

Une méthode d'étude de la qualité acoustique des sons réels complexes

Frédérique Guyot, Michèle Castellengo,
Corsin Vogel, Valérie Maffiolo

Laboratoire d'Acoustique Musicale,
Université Paris 6, UMR 9945 CNRS,
Tour 66, case 161,
4, place Jussieu - 75005 PARIS



Ma voiture est un violon". Telle est l'image sonore qu'un constructeur automobile veut donner à sa nouvelle ligne de produit, tout en ajoutant "l'idéal c'est une voiture qui sonne bien". Un nouveau défi est donc lancé aux acousticiens : travailler l'art sonore des bruits que produisent les objets qui nous environnent, ceux que nous utilisons et ceux que nous subissons. Mais n'est-ce pas la compétence séculaire des luthiers de travailler la qualité sonore de ces objets très particuliers qu'ils fabriquent, les instruments de musique ? Le problème auquel se heurtent les luthiers et qui fait l'objet de questionnements auprès des chercheurs en acoustique musicale est celui de l'évaluation **objective** des critères de qualité sonore. Comment définir ces critères ? Peut-on les quantifier pour valider les progrès accomplis ? Sont-ils généralisables à tous les auditeurs ? Peut-on définir une échelle numérique de qualité perçue basée sur des paramètres acoustiques objectifs ?

De nombreuses études comparatives fondées sur la seule analyse acoustique ont été réalisées sur des ensembles de violons ou de guitares de qualités diverses, mais les résultats décevants ont découragé plus d'un chercheur. Habitué aux mesures précises et reproductibles, les scientifiques déclarent que les notions de qualité, de goût, de préférence qui mettent en jeu la subjectivité des sujets ne sont pas généralisables et donc ne peuvent pas être appréhendées de manière mesurable.

C'est dans le cadre d'une collaboration étroite avec des chercheurs en psychologie cognitive que nous avons pu reformuler les données du problème en prenant comme point de départ la mise au point d'une méthode d'étude objective des avis des sujets, l'analyse acoustique n'intervenant qu'en second lieu. Envisagée sous cet angle notre recherche devait s'appuyer sur les résultats les plus récents des études de la perception humaine des stimuli du monde réel, en situation naturelle. Le cadre retenu est celui de la catégorisation prototypique.

Qu'est ce que la catégorisation prototypique ?

"Percevoir c'est catégoriser"

Nos comportements tels la survie, la reconnaissance ou la communication, supposent d'une part, une mémorisation des événements perçus antérieurement et d'autre part, une organisation optimale du stockage des informations induites par la perception.

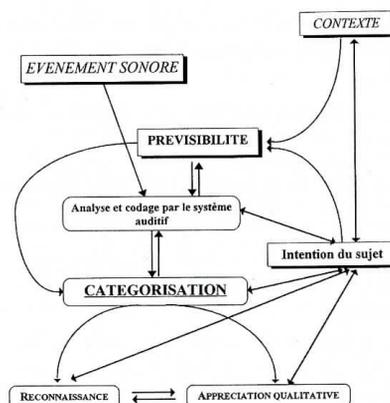


Fig. 1 : Schéma simplifié du processus de perception des événements sonores

Le concept de catégorisation prototypique comme processus d'organisation des événements, développé aux Etats-Unis [1] puis repris en France, a fait l'objet de nombreuses études en linguistique et en perception visuelle [2]. Ce concept n'est pas nouveau mais la structure supposée des catégories a évolué depuis la théorie classique jusqu'à celle de Rosch, plus "écologique". En effet, le concept de catégorisation prototypique repose sur deux principes de base justifiant le bon comportement de l'individu dans son environnement quotidien. Ces deux principes sont les suivants :

- d'une part, "l'économie cognitive", qui traduit la nécessité d'accéder à un maximum d'informations dans un minimum d'efforts cognitifs,
- d'autre part, "la non-équiprobabilité des événements perçus", qui prend en compte l'organisation du monde. Par exemple, nous observons plus fréquemment un oiseau avec des plumes qu'avec de la fourrure!

Les études menées par Rosch sur des objets manufacturés ont mis en évidence une structure des catégories suivant deux dimensions :

- une dimension verticale, qui représente l'organisation hiérarchique des catégories en différents niveaux d'abstraction.
- une dimension horizontale, qui représente la structure interne des catégories d'un même niveau d'abstraction.

Si nous prenons pour exemple les instruments de musique, nous aurons une organisation verticale hiérarchisée correspondant tout d'abord aux sons entretenus ou percussifs, puis aux niveaux des grandes classes d'instruments (cordes, vents, percussions) ensuite au niveau des instruments individuels connus de tous : flûte, piano, violon.

Les catégories du niveau de fonctionnement "normal", appelé niveau de base, (niveau variable d'un individu à l'autre suivant sa culture, son expertise et son intention) ont une structure dite prototypique. Il existe dans une même catégorie des éléments plus ou moins représentatifs dont un, plus privilégié est appelé prototype. Ainsi, si nous reprenons l'exemple des instruments de musique, le piano sera peut être le prototype des instruments à cordes frappées, la guitare celui des instruments à cordes pincées, etc. Mais tout comme pour le niveau de base, le prototype ou l'objet le plus typique d'une catégorie peut changer d'un individu à l'autre. Il est important de noter que les objets appartenant à une même catégorie ont des relations de similarités perceptives (qui n'ont pas forcément de corrélats physiques) et que les objets de catégories différentes ont des relations de dissimilarités.

Finalement, essayant de mettre en évidence et de comprendre les jugements de qualité sonore d'un ensemble de bruits, nous cherchons à étudier comment les sujets organisent et donc catégorisent leurs jugements.

Ainsi munis d'un schéma de perception des événements sonores nous pouvons envisager l'étude de l'appréciation qualitative des bruits par l'individu. Comprendre les jugements de qualité revient alors à trouver des catégories de bruits de qualité équivalente et à en déterminer les structures internes et externes. Il est bien entendu que ces jugements de qualité sont soumis à des facteurs de variabilité nombreux dont les plus facilement maîtrisables d'un point de vue expérimental sont **la reconnaissance** (un même objet sonore sera apprécié différemment si il est reconnu ou s'il ne l'est pas), **le contexte** qui induit une grande prévisibilité des événements et enfin **l'intention du sujet** (le jugement changera par exemple si le bruit est subi ou provoqué). En résumé, ceci nous indique que l'existence de critères généraux de qualité est peu probable et que de fait, toute étude sur la qualité sonore doit prendre en compte tous ces facteurs de variabilité en se référant à un type de sons issu d'une source ou d'un contexte équivalents, et en plaçant les sujets testés dans une situation d'écoute bien définie.

Afin de montrer la faisabilité d'une telle étude, nous avons mis en place une méthodologie complète que nous avons validée sur un corpus de bruits d'aspirateurs.

Méthode expérimentale pour l'étude de la qualité sonore

La méthode que nous développons et dont le maître mot est "validité écologique", s'articule autour de cinq grandes étapes.

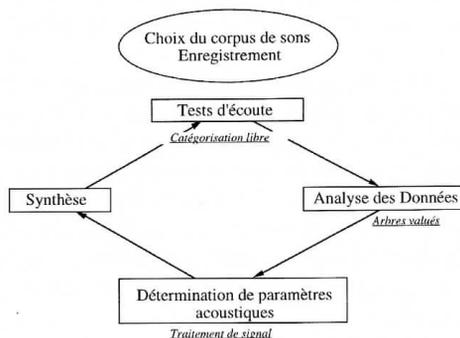


Fig. 2 - Méthode bouclée adaptée à l'étude de l'appréciation de qualité sonore par l'individu

1- La première étape est déterminante pour la validité de l'étude. Il faut non seulement choisir un corpus de bruits formant une unité mais également enregistrer ces bruits de manière "réaliste". L'enregistrement est en effet une source indéniable d'artifices mais il est nécessaire à la mise en place d'expériences reproductibles et indispensables à l'analyse acoustique des signaux.

C'est pourquoi il doit être exécuté avec soin afin d'obtenir un enregistrement non seulement reconnaissable mais également le plus proche possible du bruit original. La technique de prise de son (méthode d'enregistrement, lieu d'enregistrement, etc.) doit donc être adaptée à chaque cas étudié.

2- La seconde étape consiste en un test d'écoute. Nous avons opté pour une procédure de catégorisation libre sans exclure la possibilité d'en utiliser d'autres comme celle dite de dissimilarité. Le choix de cette procédure trouve sa motivation dans le fait qu'elle n'implique **aucune contrainte de verbalisation** à l'inverse de la méthode du différentiel sémantique [3] et qu'elle ne pose a priori aucune hypothèse sur les critères perceptifs de qualité. En effet, la tâche demandée aux sujets est de classer le corpus qui leur est présenté en catégories de sons de qualités équivalentes, sans contrainte sur le nombre de catégories ni sur celui des éléments par catégorie. Cette catégorisation doit être entreprise en précisant aux sujets le contexte d'écoute dans lequel ils doivent s'imaginer, ainsi que la nature des bruits qu'ils entendent. Dans une seconde partie, il est demandé aux sujets de caractériser verbalement les catégories qu'ils ont créées.

3- A cette méthode de test est associée une méthode d'analyse statistique des résultats dite d'analyse arborée [4] qui nous donne une représentation des résultats sous forme de catégories correspondant à une moyenne des catégories formées par les sujets. Les arbres sont des représentations qui gèrent les distances en termes de similarités et de dissimilarités. Ils ont l'intérêt d'être des modèles formels de représentation qui visualisent le concept de catégorie sous une autre forme que la représentation linguistique. Un arbre se caractérise par trois paramètres principaux.

Un arbre est représenté par :

- ses feuilles qui sont, soit les bruits étudiés, soit les sujets eux-mêmes (pour repérer ceux qui répondent trop différemment de leurs semblables et ainsi les éliminer).
- ses nœuds qui sont des prototypes virtuels des différentes catégories que le programme a créées. Chaque nœud représente ainsi une entité qui partage avec un groupe d'objets les caractères communs aux membres de ce groupe.
- ses branches qui sont des segments avec une longueur significative du degré de typicalité.

La formation d'un arbre s'opère en une succession d'itérations. La pertinence des catégories formées décroît avec le numéro de l'itération. Les catégories obtenues sont interprétées en termes de qualité à l'aide des verbalisations données par les sujets. Pour ce faire, nous relevons les unités verbales les plus souvent employées et nous calculons le pourcentage de chaque descripteur pour chaque son. La description verbale des sons donne de riches indications sur les critères perceptifs justifiant la formation des catégories et indique les directions à prendre pour l'analyse physique des signaux.

4- Cette étape consiste à trouver la représentation physique du son la mieux adaptée à la mise en évidence de paramètres acoustiques en corrélation avec les paramètres perceptifs de catégorisation. Ce travail est d'autant plus délicat que nous utilisons des signaux réels donc extrêmement complexes.

5- Enfin, la dernière étape a pour but de valider la pertinence des paramètres acoustiques extraits précédemment et ce en les modifiant ou en les éliminant. Ces transformations peuvent se faire par analyse-synthèse (Logiciel Audiosculpt développé par l'IRCAM). Il est ensuite nécessaire de mettre en place une nouvelle tâche expérimentale en confrontant les sons modifiés à quelques originaux.

C'est le degré de finesse que l'on cherche à atteindre dans la recherche de paramètres de qualité qui décide de la poursuite ou non de ce cycle expérimental.

L'arbre obtenu par la méthode d'analyse arborée montre la formation de plusieurs catégories.

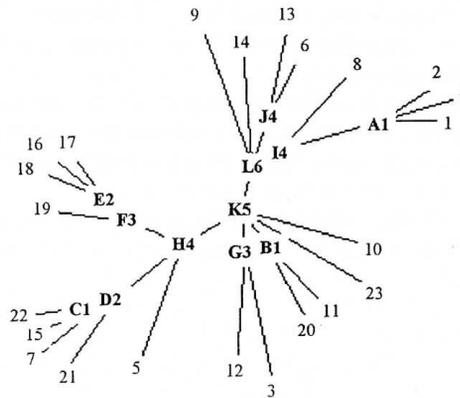


Fig. 4 : Arbre obtenu par l'algorithme d'analyse arborée de Barthélemy et Guénoche. Les lettres représentent les nœuds avec en indice le numéro de l'itération dans laquelle ils ont été formés. Les nombres représentent les bruits d'aspirateur.

Etude de la qualité sonore d'un corpus de bruits d'aspirateurs

Les aspirateurs ont été enregistrés par nos soins, dans une pièce faisant office de bureau, suivant la procédure représentée figure 3.

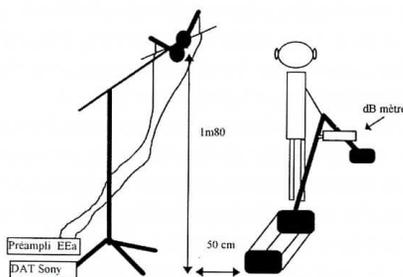


Fig. 3 : Procédure d'enregistrement des aspirateurs

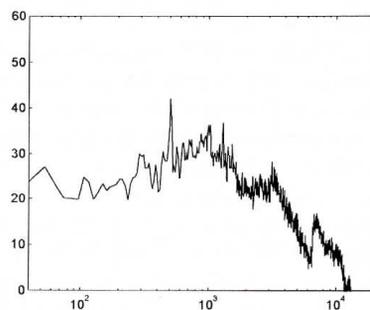
La technique d'enregistrement adoptée est la méthode dite de coïncidence permettant, à l'aide de deux microphones cardioïdes (AKG D24, dynamiques) une écoute stéréophonique et l'obtention d'un signal monophonique cohérent pour mener à bien les analyses acoustiques. La position des microphones a été établie à l'oreille de manière à obtenir un signal enregistré le plus proche possible du bruit original.

Sur la base d'un corpus de 23 bruits d'aspirateurs d'une durée de 5 secondes, mise en route comprise, nous avons mené un test de catégorisation libre avec 46 sujets. La consigne était la suivante : "Vous allez entendre des bruits d'aspirateurs. Ecoutez et imaginez que vous êtes en train de passer l'aspirateur. Le but de cette tâche est de classer les 23 bruits d'aspirateurs suivant le degré de confort qu'ils vous évoquent. Vous êtes libre d'écouter les bruits autant de fois qu'il vous semble nécessaire. Tous les bruits doivent être classés même seuls dans une catégorie et chaque bruit ne doit appartenir qu'à une seule catégorie."

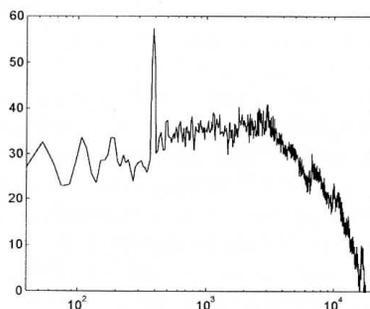
Cette première tâche achevée les sujets reçoivent une deuxième consigne : "Maintenant que vos catégories sont formées, je vous demande de les caractériser au mieux et d'entourer le meilleur représentant de chacune d'elles"

Les deux catégories les plus contrastées sont H4 dont les sons sont qualifiés de "bruyants, insupportables, strident ou encore aigus" et I4 dont les sons sont perçus comme "agréables, doux, peu sonores". Les autres catégories : G3, B1 et J4 regroupent des sons de qualité moyenne, aigus et assez bruyants.

Un calcul du niveau sonore (dB SPL) montre que les éléments de la catégorie H4 sont les plus intenses alors que ceux de la catégorie I4 sont les moins intenses. Cependant, les catégories F3 et D2 ne trouvent pas leur justification dans ce paramètre. Le calcul du niveau en Sones par la méthode de Zwicker ne donnant pas de résultats plus pertinents que la mesure en dB nous avons calculé les spectres des différents bruits.



FFT Moyennée de l'aspirateur 4



FFT Moyennée de l'aspirateur 18

Fig. 5 : Spectres de deux bruits de qualité opposée (fréquence d'échantillonnage 44,1 kHz - moyenne de 64 FFT sur 4 096 points)

Il apparaît alors clairement que les bruits de la catégorie F3 ont tous une raie spectrale émergente dans la zone d'écoute [5] et que ceux de la catégorie D2 ont beaucoup d'énergie dans la zone sensible de l'oreille. Les bruits de la catégorie I4 n'ont aucune de ces caractéristiques de désagrément.

Afin d'estimer l'importance relative du niveau sonore par rapport aux caractéristiques spectrales supposées gênantes, nous avons égalisé tous les bruits à l'oreille et mené une nouvelle tâche perceptive.

L'arbre obtenu montre que les catégories les plus contrastées ont été globalement conservées (A1 versus G3 et B1).

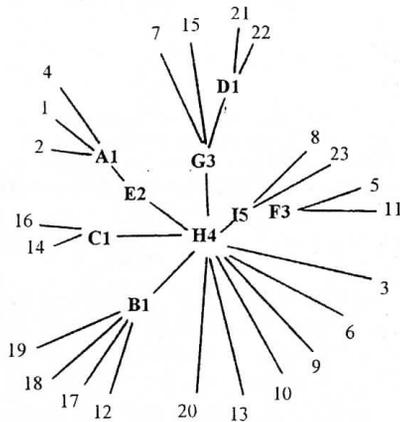


Fig.6 : Arbre de la seconde tâche : les bruits d'aspirateurs ont été égalisés en sonie.

Tous les bruits de qualité moyenne dans l'expérience précédente n'ont pas reçu de jugement majoritaire et ne forment pas de catégories.

Ce test a donc permis de mettre en évidence un certain nombre de "défauts acoustiques" à l'origine des catégories obtenues.

- niveau de bruit ; c'est le critère prépondérant, un niveau trop fort déclassera un aspirateur par rapport à un autre de niveau plus faible (il a en effet tendance à "écraser" les qualités éventuelles du bruit, voire accentuer les défauts),
- note de l'aspirateur : émergence d'une composante pure (observée dans la zone 400 - 1000 Hz) qui crée une fatigue d'écoute,
- effet de sifflement : présence de bandes noires ou d'une raie dans la zone sensible de l'oreille (2000-3000 Hz), aggravée par l'étalement en hautes fréquences du spectre ; cet effet est plutôt stressant et irritant,
- déséquilibre du spectre : trou en basses fréquences (énergie localisée aux fréquences supérieures à 1500 Hz),
- évolution temporelle : l'évolution irrégulière notable (par exemple, l'apparition de composantes fréquentielles pures) inspire la méfiance, la non-fonctionnalité.

La dernière expérience a alors consisté à resynthétiser un certain nombre de ces sons, en modifiant notamment les caractères spécifiques des spectres, et à égaliser à nouveau les niveaux sonores des différents bruits. Cette étape a permis de valider pratiquement tous les défauts discernés dans les premières expériences. Ainsi, la suppression d'une raie spectrale ou de l'étalement d'un

spectre en hautes fréquences a conduit à une très nette amélioration de la qualité sonore confirmée par les changements de catégorie de ces bruits.

Conclusions

L'étude de la qualité sonore est un problème complexe qui nécessite de tenir compte de plusieurs critères, d'une part, le type de bruits étudiés et le contexte dans lequel ils sont écoutés (environnement), et d'autre part, la situation d'écoute dans laquelle est l'auditeur ainsi que le degré d'expertise de celui-ci (culture, expérience).

La méthode de recherche que nous avons développée permet aux sujets d'exprimer leurs préférences sans recourir à l'expression verbale qui limite ou canalise leur perception. L'emploi des mots n'intervient qu'après coup, chaque sujet étant invité à commenter les résultats de sa catégorisation. Nous avons validé expérimentalement la méthode en l'appliquant à un cas concret, celui des aspirateurs. Elle consiste en un cycle de trois étapes : une organisation de tests de catégorisation libre, une représentation arborescente, obtenue à l'aide d'un algorithme de tracé d'arbre valué, une détermination proprement dite des paramètres à l'aide d'un logiciel d'Analyse-Synthèse. Les résultats obtenus avec des bruits d'aspirateurs sont tout à fait satisfaisants car ils ont permis de mettre en évidence des traits acoustiques responsables de la gêne. Ils nous permettent d'être optimistes quant à l'application de cette méthodologie à des bruits domestiques pour étudier la gêne, le confort, la pertinence fonctionnelle...

L'intérêt d'une telle méthode est son application à de nombreux autres types de bruits, notamment à différentes ambiances sonores urbaines (signaux d'avertissement, bruits dans l'habitable des voitures, etc.) qui feront l'objet de prochaines études au L.A.M.

Cette recherche a bénéficié d'un soutien du Ministère de l'Environnement

Références bibliographiques contenues dans l'article

- [1] Rosch, E. (1978), "Principles of Categorisation", in *Cognition and Categorization*, edited by E. Rosch, B.B. Lyod, (L.Erbaum, Hillsdale, (N.J.)), pp. 27-47.
- [2] Dubois, D., Fleury D., Mazet C., (1993), "Représentations catégorielles : perception et/ou action? Contribution à partir d'une analyse des situations routières" in A.Weill Fassina, P. Probardelet et D. Dubois, (Octares, Toulouse) pp 79-93.
- [3] Guyot F., (1996). "Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation", Thèse de Doctorat de l'Université du Maine,
- [4] Barthélemy, J. P., Guenoche, A. (1988), *Les arbres et les représentations des proximités*, Masson éd., Paris.
- [5] Castellengo M., (1994) *La perception auditive des sons musicaux*, in *Psychologie de la Musique*, édité par A. Zenatti, P.U.F.Paris, pp.55-87

Références bibliographiques complémentaires

- Castellengo M., Guyot F., Viollon S., (1996) *Perceptive characterisation of the acoustical quality of real complex sounds - Validation with synthesis*, Forum acusticum (Anvers), *Acustica/Acta Acustica* 82 Suppl.1, S78 .
- Guyot F., Castellengo M., Fabre B.,(1995) *Etude de la qualité sonore d'un corpus de sons complexes continus*, International Symposium on Musical Acoustics (Dourdan), actes édités par la SFA, pp. 582-588. ■

1996 b

me

Acoustique & Techniques

TRIMESTRIEL D'INFORMATION
DES PROFESSIONNELS DE L'ACOUSTIQUE

CONTROLE ACTIF DANS LES CONDUITS

**Le contrôle actif des pulsations
d'écoulement**

Jacky Tartarin, Jean-Laurent Peub...

**Contrôle actif à la source
du bruit d'un ventilateur
centrifuge**

Michel Besombes

**Silencieux actifs pour
réseaux de traitement
d'air**

Jean-François Nouvel et al.

**Une méthode d'étude
de la qualité acoustique
des sons réels complexes**

Frédérique Guyot et al.

Spécial dB'96 :

La parole est à...

René Gamba, Pdt du GIAC

**La mesure in situ
du coefficient d'absorption
des matériaux**

Philippe Guignouard

OCTOBRE 1996

Prix 100 F



PUBLICATION
Centre d'Information
et de Documentation
sur le Bruit

Sfa
société
française
d'acoustique
Avec le concours
de la Société Française
d'Acoustique

7
NUMERO