons davantage dans le paragraphe suivant le processus de captation et de restitution des ces ambiances.

Le test se déroule dans le Studio Radio de l'ENS Louis Lumière, qui dispose des installations nécessaires à sa mise en place et un niveau de bruit très faible qui permet d'isoler les ambiances étudiées de tout élément extérieur. Ayant donc placé notre auditeur dans une ambiance sonore immersive, diffusée à son niveau réel, nous allons donc lui proposer l'écoute de plusieurs extraits musicaux. Selon le lieu d'écoute (RER, appartement...) le système de diffusion change. Nous allons donc utiliser deux moyens de diffusion différents : un casque et une paire d'enceintes.

Le schéma ci-dessous décrit le dispositif du test.

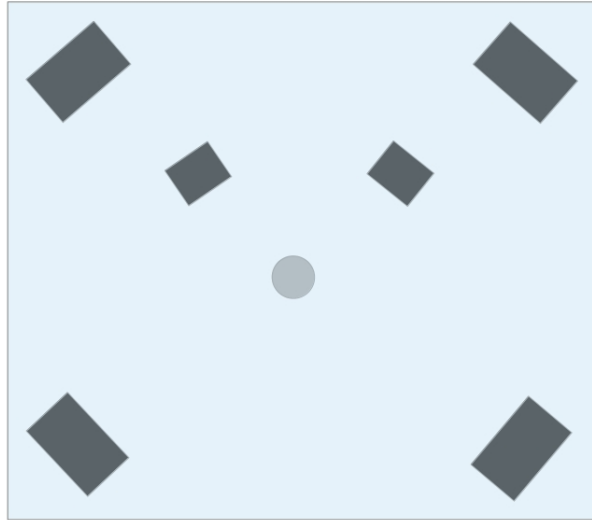


FIGURE 13 – Schéma vu de haut du dispositif de diffusion mis en place

Le sujet est situé au centre du système de diffusion 4.0, et dans une position d'écoute idéale des enceintes qui diffusent la musique. Pour l'écoute au casque le protocole est le même, nous indiquons au sujet de porter le casque et la diffusion de la musique change automatique des enceintes au casque. Pour les écoutes au casque, la remise en situation est très fidèle puisque le moyen d'écoute est exactement le même que dans une situation réelle. Pour l'écoute en appartement, on est donc dans une situation d'écoute attentive, chez soi, placé idéalement par rapport aux enceintes. Enfin pour la voiture, le système mis en place ne reproduit pas exactement les conditions réelles, puisque des enceintes de voiture auront bien souvent une qualité bien moindre à celles utilisées ici. De plus, leur placement n'est jamais idéal pour un auditeur passager ou conducteur. Cependant, nous ne pouvons pas envisager de réaliser notre test dans des lieux multiples pour des raisons pratiques évidentes, et donc on conviendra que la diffusion par les enceintes utilisées pour le cas de l'appartement est suffisamment proche de la réalité.

Les 4 extraits peuvent être écoutés autant de fois que le sujet le désire, et dans l'ordre qu'il choisit. Pour chaque session, l'ordre des mixages est interchangé de manière aléatoire pour éviter tout phénomène d'habitude ou une tentative d'analyse du processus par le sujet. La figure ci-dessous nous montre l'interface graphique développée sur MAX pour la réalisation de ce test.

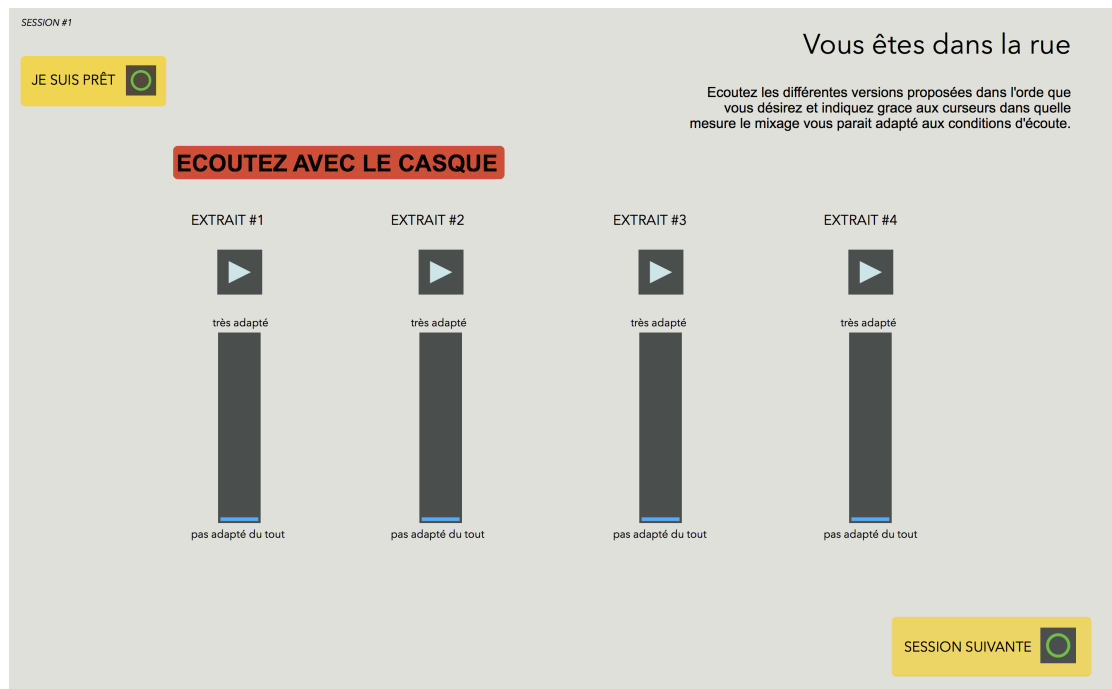


FIGURE 14 – Interface utilisateur développée sous CYCLING 74 pour le test perceptif

Les ambiances sonores et la musique sont lues par le logiciel MAX, puis diffusées par deux cartes son Focusrite Pro 14 et Pro 24. Les ambiances passent par la console DM2000 du Studio Radio avant d'être diffusées dans le système d'écoute surround. Voici un schéma synoptique de l'installation réalisée.

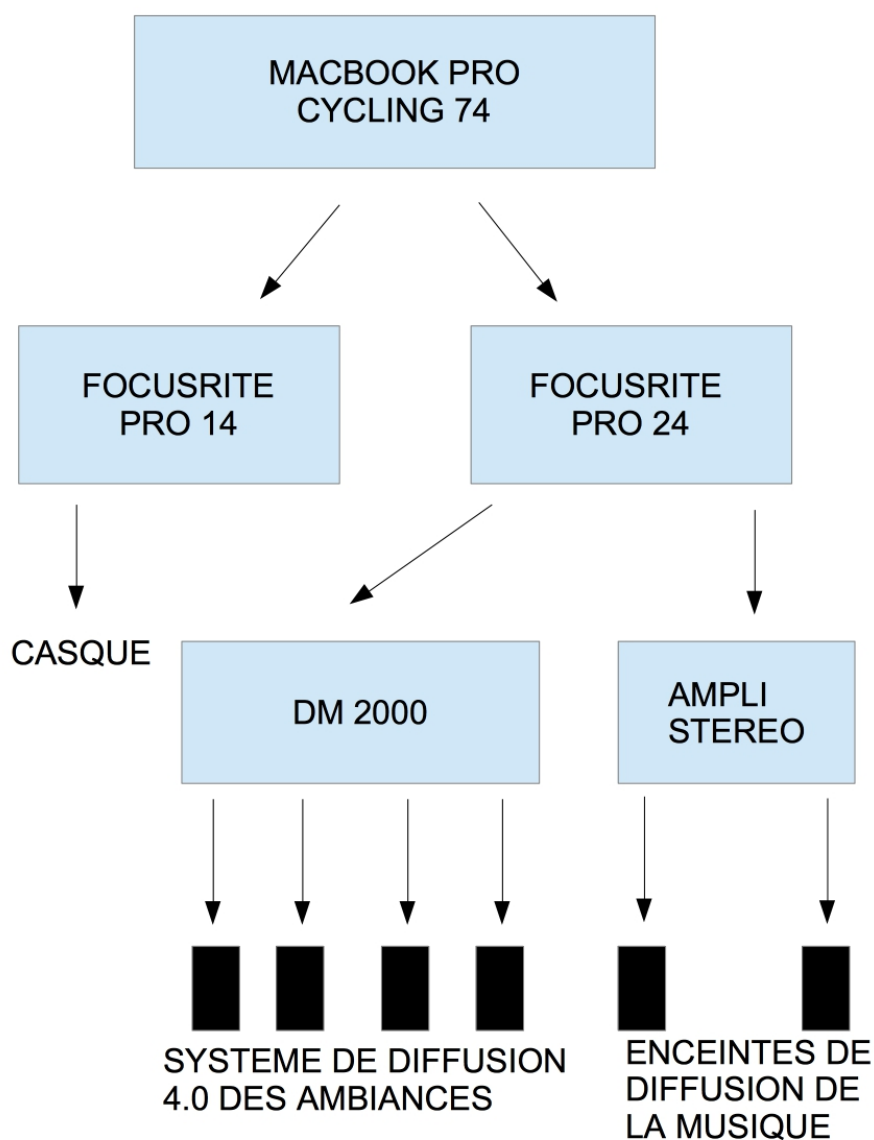


FIGURE 15 – Schéma synoptique du dispositif de diffusion sonore utilisé

Le choix des sujets est orienté vers des personnes ayant une culture de la musique classique, et soyant souvent sujettes à en écouter. L'objectif est d'avoir des sujets discriminants, qui soient capables de détecter les différences de mixages.

4.3 La diffusion des ambiances

La diffusion des ambiances est donc faite en quadriphonie, et leur captation avec un dispositif appelé croix IRT. La croix IRT est constituée de 4 microphones cardioïdes espacés de 25 centimètres, avec un angle de 90 degrés entre chacun d'entre eux selon la recommandation de J. Wuttke et Mike Williams, comme elle est citée dans « Le son multicanal : De la prise de son aux systèmes d'écoute »¹⁸, par Bergame Périaux, Jean-Luc Ohl et Patrick Thévenot.

Dans cet ouvrage, ils décrivent le système comme permettant une bonne localisation, une très bonne impression spatiale, et une bonne restitution des timbres. Ces critères correspondent donc bien aux nôtres, une très bonne impression spatiale nous permettant une immersion du sujet et la bonne restitution des timbres nous assurant le respect du phénomène de masquage.

Pour la procédure de captation, nous avons vu dans la partie précédente l'étalement du système au début de chaque prise de son. Pour les placements des micros, nous essayons au maximum de recréer le placement réel d'un usager des lieux étudiés. Par exemple, dans le RER, on placera notre croix IRT au niveau de la tête d'une personne assise. On prendra également soin de régler les préamplis exactement au même niveau afin de respecter l'image quadriphonique de l'ambiance.

Nous avons procédé pour chaque ambiance donnée à la captation de plusieurs versions, sur une durée de 5 minutes à chaque fois. Le choix des ambiances définitives est fait de manière à obtenir des extraits les plus représentatifs, et en évitant tous les bruits parasites qui pourraient détourner l'attention des sujets à

18. Bergame Périaux, Jean-Luc Ohl, Patrick Thévenot, *Le son multicanal : De la prise de son aux systèmes d'écoute*, Paris, Dunod, collection Audio-Photo-Vidéo, 2015, 456 pp

un moment donné de l'écoute. En effet, notre étude traite seulement du masquage et non pas de la concentration lors de l'écoute. De plus, le dispositif expérimental permet à chaque sujet d'écouter les extraits musicaux à différents moments des ambiances, et donc celles-ci ne doivent pas changer globalement de forme dans l'ensemble.

Nous donnons ci-dessous les analyses fréquentielles des ambiances selon la technique décrite en I.3, et à l'aide script Matlab donné en annexe 1.

Pour la diffusion, notre but est donc d'obtenir exactement le même niveau sonore que lors de la captation. On ajuste donc à l'aide du logiciel Pro Tools le niveau de chaque ambiance choisie pour que le niveau 3 secondes après le top soit le même que celui qu'on a noté au moment de la captation. Ainsi l'ensemble de l'ambiance est diffusé à son niveau réel, et donc les effets de masquage sont les mêmes que si l'auditeur était en situation réelle d'écoute dans la rue, le RER, la voiture ou l'appartement.

4.4 Choix des extraits musicaux

Les extraits musicaux choisis doivent être susceptibles d'être masqués, et donc doivent avoir une dynamique importante. Nous devons également nous restreindre à une durée d'environ 20 secondes par extrait, afin de ne pas dépasser 45 minutes pour la durée totale du test. Le but ici est de traiter les différents cas de changements dynamiques. Nous allons donc lister les principaux changements susceptibles d'être entendus dans un morceau classique :

- un crescendo lent
- un décroscendo lent

- un crescendo rapide
- un décroscendo rapide
- une alternance de niveaux forts et de niveaux faibles

Il est également intéressant de travailler sur plusieurs formes classiques, afin de déterminer si le public réagit différemment aux traitements effectués, dans le but de démasquer, en fonction de la forme. Certains styles diffèrent en effet beaucoup de par la formation musicale nécessaire à son interprétation. On étudiera de préférence les différences entre un contenu orchestral, de la musique de chambre (très petit ensemble voire solo), du contenu chanté (opéra). On pourrait également comparer avec un concerto, mais étant donné qu'il se rapproche beaucoup du contenu orchestral, nous avons pris le parti de ne pas le traiter ici.

Les extraits choisis sont :

- « Gaspard de la nuit » de Ravel, fin du premier mouvement « Ondine ». Cette sonate pour piano présente un contenu dynamique exceptionnel, qui permet au piano d'exploiter tout son panel de nuances. L'oeuvre est un triptyque pour piano basé sur trois poèmes extraits du recueil du même nom, d'Aloysius Bertrand. Le premier mouvement, Ondine, est une évocation aquatique, d'une difficulté d'interprétation hors norme, un morceau agité comme l'océan dans lequel vit la sirène donc il conte l'histoire. L'extrait présente un passage pianissimo suivi d'une montée brusque vers le fortissimo. L'interprétation choisie, est réalisée par Anna Vinnitskaya, et est parue chez Naïve en 2013. Elle est préférée pour sa dynamique très importante, et une prise de son moderne et donc à grande excursion dynamique.

- « Le Nozze di Figaro » de Mozart, la 2^{ème} scène, qui propose un passage de « question/réponse » entre l'orchestre et le chanteur interprétant le rôle de Figaro. Cet Opéra *buffa* est pour la première fois représenté en 1786, sur un livret de Lorenzo da Ponte. Cet extrait est interprété par René Jacobs dans le rôle Figaro, il paraît en 2004 pour le label Harmonia Mundi, reçoit le prestigieux « Gramophone Record of the Year ». Il possède une dynamique moyenne, ce qui est courant pour les enregistrements d'Opéra, mais des changements de niveau brusques et nous permettra donc de mettre à l'épreuve nos différents traitements au regard de ce type d'évolution dynamique.

- L'ouverture de la 9^{ème} symphonie de Beethoven, interprétée par le Royal Philharmonic Orchestra, dirigé par Renée Leibowitz en 2014, et édité par Classic Style. Ce passage célèbre de l'œuvre phare de Beethoven présente un crescendo orchestral fulgurant, passant d'un pianissimo à un *tutti* orchestral en une vingtaine de secondes grâce à des entrées progressives, pour arriver sur l'exposition du thème. Cette pièce est considérée comme l'œuvre majeure de Beethoven, elle conclut son travail sur la symphonie à travers des thèmes qui resteront ses plus célèbres.

- Un extrait du 1^{er} mouvement de la 1^{ère} symphonie en mi mineur de Sibelius. Il expose un lent decrescendo orchestral vers une nappe de violon tenue. Le mixage est également très dynamique, cet album est paru chez Decca en 2015, et donc la prise de son est très récente. L'œuvre est dirigée par Lorin Maazel, et cet enregistrement a été distingué du diapason d'or. Il nous permet donc d'étudier ici l'écoute d'un decrescendo lent.

On note que toutes ces œuvres ont été choisies avec soin pour leurs dynamiques de mixage importantes et une bonne qualité d'enregistrement. Le format

est systématiquement du WAVE ; 44,1KHz ; 16 bits. Le découpage des extraits est fait de manière à ne pas couper une phrase musicale, leur durée va de 17 à 25 secondes.

4.5 Application des traitements

Pour chaque extrait, nous allons donc proposer aux sujets 4 mixages différents. ces mixages seront réalisés selon les techniques évoquées plus haut dans le but de les comparer. Pour un des 4 mixages, nous n'allons effectuer aucun traitement, et donc l'utiliser comme référence. Pour les 3 autres, des traitements sont effectués sur les fichiers stéréo dans le but de démasquer les passages les plus faibles dans toutes les ambiances choisies. Nous allons utiliser les traitements suivants :

- un suivi de volume effectué par Jean-Louis Nathan, ingénieur du son professionnel spécialisé dans le broadcast de musique classique.
- une compression automatique utilisant le plug-in « Pro C » de Fabfilter, sur le logiciel Reaper.
- une compression multibande utilisant le plug-in « Pro MB » sur le logiciel Reaper complétée par une compression classique légère.

Les extraits sont tout d'abord normalisés, c'est-à-dire que leur niveau le plus fort est réglé à 0dBFS. Puis les traitements sont adaptés à chacun des extraits dans le but de démasquer l'ensemble du passage. Ce travail est donc fait à l'oreille, de manière empirique. Nous allons détailler le travail effectué pour chacun des traitements.

Pour le suivi de volume, ce travail a été effectué par l'ingénieur du son Jean Louis Nathan, spécialisé dans le broadcast (arte concert, télévision...). Ce "re-

mastering" a été fait dans sa régie mobile utilisée pour le mixage en live de programmes classiques. Les équipements utilisés sont :

- moteur de lecture et d'enregistrement
- console Soundcraft pour le suivi
- écoute GENELEC 1032 BPM

Chacun des extraits est tout d'abord écouté, puis un suivi au fader du volume est effectué en direct comme il serait fait pour une captation classique, de manière à être écouté dans un environnement bruyant. Nous avons pris pour référence une écoute en voiture, qui, comme nous l'avons montrée précédemment, est la plus masquante. Ce suivi est limité par le fait que nous ne pouvions pas écouter l'ambiance en direct, mais il correspond donc au travail qu'aurait effectué un ingénieur du son professionnel dans ce cas-là, ce qui lui confère un caractère écologique très important. Nous obtenons donc une première version moins dynamique de chacun des extraits.

Pour la compression automatique, nous avons donc choisi le plug-in de compression « Pro C » de Fabfilter, car j'ai l'habitude de l'utiliser au quotidien. Nous rappelons que cette étude ne porte pas sur les différents compresseurs qu'il est possible d'utiliser, mais sur l'impact d'une compression quelconque sur l'écoute en milieu bruyant. Le mixage est effectué sur le logiciel REAPER, sur un Macbook Pro. La carte son Focusrite pro 24 est utilisée pour l'écoute, et les enceintes sont celles utilisées pour la diffusion lors du test (ProAc). Le mixage est ainsi testé en diffusant les ambiances de manière à vérifier qu'il est bien démasqué en totalité dans toutes les ambiances.

Le réglage des différents paramètres est toujours fait dans le but de respecter l'interprétation de l'artiste et l'écriture musicale. On sait qu'un ratio haut tend à déformer l'image sonore, et également à tasser tous les hauts niveaux de manière qu'on ne distinguera pas un forte d'un fortissimo. Au contraire, un ratio plus

faible, avec un seuil bas, permet de réduire l'écart entre les différentes nuances de manière égale, et donc de respecter davantage l'écriture musicale. De plus, un ratio bas permet de conserver une bonne perspective sonore. À l'écoute, on détermine qu'un bon compromis se situe avec un ratio à 2 environ et un seuil à adapter de manière à ce que le compresseur reste actif en permanence. Pour le temps d'attaque, il est choisi le plus court possible, de manière à limiter l'effet de « pompage » bien connu qui est la conséquence directe d'un temps d'attaque trop long. Le temps d'attaque est lui réglé sur une valeur assez longue (environ 500ms) ici, qui permet de garder un effet réaliste.



FIGURE 16 – Plug-in de compression utilisé pour la réalisation des stimuli

Nous avons également réalisé un mixage à l'aide d'un compresseur multibande. En effet, on a remarqué dans l'analyse fréquentielle des ambiances utilisées que les plus grandes possibilités de masquage étaient situées dans la zone grave du spectre, entre 20 et 300Hz environ. On peut se référer à l'annexe 3 pour visualiser les analyses fréquentielles de ces ambiances. Nous avons donc pensé judicieux de réaliser un mixage qui permettrait d'augmenter cette zone fréquentielle seulement pendant les passages faibles, afin qu'elle reste audible pour l'auditeur qui écoute dans des milieux bruyants. Ce mixage est encore une fois fait à l'oreille, dans les

critères énoncés ci-dessus de respect de l'oeuvre. On augmente donc selon les extraits une zone fréquentielle plus ou moins large. De même que pour l'utilisation du compresseur, on privilégiera un ratio faible, pour un seuil assez bas, mais dans une moins grande mesure, car on remarque que la non-action du compresseur est très gênante dans les passages forts, et on s'assure donc que le compresseur permet de rétablir un traitement fréquentiel neutre (aucune modification) dans ces passages forts en appliquant un ratio un peu plus élevé que dans le cas du compresseur seul.

On remarque également par expérience que l'emploi d'un compresseur multibande seul tend à entraîner une déformation spectrale trop violente, et qu'il est plus naturel d'utiliser un compresseur simple en même temps, pour légèrement réduire la dynamique globale. Son utilisation est alors beaucoup plus légère que dans le cas précédent où il était utilisé seul.

L'outil utilisé est donc le plug-in "Pro MB" de la suite Fabfilter, choisi pour son interface simple et permettant de visualiser en direct la compression, et donc de s'assurer comme nous l'avons dit précédemment que dans les passages forts, l'action du compresseur soit nulle. Ci-dessous, nous montrons un réglage type du compresseur multibande pour les traitements effectués.

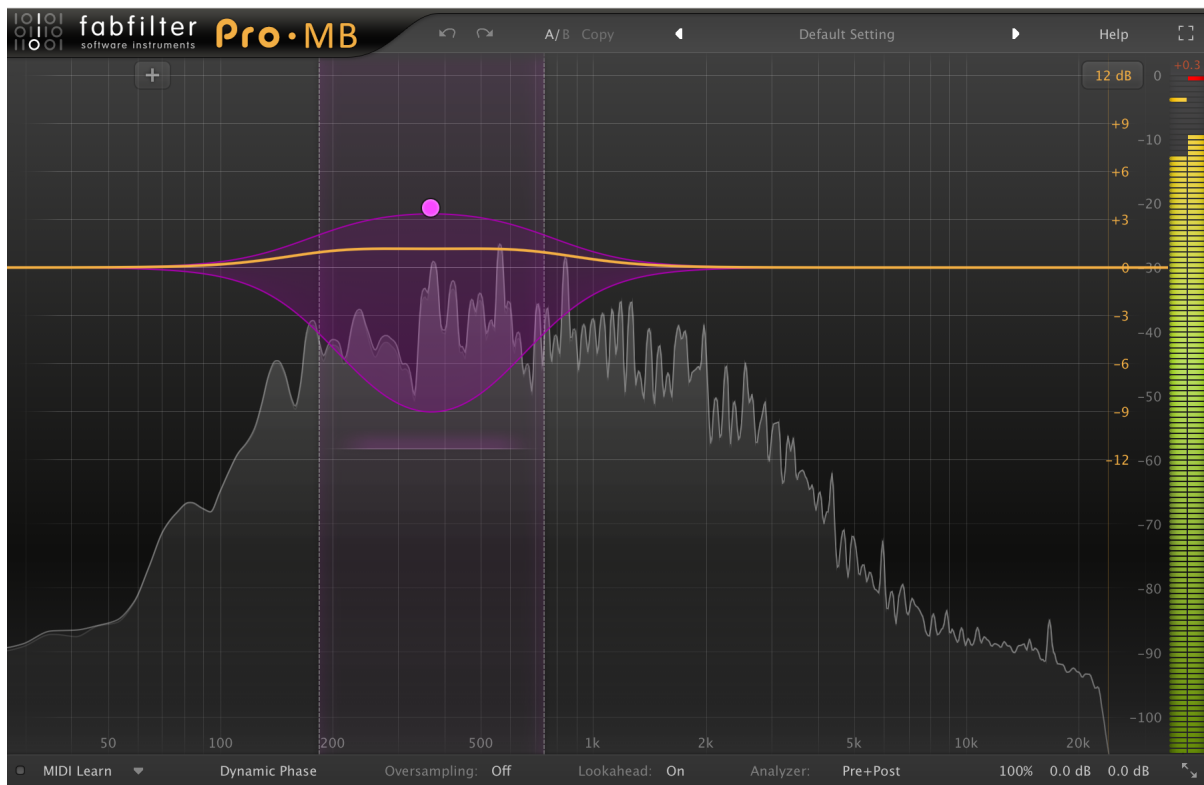


FIGURE 17 – Plug-in de compression multi-bande utilisé pour la réalisation des stimuli

Ces mixages sont donc effectués de manière empirique, de manière à démasquer les passages faibles des extraits choisis, et à rendre l'écoute agréable. Cependant, pour se donner une idée des écarts de dynamique induits par ces traitements, nous avons réalisé des mesures, sur l'extrait de la 9^{ème} symphonie de Beethoven, pour connaître les excursions dynamiques des différents mixages.

Nos mesures sont réalisées avec le plug-in MLoudnessAnalyser, développé gratuitement par la société MELDA, et conforme aux recommandations EBU. La mesure du *Loudness Range* est exprimée en LU (Loudness Unity), et "estime la différence un haut et un bas pourcentage de la distribution [des valeurs de Loudness]"¹⁹. Cette valeur est donc représentative des écarts dynamiques moyens

19. EBU, tech 3342 : *Loudness Range, a measure to supplement EBU R128 Loudness normalization*, Version 3.0, Genève, 2016

de l'extrait sonore, elle reste seulement un indicateur, et les valeurs choisies dépendent des diffuseurs, généralement entre 5 et 15 LU.

Nous obtenons donc les valeurs suivantes en fonction des mixages pour l'extrait de Beethoven :

- mixage brut : 23,2 LU
- mixage au compresseur : 18,8 LU
- mixage au compresseur multi-bande : 17,9 LU
- mixage au fader : 13,1 LU

On voit donc que l'excursion dynamique est plus grande pour l'extrait brut, et plus restreinte pour le mixage au fader.

4.6 Réalisation d'un interface utilisateur

Afin de réaliser ce test perceptif sous les différentes conditions que nous avons établies, nous nous devons donc de réaliser une interface qui permette à la fois une mise en place facile du test mais également un traitement des données facilité. Pour ce faire, nous avons donc utilisé le logiciel MAX : c'est un logiciel de programmation graphique, qui peut facilement permettre de réaliser des interfaces graphiques. Il propose également de traiter du son en direct et de faire de la diffusion multicanale, il est donc très adapté à nos critères. L'annexe 2 présente différentes captations d'écran qui correspondent à la réalisation du patch MAX.

Pour réaliser l'interface, nous avons tout d'abord façonné la partie graphique, le design, voulu simple et efficace, de cet interface.

Nous avons ensuite traité de la diffusion sonore pour une seule des 16 sessions qui seront présentées lors du test. Nous avons donc dû réaliser deux players sur mesure, l'un permettant la lecture en continu des ambiances et l'autre permettant la lecture alternativement au casque ou sur des enceintes de la musique. Nous

avons voulu ce test interactif de manière que l'auditeur puisse réécouter à sa guise les extraits proposés, et également lui permettre un silence entre deux sessions, qu'il puisse ainsi lancer quand il le souhaite l'ambiance d'une session.

Pour le cas des ambiances, il est nécessaire qu'elles puissent être diffusées en continu, étant donné que le temps donné aux utilisateurs pour écouter les extraits est libre. Nos ambiances sélectionnées et montées de manière à ne pas comporter d'événements brusques durent entre 3 et 5 minutes. Nous avons donc conçu le player de manière à lire les ambiances en boucle, avec une technique de fade permettant une transition inaudible entre le début et la fin du fichier. Cette technique est illustrée en annexe. Ainsi, dès que l'utilisateur décide de lancer l'ambiance, celle-ci peut se lire indéfiniment.

Le player audio doit pouvoir lire et stopper à la demande chacun des différents mixages proposés pour chaque session. Ce player doit également pouvoir choisir le mode de diffusion entre le casque et les enceintes, selon les conditions d'écoute dans lesquelles l'auditeur est placé. L'interface est limitée à un bouton play/stop pour chaque version du mixage proposée.

Enfin, nous avons développé un patch de réception des données concernant les notes des sujets, de manière à regrouper toutes des valeurs dans un tableau par utilisateur. Nous pourrions par la suite assembler tous les tableaux utilisateur pour analyser l'ensemble des données.

Puis, la dernière opération a consisté à attribuer à chaque patch les extraits à lire ; cela a été fait d'une manière totalement aléatoire, que ce soit pour la répartition des couples ambiance/extrait musical, ou pour la répartition des différents mixages dans une même session.

5 Résultats et analyse

5.1 Problèmes rencontrés

Lors du test, un problème d'enregistrement des données ne nous a pas permis d'accéder à tous les résultats concernant l'extrait de Mozart. Nous avons donc décidé de ne pas prendre en compte, dans un premier temps, cet extrait musical. L'étude qui suit est donc limitée aux trois autres extraits musicaux.

5.2 Résultats généraux

Tout d'abord, on remarque que les notes sont globalement assez basses pour l'ensemble des mixages, puisque la moyenne générale est de 44,25. Cette note descend même à 33,3 dans le cas du mixage BRUT. On peut en déduire d'une part que les sujets ont trouvé les mixages globalement peu adaptés aux conditions d'écoute, et donc que les stimuli n'étaient pas bien adaptés aux conditions d'écoute dans lesquelles étaient placés les sujets. D'autre part, on note que ces notes sont également très basses dans le cas de l'écoute dans une ambiance d'appartement, qui est censée être la plus proche d'une écoute domestique. On peut donc conclure que c'est également le contexte du test qui a amené à juger assez durement ces extraits, il est donc plus judicieux de prendre en compte seulement les différences relatives entre ces notes, et non de leur valeur absolue.

On vérifie que les résultats du test perceptif satisfont les critères statistiques de l'ANOVA (analyse de la variance).

Les résultats obtenus sont donc rassemblés dans un tableau, afin de pouvoir les traiter avec le logiciel SPSS. Nous allons donc définir les critères d'analyse de ce logiciel avant toute chose.

Les trois variables de notre test correspondent aux variables indépendantes, donc l'ambiance sonore, que nous qualifierons désormais par le lieu qu'il représente, l'extrait musical, et le mixage de cet extrait. Le logiciel SPSS va nous permettre deux choses dans cette analyse : tout d'abord d'estimer les moyennes des notes selon des critères dépendants des différentes variables, puis de déterminer si les différences relevées entre les mixages sont significatives ou non.

Le calcul par le logiciel du *coefficient significativité de p* nous permet de déterminer si les différences sont significatives ou pas, autrement dit **si elles peuvent être dues à la chance ou non**. On assumera que si ce coefficient est inférieur ou égal à 0,05, alors la différence est significative. La démonstration de ce résultat ne fera pas l'objet de ce mémoire.

Tout d'abord, nous avons souhaité vérifier la cohérence des résultats entre les sujets étant considérés comme experts du son et ceux qui n'avaient pas ou peu de connaissances dans ce domaine. Les experts du son, au nombre de 5 sur 12 sujets au total, sont tous des étudiants ou professeurs de l'ENS Louis Lumière. Nous avons donc testé s'il existait une différence significative entre l'appréciation des mixages par les sujets experts du son et les autres. Le coefficient de significativité obtenu est égal à 0,44, et donc largement supérieur à 0,05. On peut donc conclure que les différences entre ces deux groupes ne sont pas significatives et donc que leurs résultats peuvent être traités ensemble, sans les séparer. Cela nous permet donc de justifier une étude globale, sur l'ensemble des sujets, et de donner des résultats qui seront communs aux deux groupes « experts du son » ou « non-experts du son ».

5.3 Résultats généraux sur l'appréciation de la dynamique

Nous avons donc obtenu des résultats assez satisfaisants sur le plan de l'analyse, puisque de nombreuses différences significatives vont nous permettre de tirer

des conclusions précises concernant un bon nombre de points. Nous rappelons que ce test est réalisé afin de connaître les préférences d'un public mélomane, en ce qui concerne un mastering de la musique classique en fonction des conditions dans lesquelles ils sont amenés à l'écouter. Après avoir analysé les résultats obtenus, nous allons donc tenter de déterminer quelles mesures peuvent être prises pour développer un outil qui permette une adaptation du mixage en direct et selon des critères correspondants aux conditions d'écoute.

Le traitement global de la dynamique dans les milieux brauyants

Nous allons analyser les notations générales des différents types de mixages : le mixage brut, le mixage par compresseur, le mixage par un compresseur multibande, et le suivi de volume au fader. **Nous les nommerons par la suite respectivement BRUT , COMPRESSEUR, MULTIBANDE et FADER** pour simplifier. Le graphe présenté ci-dessous présente les moyennes des notations des différents mixages.

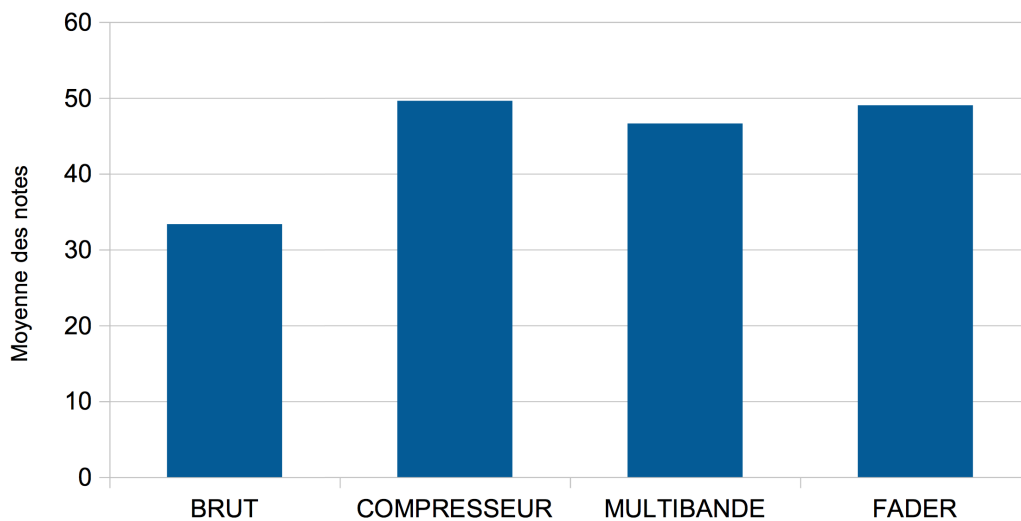


FIGURE 18 – Notes moyennes obtenus pour chacun des types de mixages réalisés

On obtient donc les moyennes suivantes pour les notes des différents mixages,

tout extrait confondu :

- BRUT : 33,3/100
- COMPRESSEUR : 49,6/100
- MULTIBANDE : 46,6/100
- FADER : 49/100

Les coefficients de significativité nous donnent que la différence de note entre le mixage BRUT et tous les autres est significative (les coefficients de significativité de p sont de 0,003, 0,003 et 0,05) tandis que les différences entre les mixages COMPRESSEUR, MULTIBANDE et FADER sont non significatives. De plus on remarque que les extraits à la dynamique réduite sont donc en moyenne mieux notés que l'extrait brut, avec des écarts importants, allant de 16 à 13 points sur 100.

Tout d'abord, on note l'appréciation globalement basse des mixages BRUTS. Pour les trois conditions d'écoute RUE, RER et VOITURE, cela s'explique largement par le choix de contenus à forte dynamique qui sont donc particulièrement mal adaptés à ces environnements. Cependant, pour la condition APPARTEMENT, nous reconstituons l'environnement sonore d'un appartement relativement calme, et donc des conditions d'écoute qui sont très courantes pour une majorité auditeurs de musique classique. On rappelle que ce type d'écoute est le plus répandu pour 45% des personnes interrogées lors du sondage reporté en I.3.

Pour le cas particulier de l'appartement, le mixage BRUT obtient une note (qui on le rappelle encore correspond à l'adaptation aux conditions d'écoute) de 46,7, alors que le mixage COMPRESSEUR, obtient la note de 55, et le mixage FADER la note de 50,8. Même si ces résultats ne sont pas considérés comme significatifs, car les valeurs des significativités p inter-mixages sont supérieures à 0,05, on peut au moins conclure que ces 3 mixages sont considérés comme autant

adaptés à l'écoute en appartement.

Cela va à l'encontre de l'idée largement répandue que la compression est à proscrire du mixage classique. Pour notre échantillon particulier de mélomanes, on note donc que la compression globale dans des conditions d'écoute calmes n'est pas gênante, elle est même appréciée. Cela peut nous amener à penser que pour réaliser un mixage à la fois agréable à écouter dans des conditions bruyantes ou calmes, il faut chercher une dynamique plus réduite que celle qui existe dans les productions actuelles.

On nuancera ce propos car, en particulier chez les mélomanes, on constate de nos jours un engouement particulier pour le son dit « très haute fidélité ». De nombreuses personnes sont sensibles à la dynamique des enregistrements, et possèdent un système d'écoute adapté pour pouvoir sentir de vraies différences au niveau de la dynamique. Ce public, peu représenté dans l'échantillon de test, n'est pas à négliger car il représente une part importante du marché de la musique enregistrée aujourd'hui. Dans l'idée d'une écoute adaptative où l'auditeur serait libre de choisir un mixage adapté aux conditions d'écoute dans lesquelles il se trouve, on privilégiera donc le contenu brut, à la dynamique importante pour une écoute dans un environnement calme.

Comparaison des traitements FADER et COMPRESSEUR

Nous allons nous attacher à comparer qualitativement ces deux traitements. On obtient pour ces deux mixages des notes moyennes générales très proches, puisque le mixage COMPRESSEUR obtient 49,6 alors que le mixage FADER obtient 49. On peut donc conclure de manière très claire que lors de ce test, aucune différence globale n'a été perçue entre le traitement automatique et le suivi effectué à la main par un professionnel du métier. Cependant, si l'on rentre dans les détails, on peut montrer que dans le cas d'un crescendo lent, l'utilisation du

compresseur est jugée très inadaptée.

En effet, si l'on analyse les moyennes des notes de l'extrait de la 9ème symphonie de Beethoven, on se rend compte que la note attribuée au mixage COMPRESSEUR est inférieure aux autres mixages, alors que pour les deux autres extraits, c'est toujours le mixage qui est considéré comme le plus adapté. Le graphe ci-dessous donne les moyennes des notes des mixages selon les différents extraits.

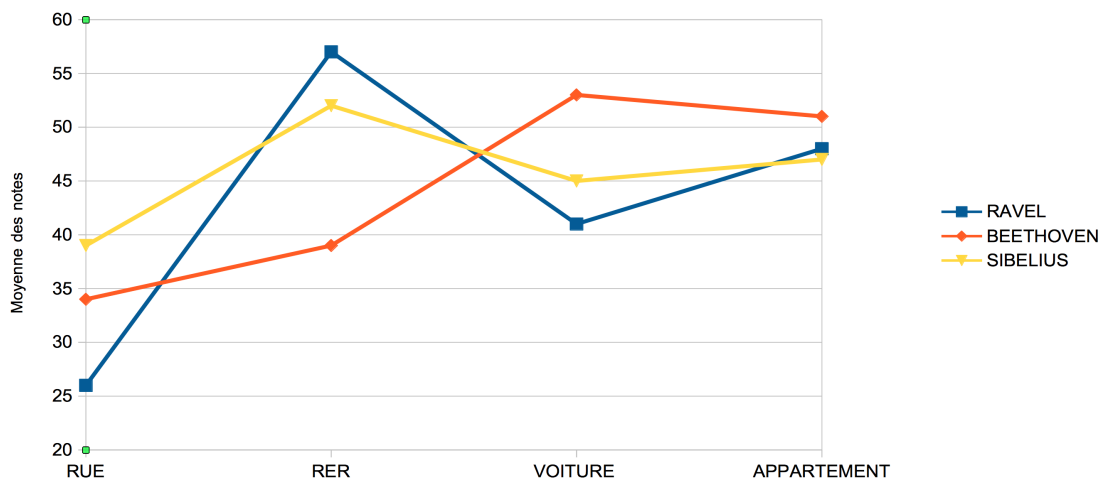


FIGURE 19 – Notes moyennes obtenues pour chacun des types de mixages réalisés en fonction des extraits

De plus, si nous regardons les coefficients de significativité de p , toujours pour le cas de l'extrait de la 9ème symphonie, on se rend compte qu'il existe des différences significatives entre le mixage COMPRESSEUR et les mixages FADER et MULTIBANDE (les coefficients de significativité de p sont de 0,01).

On voit donc que dans le cas particulier de l'extrait 2, le mixage COMPRESSEUR est donc jugé beaucoup moins adapté que les deux autres mixages réduisant la dynamique. On peut supposer que cela est dû à la forme de l'évolution de la

dynamique dans ce cas précis.

On peut également comparer ce résultat avec les notes moyennes pour l'extrait de « Gaspard de la nuit », qui présente également un crescendo, mais beaucoup plus rapide que celui de la 9^{ème} symphonie de Beethoven. On note que pour l'extrait de Ravel, la note du mixage COMPRESSEUR est bien la plus haute.

On peut donc conclure que, dans le cadre de ce test, l'usage du compresseur sur un crescendo lent est jugé discutable, et qu'un suivi au fader paraît donc plus adapté. On peut cependant modérer notre propos en mettant en cause la qualité du mixage COMPRESSEUR de l'extrait de la 9^{ème} symphonie de Beethoven, qui bien que réalisé avec la plus grande attention, a peut-être déplu aux sujets et a donc causé une note plus basse quelle n'eut put l'être. L'appréciation d'un mixage étant, rappelons le, toujours une question de goût.

On également avancer que cette note très basse est due à un effet perceptif tendant à atténuer le climax du *tutti* orchestral qui clôt l'extrait proposé, et donc dévalorise grandement le mixage pour les auditeurs. On pourrait penser à une solution plus douce avec un temps d'attaque plus long qui permettrait de « laisser passer » les premiers instants des passages forts et donc permettrait de conserver l'effet orchestral par exemple de l'ouverture de la 9^{ème} symphonie de Beethoven.

5.4 Résultats et analyse des préférences de mixage en fonction des lieux

Nous allons par la suite nous intéresser à la correspondance entre les notations des différents mixages et les lieux virtuels d'écoute (les ambiances qui sont diffusées). Le graphe ci-dessous récapitule les notes de ces mixages en fonction des lieux d'écoute :

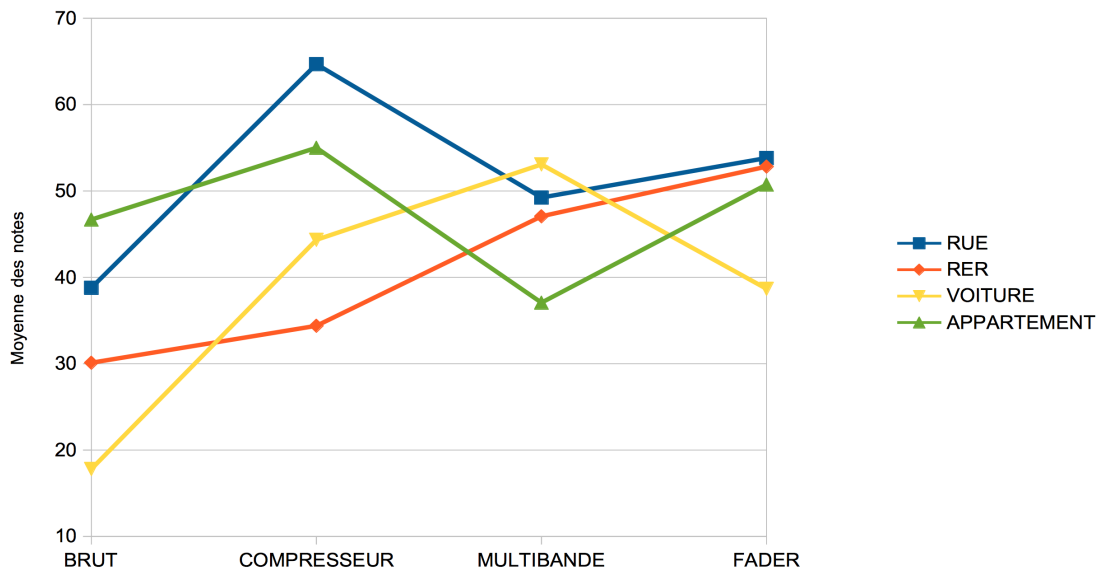


FIGURE 20 – Notes moyennes obtenues pour chacun des types de mixages réalisés en fonction de l'ambiance diffusée

Pour chacun des lieux, nous allons déterminer si un des extraits est préféré de manière significative. Nous allons donc analyser les coefficients de significativité inter-mixages, pour un lieu donné.

Conclusions sur l'écoute en appartement

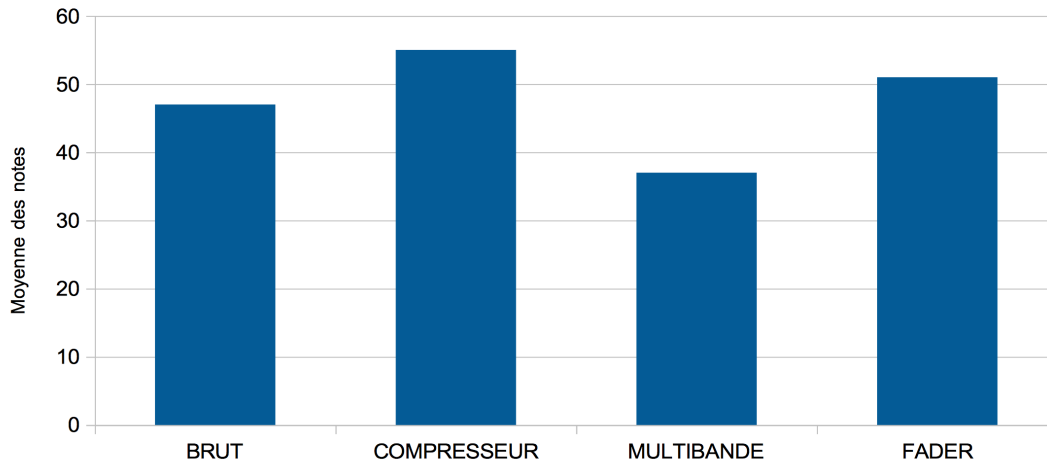


FIGURE 21 – Notes moyennes obtenues pour les mixages dans l'ambiance d'appartement

Pour l'ambiance d'appartement, la seule différence significative notée est celle entre les mixages MULTIBANDE et COMPRESSEUR, le coefficient de significativité de p étant de 0,015, avec une préférence de 19 points pour le mixage compresseur. On remarque donc que le seul mixage qui ne peut être considéré comme le moins adapté est donc le mixage MULTIBANDE.

Comme nous l'avons vu dans la partie traitant des résultats généraux du test, nous opterons pour le mixage réalisé au fader, pour une écoute dans cet environnement calme.

Conclusions sur l'écoute dans la rue

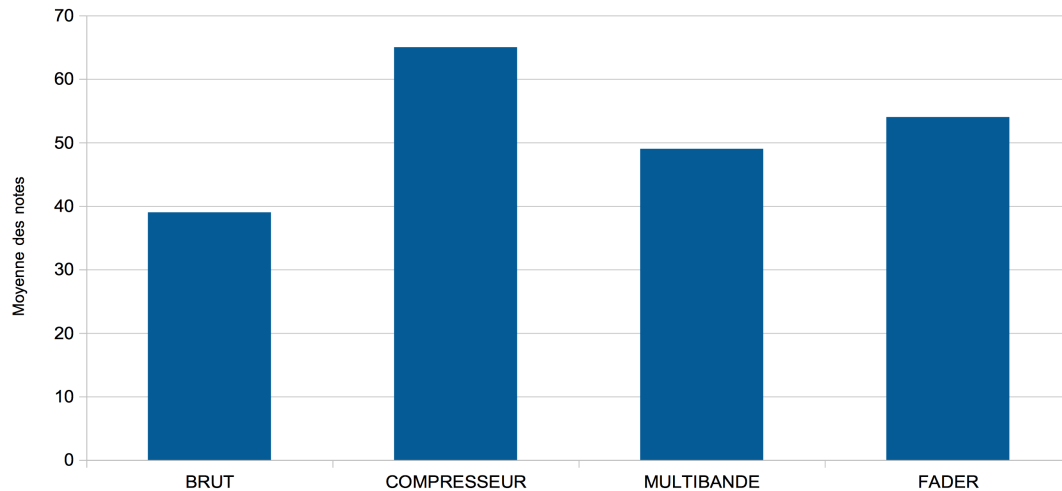


FIGURE 22 – Notes moyennes obtenues pour les mixages dans l'ambiance de rue

Pour la rue, on obtient un résultat évident, concernant le mixage COMPRESSEUR, qui présente des coefficients de significativité très faibles en paire avec les autres mixages : 0,008 ; 0,04 et 0,04. Il est jugé mieux adapté que tous les autres mixages, avec des écarts de note dépassant systématiquement les 10 points sur 100. Les coefficients obtenus entre les autres mixages sont tous supérieurs à 0,05 et donc les écarts entre eux sont possiblement dus à la chance.

On peut donc conclure que le mixage COMPRESSEUR paraît le mieux adapté pour une écoute nomade, dans la rue. De plus, la note moyenne obtenue pour les extraits compressés automatiquement écoutés dans une ambiance de rue est particulièrement élevée, et donc on peut conclure que les sujets ont considéré comme particulièrement agréable cette écoute, au casque dans un environnement que l'on qualifiera de semi-bruyant.

Dans l'idée du développement d'un objet web, ce type de mixage serait donc proposé pour l'écoute dans la rue.

Conclusions sur l'écoute dans les transports

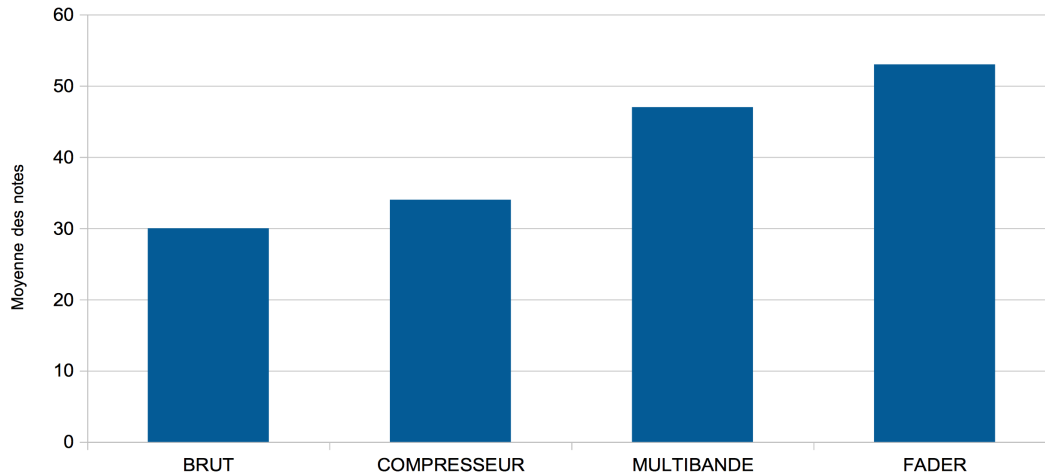


FIGURE 23 – Notes moyennes obtenues pour les mixages dans l'ambiance de RER

Pour l'ambiance de RER, les seules différences significatives que l'on peut noter sont entre les mixages BRUT et MULTIBANDE (avec un coefficient de significativité de p de 0,006) et BRUT et FADER (coefficient égal à 0,004).

La seule conclusion que l'on peut tirer ici est que les contenus globalement plus compressés sont jugés plus adaptés que le contenu BRUT qui a obtenu la note la plus basse. Les écarts entre les autres mixages sont peut-être dus à la chance et on ne peut pas réellement apprécier une préférence significative.

Cependant, on voit une fois de plus que les extraits davantage compressés sont largement jugés plus adaptés à cet environnement d'écoute. On peut également remarquer que le mixage COMPRESSEUR a obtenu une note beaucoup plus basse (d'au moins 10 points) par rapport aux mixages MULTIBANDE ET FADER. Nous pouvons donc isoler ces deux derniers comme étant jugés plus adaptés. Pour

choisir un type de mixage à adopter, on peut se référer au spectre de l'ambiance captée, et dont l'analyse est présentée en annexe 3. On voit que l'ambiance captée dans le RER est très présente dans les graves, dans une zone située entre 20 et 300Hz, avec une moyenne de 55dB environ. Cela nous permet donc naturellement d'opter pour une solution de compression multibande, puisqu'elle semble être jugée comme adaptée par notre échantillon de sujets.

Conclusions sur l'écoute en voiture

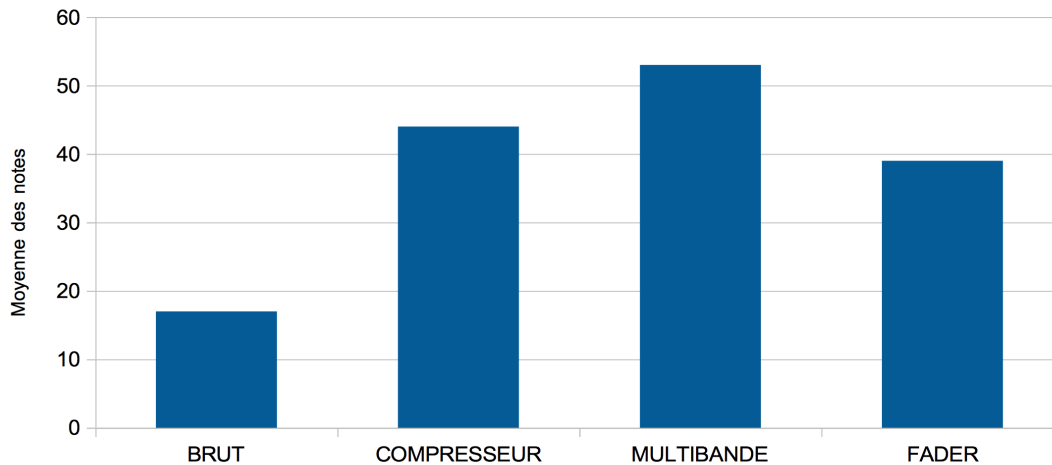


FIGURE 24 – Notes moyennes obtenues pour les mixages dans l'ambiance de voiture

Pour l'ambiance de voiture, on note des différences significatives entre le mixage BRUT et tous les autres (les coefficients sont de 0,003 ; 0 et 0,003) , et également entre les mixages MULTIBANDE et FADER qui présentent un coefficient de significativité de p de 0,03.

Encore une fois, on peut conclure que les contenus les plus compressés sont jugés plus adaptés que le contenu BRUT, en justifiant d'une différence de 20 points au minimum. On peut également dire que le contenu MULTIBANDE, qui a été le

mieux noté, est jugé mieux adapté que le le mixage FADER.

On a vu que le mixage jugé le mieux adapté pour une écoute dans l'ambiance de voiture est le MULTIBANDE, qui est considéré significativement meilleur que le BRUT et le FADER. Au regard de l'analyse spectrale de l'ambiance captée en voiture, qui est également principalement fournie entre 20 et 100Hz, on en déduit que la solution de la compression multibande est également la meilleure pour une écoute en voiture, et donc que c'est elle qui pourrait être retenue pour le développement d'un objet web adapté.

Cependant, comme nous l'avons noté précédemment, les zones fréquentielles de masquage ne sont pas les mêmes selon l'ambiance de voiture ou de RER. On pourra ainsi penser à implémenter des compressions multibandes différentes selon l'ambiance, optimisées par rapport à chacune d'entre elles.

5.5 Conclusions générales - Possibilité d'application

Conclusion du test

Nous avons donc pu grâce à ce test perceptif orienter clairement les choix techniques dans le but de créer un outil de lecture adaptatif par rapport aux conditions d'écoute. Nous rappelons que cette étude a été faite pour le cas spécifique de la musique classique, et qu'elle aurait peu de sens dans le cadre de musiques actuelles, puisque les masterings de ces musiques sont souvent très peu dynamiques et ne sont donc pas sujets au masquage.

Pour les ambiances que nous avons étudiées, nous avons donc montré que le **mixage brut était bien souvent le plus adapté à une écoute calme**, en appartement, ou dans des conditions similaires. Les mixages réalisés à l'aide d'un compresseur **multi-bandes sont eux les plus adaptés pour une écoute en voiture, ou dans les transports en commun**. Enfin, le mixages réalisé à l'aide d'un **compresseur simple est le plus adapté à une écoute citadine, dans la rue**.

Possibilités d'application

Nous avons traité dans la première partie de l'importance de la diffusion musicale sur internet, et de son essor constant ces dernières années. Ainsi, nous pouvons clairement envisager comme solution adaptative d'utiliser l'intégration web d'un player interactif. Expliquons-nous : il existe déjà sur les célèbres players vidéos actuels des fonction adaptatives concernant le débit vidéo, permettant au lecteur de s'adapter au débit Internet de chaque utilisateur. On peut envisager le même type de procédé sur des lecteurs audio, avec une adaptation aux conditions d'écoute de chaque utilisateur. On pourrait ainsi leur proposer différents mixages adaptés par exemple aux quatre conditions d'écoute que nous avons rencontrées dans ce mémoire : calme, en voiture, dans la rue, et dans les transports. Il existe deux manières de mettre en place ce procédé :

- on peut penser réaliser 4 mixages (ou masterings) différents pour chaque titre produit, et donc diffuser quatre flux différents à travers notre player. Cette solution a pour avantage d'être très intéressante sur le plan artistique, car elle assure que chaque nouveau mixage du contenu sera réalisé au regard de l'oeuvre et dans son respect. Cependant, on comprend bien vite que cette solution est en pratique irréalisable du fait qu'elle impliquerait un changement majeur dans le schéma de production actuel, et de plus, qu'il faudrait mixer en conséquence tous les contenus anciens pour les rendre utilisables sur cet outil.

- une deuxième solution consiste à intégrer dans l'outil de lecture les traitements permettant de réaliser les mixages désirés, sur des critères bien précis en accord avec les résultats de ce mémoire. Ce projet possède cependant quelques difficultés de réalisation :

- la nécessité de travailler sur un flux non compressé en débit. En effet, il est plus compliqué de réaliser des tels traitements sur un flux utilisant une technologie de réduction de débit.

- l'implémentation de traitements audios complexes et qualitatifs sur un objet

web.

- la normalisation des fichiers traités (niveau le plus haut à 0dBFS) afin que les seuils de compression soient valables pour tous ces fichiers.

Conclusion

Cette étude nous a donc montré l'intérêt d'adapter le mixage des oeuvres classiques aux conditions dans lesquelles elles sont écoutées. On a déterminé des types de mixages qui sont jugées significativement plus adaptées à une écoute dans le RER, dans une voiture, ou dans la rue.

Cela nous donne donc une base de travail sérieuse pour continuer à l'élaboration d'un player web permettant d'adapter l'écoute aux conditions dans lesquelles se trouvent les auditeurs. On peut en effet envisager de réaliser un outil interactif qui intégrerait des traitements légers, qui permettraient de démasquer suffisamment la musique, comme nous l'avons fait pour la mise en place de ce test perceptif. Il conviendrait alors d'utiliser des réglages proches de ceux qui sont utilisés dans l'élaboration de nos stimulus, et de garder à l'idée que le respect des oeuvres est primordial dans ce travail.

Enfin, nous concluons que même si l'écoute dans des conditions optimales restera certainement la favorite des mélomanes, une possibilité d'écoute nomade de qualité permet par exemple aux musiciens qui travaillent l'interprétation d'une oeuvre et aux auditeurs moins exigeants de pouvoir écouter leur contenu musical à tout moment, pour leur plus grand plaisir.

Annexe 1 : script Matlab

```
1 clear, clc, close all
2
3 % get a section of the sound file
4 [x,fs] = audioread('/Users/Antoine/Documents/
    Louis_Lumiere/memoire/FFT_matlab/rer_matlab.wav');
5 x = x(:,1); % get the first channel
6 xmax = max(abs(x)); % find the maximum value
7 x = x/xmax; % scalling the signal
8
9 % time & discretisation parameters
10 N = length(x);
11 t = (0:N-1)/fs;
12
13 % spectral analysis
14 win = hanning(N); % window
15 K = sum(win)/N; % coherent amplification of the
    window
16 X = abs(fft(x.*win))/N; % FFT of the windowed signal
17 NUP = ceil((N+1)/2); % calculate the number of unique
    points
18 X = X(1:NUP); % FFT is symmetric, throw away
    second half
19 if rem(N, 2) % odd nfft excludes Nyquist
    point
20     X(2:end) = X(2:end)*2;
21 else % even nfft includes Nyquist
    point
22     X(2:end-1) = X(2:end-1)*2;
```

```

23 end
24 f = (0:NUP-1)*fs/N;      % frequency vector
25 X = 20*log10(X);         % spectrum magnitude
26
27 % plotting of the spectrum
28 figure(3)
29 semilogx(f, X+106, 'r')
30 xlim([0 max(f)])
31 grid on
32 set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
33 title('Intensité sonore en fonction de la fréquence')
34 xlabel('Fréquence, Hz')
35 ylabel('Intensité sonore, dBC')
36 axis([20 20000 0 100]);
37
38 % calculate the Bark bands maximums
39 v=[max(X(find(f==20):find(f==100)))+106,
40 max(X(find(f==100):find(f==200)))+106,
41 max(X(find(f==200):find(f==300)))+106,
42 max(X(find(f==300):find(f==400)))+106,
43 max(X(find(f==400):find(f==510)))+106,
44 max(X(find(f==510):find(f==630)))+106,
45 max(X(find(f==630):find(f==770)))+106,
46 max(X(find(f==770):find(f==920)))+106,
47 max(X(find(f==920):find(f==1080)))+106,
48 max(X(find(f==1080):find(f==1270)))+106,
49 max(X(find(f==1270):find(f==1480)))+106,
50 max(X(find(f==1480):find(f==1720)))+106,
51 max(X(find(f==1720):find(f==2000)))+106,
52 max(X(find(f==2000):find(f==2320)))+106,
53 max(X(find(f==2320):find(f==2700)))+106,

```

```

54 max(X(find(f==2700):find(f==3150)))+106,
55 max(X(find(f==3150):find(f==3700)))+106,
56 max(X(find(f==3700):find(f==4400)))+106,
57 max(X(find(f==4400):find(f==5300)))+106,
58 max(X(find(f==5300):find(f==6400)))+106,
59 max(X(find(f==6400):find(f==7700)))+106,
60 max(X(find(f==7700):find(f==9500)))+106,
61 max(X(find(f==9500):find(f==12000)))+106,
62 max(X(find(f==12000):find(f==15500)))+106,
63 max(X(find(f==15500):find(f==22050)))+106]
64
65 % calculate the audibility threshold for each Bark band
66 .
67 a=v-5

```

Annexe 2 : patch MAX

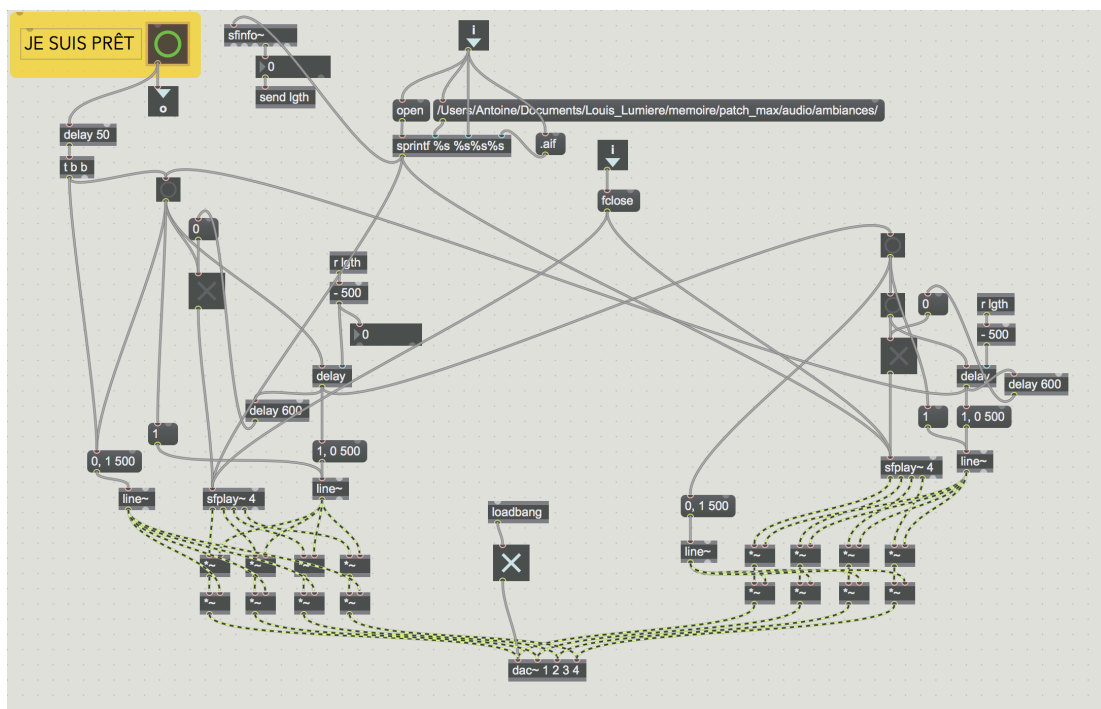


FIGURE 25 – Lecteur des ambiances du patch

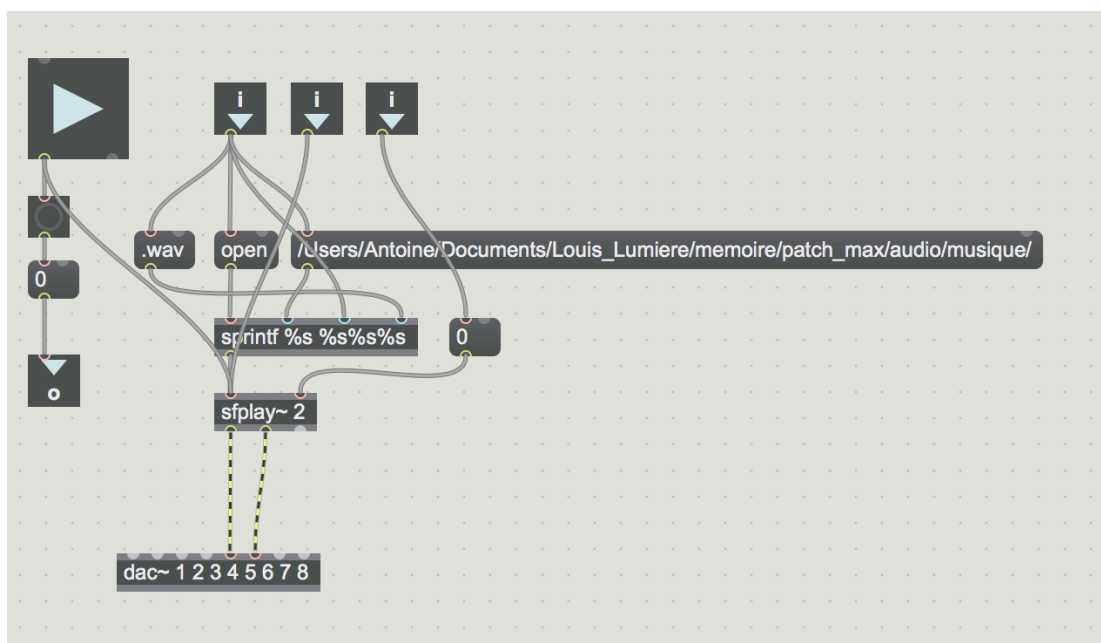


FIGURE 26 – Lecteur des extraits musicaux du patch

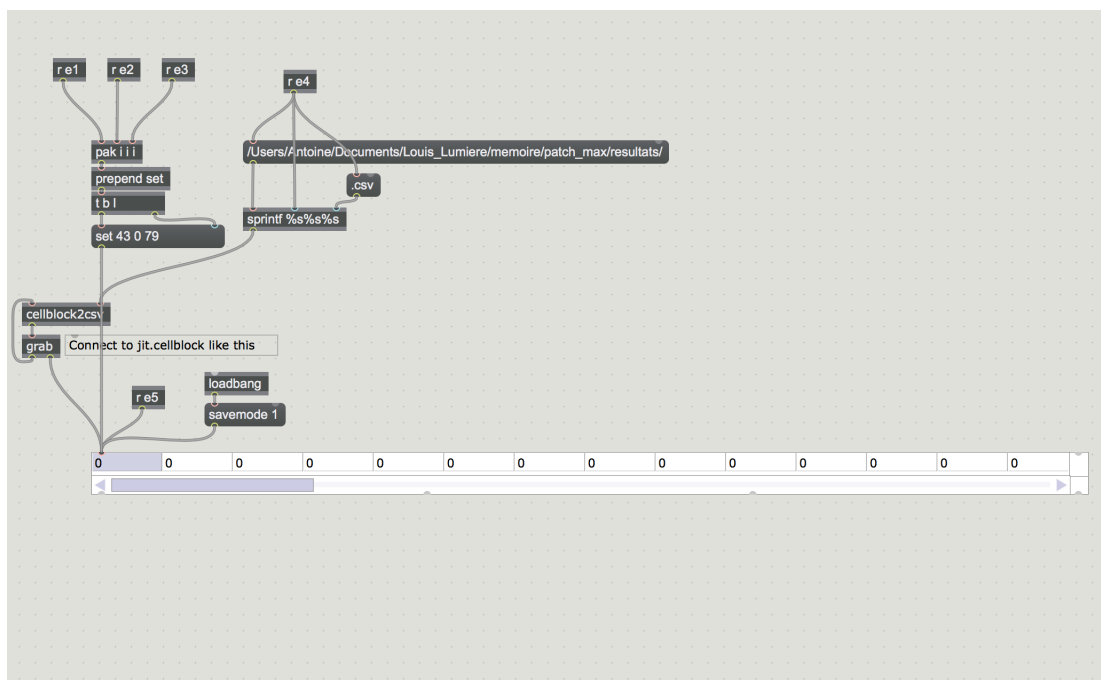


FIGURE 27 – Patch de récupération des données

Annexe 3 : Analyses fréquentielles des ambiances

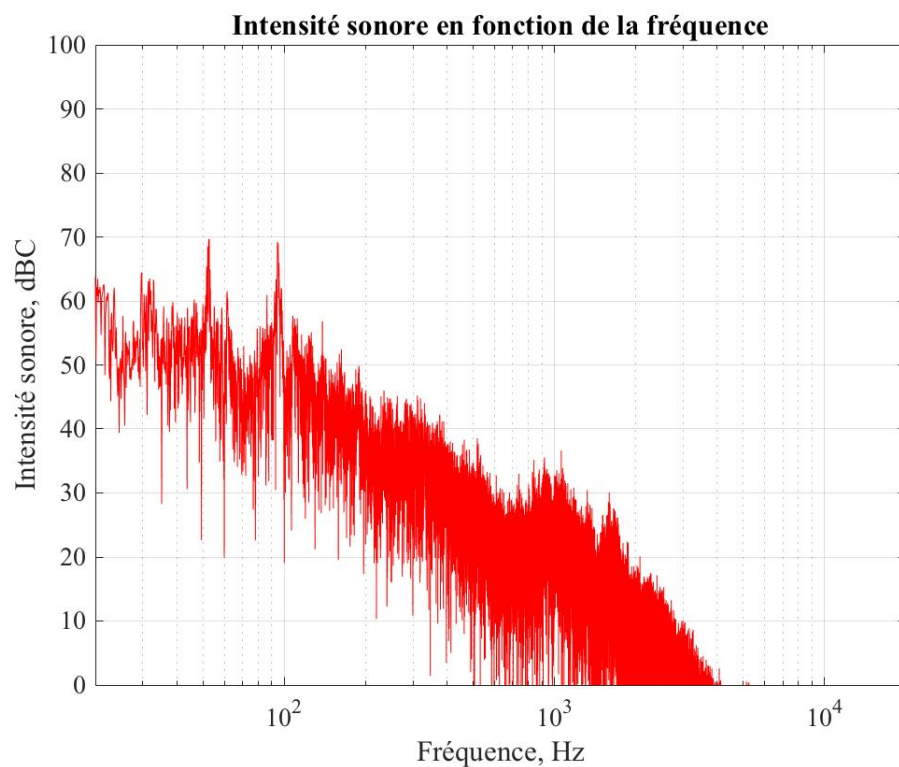


FIGURE 28 – Analyse spectrale de l’ambiance captée dans la voiture

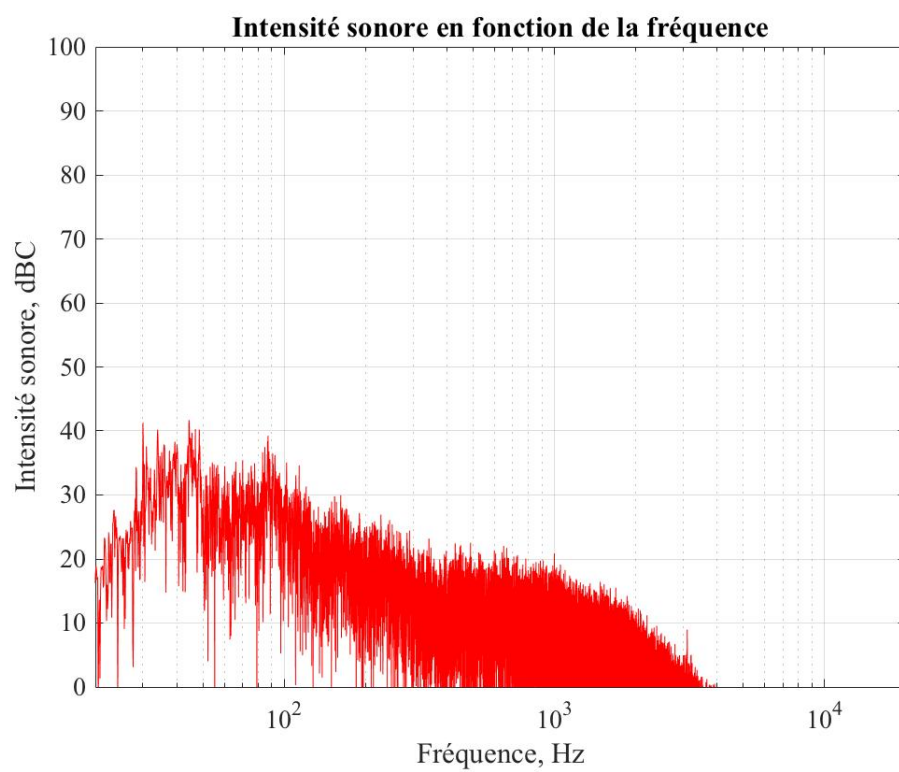


FIGURE 29 – Analyse spectrale de l’ambiance captée dans la rue

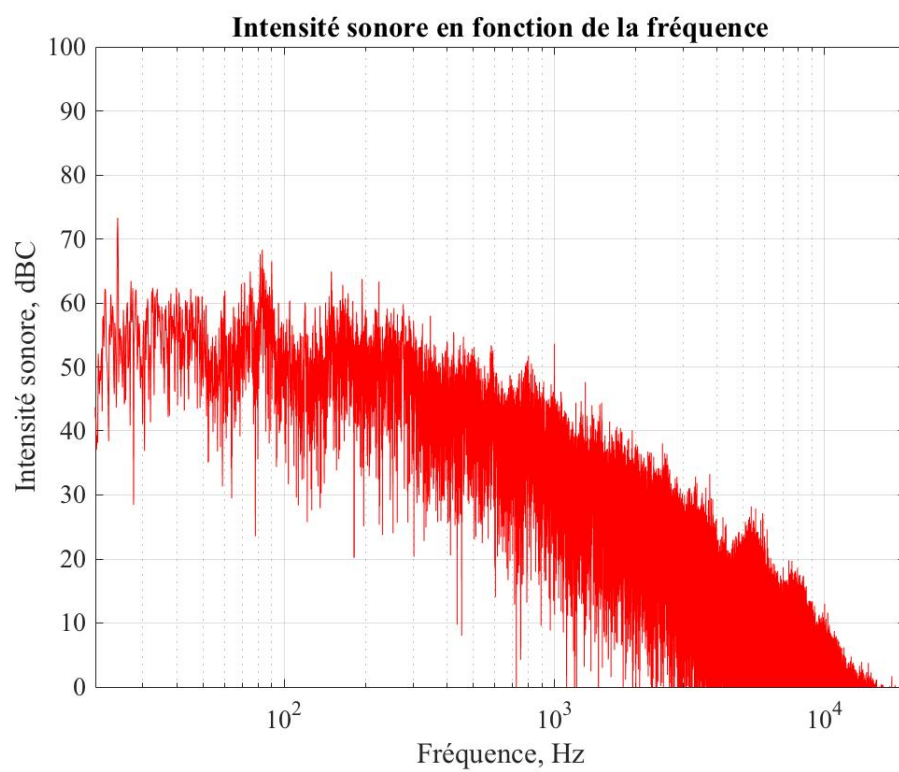


FIGURE 30 – Analyse spectrale de l’ambiance captée dans le RER

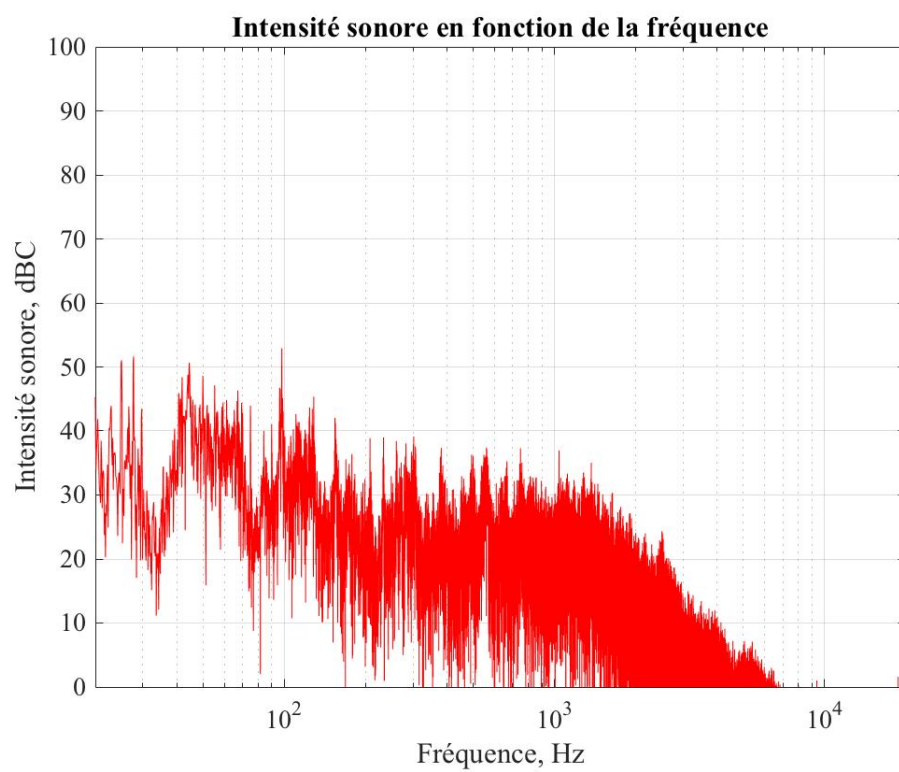


FIGURE 31 – Analyse spectrale de l’ambiance captée dans un appartement

Bibliographie

Dictionnaire Larousse en ligne : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>

Iégor Reznikoff, Michel Dauvois, "La dimension sonore des grottes ornées", *Bulletin de la Société préhistorique française*, Volume 85, Numéro 8, 1988, pp. 238-246

Collectif d'auteurs sous la direction de Denis Mercier, *Le livre des techniques du son*, Paris, Dunod, Collection Audio-Photo-Video, 2012, 584 pp

Fletcher H., *Auditory Patterns*, Rev. Mod. Phys.12, 1940, pp 47-65

Jean Chatauret, "La perspective sonore", *Communications*, 2009, Volume 85, Numéro 1, pp. 139-154

Naomi B. H. Croghan, Kathryn H. Arehart, James M. Kates, "Quality and loudness jugements for music subjected to compression limiting", *JASA*, 2012

Jens Hjortkjær, Mads Walther-Hansen, "Perceptual Effects of Dynamic Range Compression in Popular Music Recordings", *JAES*, 2014, Volume 62 Issue 1/2 pp. 37-41

Bergame Périaux, Jean-Luc Ohl, Patrick Thévenot, *Le son multicanal : De la*

prise de son aux systèmes d'écoute, Paris, Dunod, collection Audio-Photo-Vidéo, 2015, 456 pp

Bob Katz, *Mastering Audio : The Art and the Science*, Taylor & Francis, 2007, Deuxième édition, 336 pp

Rämö Jussi, Välimäki Vesa, Alanko Mikko, Tikander Miikka, "Perceptual Frequency Response Simulator for Music in Noisy Environments", *45th International Conference : Applications of Time-Frequency Processing in Audio*, 2012, pp 5-6

Norbert Dufourcq, *Le Livre de l'orgue français, tome 3 : La facture*, Editions A. et J. Picard, 1979, 316pp.

Xavier Boutillon, "Le piano : Modélisation physique et développements technologiques" , Colloque de Physique C2, supplément au n°2, T.51 [tiré à part sans mention d'éditeur]

Mathilde Genas, "Quel mastering pour la musique classique?", Mémoire du CNSM de Paris, département techniques du son, 2015

Pierre Schaeffer, *A la recherche d'une musique concrète*, Paris, Editions du Seuil, 232 pp, 1952

EBU, tech 3342 : *Loudness Range, a measure to supplement EBU R128 Loud-*

ness normalization, Version 3.0, Genève, 2016