

**Qualification acoustique du typage sonore  
Application au typage sport**

**Rapport de stage de DEA ATIAM**  
(Paris VI, ENST, Aix-Marseille II, UJF Grenoble I)  
Mars-août 2003

# Sommaire

<u>TABLE DES FIGURES</u> .....	3
<u>TABLE DES TABLEAUX</u> .....	4
<u>REMERCIEMENTS</u> .....	5
<u>INTRODUCTION</u> .....	6
<u>CHAPITRE I. CONTEXTE</u> .....	7
<b><u>I. Perception et typage sonore</u></b> .....	<b>7</b>
1. Perception .....	7
2. Perception du bruit moteur : du typage sonore aux paramètres signaux .....	8
3. Conclusion et problématique .....	12
<b><u>II. Typage sport</u></b> .....	<b>14</b>
<u>CHAPITRE II. ETUDES THÉORIQUES</u> .....	15
<b><u>I. Rugosité</u></b> .....	<b>15</b>
1. Rugosité : recherches bibliographiques .....	15
2. Rugosité du bruit moteur .....	18
<b><u>II. Bourdonnement</u></b> .....	<b>25</b>
1. Production de la voix .....	26
2. Bourdonnement du bruit moteur .....	26
<u>CHAPITRE III. ETUDES PERCEPTIVES</u> .....	33
<b><u>I. Mise en place des tests perceptifs</u></b> .....	<b>33</b>
1. Déroulement des tests .....	33
2. Description des tâches .....	34
<b><u>II. Traitements des données</u></b> .....	<b>41</b>
1. Méthode générale de traitement des résultats des tests .....	41
2. Analyse du test +/-sport .....	45
3. Analyse du test sur la gêne .....	58
4. Analyse du test sur la rugosité .....	62
<u>CHAPITRE IV. DISCUSSION</u> .....	69
<b><u>I. Confrontation résultats/hypothèses</u></b> .....	<b>69</b>
<b><u>II. Remarques sur le processus expérimental</u></b> .....	<b>70</b>
<b><u>III. Conclusion et perspectives</u></b> .....	<b>70</b>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	72

## Table des figures

<a href="#"><u>figure 1 Principe du traitement des données issues du test de catégorisation (Richard, 2002)</u></a>	10
<a href="#"><u>figure 2 TF d'un signal de bruit moteur issu de XsaraVTS en montée de régime</u></a>	11
<a href="#"><u>figure 5 Phénomène de battements obtenus avec deux sinusoides de fréquences 500Hz et 525Hz</u></a>	16
<a href="#"><u>figure 6 classements d'échantillons sonores en fonction de la rugosité perçue et du paramètre Roughness</u></a>	19
<a href="#"><u>figure 7 Niveau des harmoniques H2, H4, H6 et H8 en fonction du régime</u></a>	25
<a href="#"><u>figure 8 centre de gravité spectrale des harmoniques H2, H4 et H6</u></a>	29
<a href="#"><u>figure 9 dendrogramme et courbe d'inertie obtenus par CAH sur les résultats du test +/- sport</u></a>	42
<a href="#"><u>figure10 projections et corrélations obtenues par ACP sur les résultats du test de gêne</u></a>	43
<a href="#"><u>Figure 11 méthode générale de traitement des résultats</u></a>	44
<a href="#"><u>figure 12 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test +/- sport</u></a>	46
<a href="#"><u>figure 13 corrélations et projections associées à la classe 1 du test +/- sport</u></a>	48
<a href="#"><u>figure 14 corrélations associées à la classe 2 du test +/- sport</u></a>	48
<a href="#"><u>figure 15 projections associées à la classe 2 du test +/- sport</u></a>	49
<a href="#"><u>figure 16 corrélations associées à la classe 3 du test +/- sport</u></a>	50
<a href="#"><u>figure 17 projections associées à la classe 3 du test +/- sport</u></a>	50
<a href="#"><u>figure 19 projections associées test +/- sport</u></a>	52
<a href="#"><u>figure 20 régression linéaire entre les notes de la classe 1 et les paramètres <math>SpecRoughH9_{15}</math> et <math>L_{H_2}</math></u></a>	54
<a href="#"><u>figure 21 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>sonie</math> et <math>L_{H_6}</math></u></a>	54
<a href="#"><u>figure 22 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>sonie</math></u></a>	55
<a href="#"><u>figure 23 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test hédonique</u></a>	56
<a href="#"><u>figure 24 régression linéaire entre les notes de la classe 1 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>L_{H_2}</math></u></a>	58
<a href="#"><u>figure 25 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>sonie</math></u></a>	58
<a href="#"><u>figure 26 corrélations associées au test de gêne</u></a>	59
<a href="#"><u>figure 27 projections associées au test de gêne</u></a>	59
<a href="#"><u>figure 28 notes moyennes par sons</u></a>	60
<a href="#"><u>figure 29 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>L_{H_2}</math> et <math>Sharp</math></u></a>	62
<a href="#"><u>figure 30 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test de rugosité</u></a>	63
<a href="#"><u>figure 31 corrélations associées au test de rugosité</u></a>	64
<a href="#"><u>figure 32 projections associées au test de rugosité</u></a>	65
<a href="#"><u>figure 33 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>dB_A</math></u></a>	67
<a href="#"><u>figure 34 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>dB_A</math></u></a>	67
<a href="#"><u>figure 35 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres <math>specRoughH9_{15}</math> et <math>L_{H_2}</math></u></a>	68

## Table des tableaux

<u>Tableau 1 caractéristiques techniques des voitures utilisées pour l'étude (Richard, 2002)</u>	9
<u>Tableau 2 Synthèse des classes de sons et de leurs principales caractéristiques (Richard, 2002)</u>	10
<u>Tableau 3 Partie harmonique/partie bruitée des échantillons sonores</u>	12
<u>Tableau 4 Calcul des rugosités partielles avec Specific Roughness</u>	21
<u>Tableau 5 classements du plus lisse au plus rugueux effectués par les deux groupes</u>	23
<u>Tableau 6 classement des échantillons sonores en fonction des écarts types fréquentiels</u>	23
<u>Tableau 7 pentes des variations fréquentielles de F1 en fonction du régime moteur</u>	30
<u>Tableau 8 (Harmoniques paires / H impaires) , (Harmonique 2 / Harmoniques globales) et (Harmoniques paires / Harmonique 2)</u>	31
<u>Tableau 9 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 3 classes du test +/- sport</u>	53
<u>Tableau 10 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 2 classes du test hédonique</u>	57
<u>Tableau 11 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes du test de gêne</u>	61
<u>Tableau 12 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 3 classes du test de rugosité</u>	66

## Remerciements

Je tiens à remercier Anne Bardot pour m'avoir permise d'effectuer ce stage dans le service Perception et Facteurs Humains dont elle est responsable.

Je remercie en outre Vincent Roussarie pour m'avoir guidée dans mes travaux, et salue vivement Florent Richard pour son aide précieuse.

Je remercie Lucille Dompnier pour ses conseils et son soutien.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble du personnel de PEFH pour l'accueil chaleureux réservé aux stagiaires du service.

## Introduction

Le service Perception et Facteurs Humains (PEFH) dépend de la Direction de la Recherche et de l'Innovation du groupe PSA PEUGEOT CITROËN. Sa mission est de contribuer à la prise en compte des facteurs humains dans la conception des produits du groupe pour aider à définir et concevoir le typage, le confort d'ambiance, les interactions homme-véhicule, la qualité.

C'est au sein de l'équipe Vibro-Acoustique, dirigée par Vincent Roussarie, que s'est déroulé mon stage. Ce stage s'intègre dans le cadre des études sur le typage moteur des véhicules. Il s'agit de mener des études perceptives et objectives afin de mieux spécifier les cibles sonores pour le pôle acoustique du groupe.

# Chapitre I. Contexte

## I. Perception et typage sonore

Le conducteur écoute et utilise le bruit de moteur dans nombres de ses manœuvres, que ce soit de manière consciente ou non, par exemple lors d'insertions sur voie rapide, de dépassements, de démarrages... Dès lors, il est amené à apprécier ce bruit. Avez-vous déjà fait l'expérience de conduire sans percevoir un seul son ?

Le bruit moteur participe à l'image de la voiture. Par exemple, une voiture très sportive ne doit pas, sous peine de décevoir le conducteur, être dotée d'un moteur très silencieux et peu nerveux, même si celui-ci a les performances requises. La maîtrise du son moteur est donc un atout fort intéressant pour le constructeur. Maîtriser le son moteur, c'est en connaître les principaux attributs perceptifs et lier ces attributs à des paramètres signaux quantifiables, eux-mêmes contrôlables par des modifications physiques du véhicule.

### *1. Perception*

L'étude de la perception sonore rend compte de l'efficacité du traitement effectué par l'oreille humaine qui, d'une part arrive, à saisir l'information pertinente malgré l'abondance des signaux qui lui parviennent, et d'autre part, peut saisir des finesses que la science ne peut même pas nommer. Le timbre est un exemple particulièrement parlant de la difficulté scientifique à décrire la perception. La définition même du timbre pose un problème. Helmholtz (1868) remarque justement que « jusqu'à présent, on était porté à attribuer au timbre, toutes les particularités des sons qui ne dérivait pas directement de leur intensité et de leur hauteur. Et l'on ne s'écartait pas de la vérité, tant que l'idée de timbre ne pouvait être définie que négativement. ». Pour cet auteur, quelques une de ses particularités dépendent des transitoires d'attaque et d'extinction, sans pour autant apporter une définition au timbre.

L'étude du phénomène de perception peut être abordée selon deux approches. Selon l'approche indirecte de la perception auditive, l'oreille constitue un analyseur qui traite l'information dans le signal acoustique afin d'en extraire l'information pertinente pour l'auditeur.

Au contraire, l'approche écologique de la perception tente de décrire le son en termes d'attributs sur la source (Gaver, 1993). Il s'agit d'une approche directe, dans laquelle on suppose que les processus cognitifs de catégorisation s'attachent à remarquer les invariants des sources sonores, porteurs de l'information. Ces invariants permettent à l'auditeur de reconnaître une source sonore en minimisant l'effort. Cette écoute "causale" précède l'écoute analytique. Elle est pratiquée quotidiennement par exemple lors de l'écoute de bruits (une voiture arrive derrière moi), de la

parole (je reconnais mon interlocuteur avant d'écouter son message), ou du timbre musical (j'écoute un solo de violon). En outre, le son émanant d'une source naturelle informe sur les changements d'état du mécanisme de la source. Cette approche est utilisée par Bruno H. Repp (1987) qui étudie le son produit lorsque l'on frappe dans ses mains. En effet, son objectif est d'appréhender les principes généraux sur les relations entre perception et production sonore. Il montre que chaque personne possède une signature dans l'action de frapper dans les mains, de la même manière que le timbre de la voix et que chaque claquement informe sur la position des mains.

Dans l'étude de la perception du bruit moteur dans l'habitacle, l'objet source est très complexe : les divers bruits de moteur associés aux bruits d'air et aux bruits de roulement forment l'image d'un bruit perçu dans l'habitacle d'une voiture qui roule. Aussi, sans étudier directement la source, il est possible de s'attacher à étudier les "types" de bruit moteur. Cette approche de typage est induite par la notion d' "objet auditif". (McAdams, 1997). Ce terme réfère à une représentation mentale d'un groupe d'éléments qui possèdent une cohérence dans leur comportement signal et qui sont ainsi interprétés comme provenant de la même source sonore. Ce processus de représentation permet non seulement le groupement d'éléments acoustiques en images sonores simples (une série de fréquences forme une note d'instrument), mais également le groupement de plusieurs sources sonores physiques en images auditives complexes. L'image mentale du bruit moteur dans l'habitacle est construite à partir d'un invariant commun à tous les sons produits par des bruits de moteurs, et correspond à un prototype personnel.

Dès lors, étudier la correspondance entre l'espace de perception et l'espace signal d'un "type de sons" (par exemple sons de parole, de percussions ou d'instruments à vent...) passe par une meilleure compréhension de l'image auditive correspondant à ce "type de sons". Dans notre étude, le "type de sons" étudié est le bruit moteur. Pour mieux le comprendre, il faut connaître les différents types de bruit moteur. Ainsi, l'étude du bruit moteur passe par l'étude du typage du bruit moteur.

Ce typage doit être le plus précis possible : une arborescence des types de bruit moteur doit permettre d'accéder à des images auditives précises et identifiables en terme signal.

## ***2. Perception du bruit moteur : du typage sonore aux paramètres signaux***

### **1- Typage**

Dans le cadre de l'étude sur le typage sonore, PEFH réalise en février 2002 un test de catégorisation libre sur des sons enregistrés dans l'habitacle de véhicules des segments M1 et M2 (voiture de taille Moyenne de type peugeot 307 pour M1 et peugeot 406 pour M2), équipés de moteurs 4 cylindres essence (Richard, 2002).

Le corpus sonore se compose de 21 sons de véhicules enregistrés avec un mannequin Head Acoustics, sur la piste drainante de la Ferté Vidame. Le mannequin est en position passager avant droit, sanglé et protégé par des tissus éponge afin d'éviter les frottements parasites avec le siège. Les sons présentés aux sujets sont des échantillons de 2 secondes, à partir de 3500 tr/min, d'une montée en régime pleine admission en 3<sup>ème</sup>.

Tous les sons sont calibrés à 104 dB.

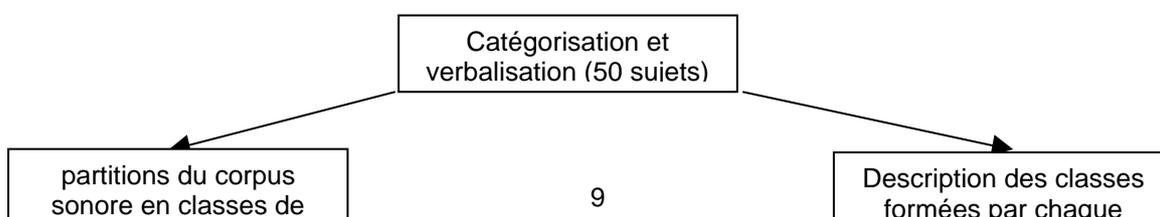
Les caractéristiques de 21 sons (disponibles en écoute) sont rassemblées dans le tableau suivant :

Voiture	Segment	ch (tr/min)	Poids (kg)	Poids/puiss.
V1	M1	120 (6200)	1200	10
V2	M1	150 (6300)	1245	8,3
V3	M2	155 (6400)	1240	8
V4	M2	118 (5500)	1357	11,5
V5	M1	103	?	?
V6	M2	125 (6000)	1340	10,7
V7	H	197 (5350)	1500	7,6
V8	M2	110 (5750)	1310	11,9
V9	M1	100 (5600)	1200	12
V10	M1	150 (5700)	1320	8,8
V11	M1	90 (5600)	1090	12,1
V12	M1	167 (6500)	1150	6,9
V13	M1	110 (5750)	1180	10,7
V14	M1	138 (6000)	1215	8,8
V15	M2	137 (6000)	1340	9,8
V16	M2	137 (6000)	1380	10,1
V17	M2	160 (5650)	1360	8,5
V18	H	160 (5650)	1460	9,1
V19	M1	135 (5500)	1150	8,5
V20	M1	167 (6500)	1185	7,1
V21	M2	143 (6000)	1370	9,6

*Tableau 1 caractéristiques techniques des voitures utilisées pour l'étude (Richard, 2002)*

Les sujets interrogés doivent former des groupes de sons qu'ils estiment proches et attribuer un commentaire à chaque groupe formé.

Le principe du traitement des données issues de test de catégorisation est résumé par le schéma suivant :



*figure 1 Principe du traitement des données issues du test de catégorisation (Richard, 2002)*

Ce test a permis de dégager des méta-classes de sons. Ces tendances se subdivisent pour former des sous-classes détaillées dans le tableau suivant :

Tendances (Méta-classes)	Classe de sons	Véhicules concernés	Vocabulaire spécifique associé
Aéro	Aéro	V10 V5 V17	Bruit d'air, souffle, bruyant
Sport	Sport-sifflant	V7 V6	Sportif, dynamique, sifflement, aigu
	Sport	V12 V20 V14	Dynamique, intense, rugueux, puissant
	Sport-clair	V11 V3	Clair, ronflement
Bourdonnant	Bourdonnant	V13 V1 V2	Résonnant, bourdonnant, sourd, BF
Puissant	Grave-ronronnant	V18 V4	Grave, sourd, ronronnant, silencieux, agréable
	Grave-moyen	V19 V21 V15	Sons assez graves, « moyens »
Feutré	Calme-feutré	V16 V8 V9	Calme, feutré, régulier, confort

*Tableau 2 Synthèse des classes de sons et de leurs principales caractéristiques (Richard, 2002)*

Ce test confirme l'intérêt de l'approche typage sonore.

Les principaux attributs sonores responsables de la catégorisation effectuée sont :

- le niveau sonore perçu
- l'aspect sourd-clair
- la présence du moteur/bruit d'air

Pour expliquer le typage de chaque véhicule, il faut explorer plus finement les caractéristiques perceptives des sons moteur. Ainsi, la mise en évidence de critères concernant le bourdonnement perçu et la rugosité perçue permettra de mieux qualifier la spécificité de chaque classe.

## 2- Caractéristiques signaux

La connaissance de l'espace perceptif nous incite à faire le lien avec l'espace des paramètres physiques.

L'étude spécifique des bruits moteurs doit être abordée à partir de la connaissance a priori du signal. Un tour de moteur provoque l'impulsion de deux cylindres. La périodicité de ces tours génère un signal harmonique de fondamental  $n/60$ , avec  $n$  le régime (nombre de tours par minute). Par ailleurs, les moteurs à 4 cylindres font fonctionner l'ensemble de leurs cylindres tous les deux tours, ce qui génère des harmoniques de fondamentale  $2n/60$  (les harmoniques paires). Enfin, les impulsions de chaque cylindre génèrent des harmoniques de fondamentale  $n/(2*60)$  qui sont les demies harmoniques. Notons que les partiels ainsi obtenus ne sont pas parfaitement harmoniques. La transformation temps-fréquence d'un bruit moteur (représentée ci-dessous) se compose de raies harmoniques. L'harmonique H2 est prépondérante. Sa fréquence est de 116Hz pour un régime à 3500tr/min.

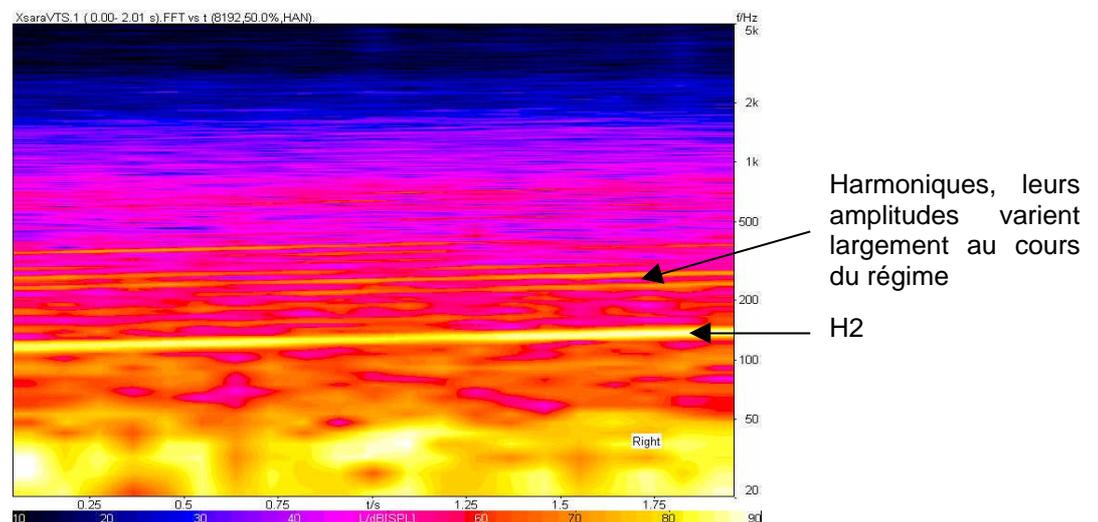


figure 2 TF d'un signal de bruit moteur issu de XsaraVTS en montée de régime

Le moteur génère du bruit en plus des composantes harmoniques.

Nous effectuons une série de mesures sur les sons utilisés pour le test de catégorisation avec Matlab et Artémis, logiciel développé par Head Acoustics et dédié à l'analyse spectrale de signaux multi-canaux.

Les paramètres signaux choisis sont fournis en annexe I. Il s'agit des niveaux moyens des harmoniques calculés avec Matlab et de paramètres psychacoustiques tel que Loudness, Sharpness et Roughness calculés avec Artémis.

Une première exploitation des paramètres calculés permet de distinguer les classes "sport" et "puissant" des classes "aéro" et "feutré".

L'analyse du rapport Signal Harmonique/partie bruitée est effectuée en utilisant le paramètre Loudness. Les classements en fonction de ce paramètre, mesuré sur les voies droite (1<sup>ère</sup> ligne) et gauche (3<sup>ème</sup> ligne) sont présentés dans le tableau suivant. Les voitures typées aéro et feutré sont surlignées en mauve, les voitures typées sport et puissant en orange.

Synt/noise(Loud)	Left	V16	V10	V4	V9	V17	V3	V6	V14	V8	V7	V5	V2
aéro-feutré		1,28	1,30	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,45	1,46	1,47	1,47	
sport-puissant	Right	V10	V16	V8	V6	V5	V9	V3	V21	V7	V17	V12	V1
		1,12	1,29	1,31	1,31	1,31	1,36	1,36	1,43	1,45	1,45	1,47	

Synt/noise(Loud)	Left	V19	V12	V18	V2	V11	V20	V1	V13	V15
aéro-feutré		1,52	1,52	1,57	1,58	1,59	1,66	1,79	1,94	2,02
sport-puissant	Right	V11	V14	V2	V18	V19	V20	V1	V15	V13
		1,49	1,49	1,55	1,56	1,58	1,59	1,65	1,78	1,79

Tableau 3 Partie harmonique/partie bruitée des échantillons sonores

On vérifie que les voitures sportives et puissantes (hormis V3 et la V15 qui se trouvent au milieu de l'espace de catégorisation ; et V7 dont la caractéristique de sifflement laisse penser qu'une partie de sa spécificité se trouve dans la partie bruitée) se retrouvent en tête de classement (par ordre croissant). Seule la V4 et la V14 se trouvent mal classée pour la voix de gauche.

Même si les paramètres calculés ne permettent pas de prévoir le typage, les classes "sport" et "puissant" sont distinguées des classes "aéro" et "feutré". Ainsi, il est possible de se concentrer sur l'étude des classes sport et puissant, l'objectif étant d'apporter des caractéristiques signal sur le typage sport.

### 3. Conclusion et problématique

Cette étude nous apporte une bonne compréhension du typage du point de vue perceptif. Mais, les critères signaux existants sont insuffisants pour le décrire.

L'objectif du stage est de saisir les paramètres signaux saillants pour le typage en se concentrant sur la classe sport. Pour cela, il faut approfondir la connaissance perceptive de cette classe. Cela passe par une étude de la rugosité et du bourdonnement, attributs perceptifs influents pour cette classe.

Notre étude s'effectuera à partir de la base de sons présentées dans le test de catégorisation.

## II. Typage sport

L'étude spécifique du typage sport présente un fort intérêt stratégique pour le groupe. En effet, les conducteurs de voitures sportives sont particulièrement attentifs au bruit moteur.

Il s'agit de mieux comprendre la notion de typage sport au niveau perceptif et de lui associer des paramètres acoustiques quantifiables. Ces paramètres doivent en outre correspondre à des solutions techniques réalisables. Alors, un cahier des charges acoustique pourra efficacement contrôler la sportivité (voir le type de sportivité) d'une voiture.

Nous ne présentons pas les études antérieures et les outils dont nous disposons pour aborder l'étude pour des raisons de confidentialité.

Ces études nous montrent que le typage sport doit être envisagée comme l'étude des différentes perceptions de sportivité. Rugosité et bourdonnement sont des attributs primordiaux dans la perception du typage sport. Par ailleurs, il faut être vigilant face au problème du vocabulaire : il n'y a pas de bijection entre un mot et un attribut perceptif.

Les prochains chapitres seront donc consacrés à l'étude spécifique de la rugosité, puis à celle du bourdonnement.

## Chapitre II. Etudes théoriques

### I. Rugosité

Nous étudierons le phénomène perceptif de rugosité dans sa généralité, avant d'aborder la rugosité du bruit moteur.

#### 1. *Rugosité : recherches bibliographiques*

L'écoute de certains sons, comme par exemple celui produit par deux touches consécutives d'un piano, produit une sensation particulière nommée rugosité. L'origine de ce percept de rugosité provient des travaux de Helmholtz (1877) sur la perception auditive. La question alors posée est : quelle sensation produisent deux sons purs joués simultanément ? Grâce à son dispositif de double sirène, Helmholtz peut justement produire deux sons purs à des fréquences variables. Il dégage alors trois zones perceptives en fonction de l'écart fréquentiel de ces deux sons.

Dans la première zone, l'écart fréquentiel est faible et l'auditeur perçoit un son pur modulé en amplitude. Il s'agit du phénomène de battement, entendu pour un écart fréquentiel allant jusqu'à 4 à 6 Hz. En augmentant l'écart fréquentiel, les battements accélèrent et n'apparaissent plus aussi clairement. Helmholtz affirme que l'auditeur continue malgré tout, à avoir *conscience* de ces battements. Ce phénomène est désigné alors par le terme *rauhtig* signifiant rauque et pourtant traduit par « rugueux ». L'augmentation de l'écart fréquentiel se traduit par une diminution de la rugosité qui disparaît pour un écart fréquentiel de 90 Hz (pour cet auteur). Ainsi est mis en évidence le phénomène de rugosité.

La rugosité qualifie une sensation auditive. Mais est-elle pour autant un attribut élémentaire de la perception du timbre ? Les études multidimensionnelles, permettant de dégager des qualificatifs caractéristiques du timbre, comme celle de Grey (1977) et celle de Mc-Adams (1995), n'ont pas du tout mis en évidence un terme approchant. Rappelons qu'il s'agissait d'études concernant le son des instruments dans lesquelles une seule note était jouée. Les sons écoutés ne présentaient donc que peu de rugosité. En étudiant des sons de l'environnement, Björk (1985, cité par Pressnitzer) a mis en évidence un facteur principal regroupant les termes « tendu », « pressant », « déplaisant » corrélés avec une estimation de rugosité. D'autre part, des études sur la consonance/dissonance de deux sons musicaux ont également été réalisées (Schellenberg et Tainor, 1996, cité par Pressnitzer). Il apparaît alors que l'auditeur regroupe dans une même classe les sons consonants en écartant ainsi les sons dissonants qui sont jugés par leur caractère rugueux. Mais, l'habitude musicale est de séparer les sons consonants des sons dissonants. Des expériences similaires réalisées avec des oiseaux infirment l'argument social opposé aux premières expériences (Hulse,

Takeuchi et Braaten, 1992, cité par Pressnitzer). Ainsi, la rugosité semble bien être une dimension naturelle de la perception auditive.

Quels sont les mécanismes physiologiques mis en jeu dans la perception de la rugosité ? Le système auditif effectue au niveau de la cochlée un double codage : fréquentiel et temporel. La dépendance fréquentielle du lieu du maximum de l'onde propagée dans la membrane basilaire permet le codage fréquentiel (tonotopique). Les cellules ciliées disposées le long de la membrane basilaire envoyant des impulsions électrochimiques par volée en fonction des vibrations mécaniques perçues caractérisent l'évolution temporelle du son. Ce double codage influence largement la hauteur perçue (hauteur tonale ou hauteur spectrale), qu'en est-il de la rugosité ?

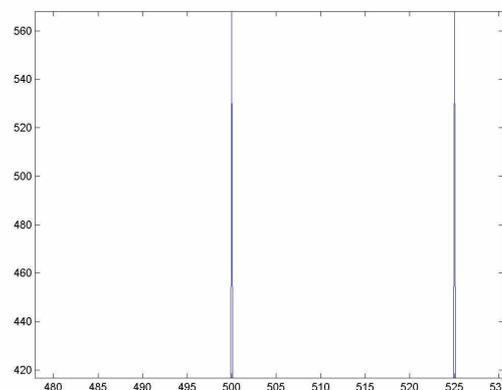
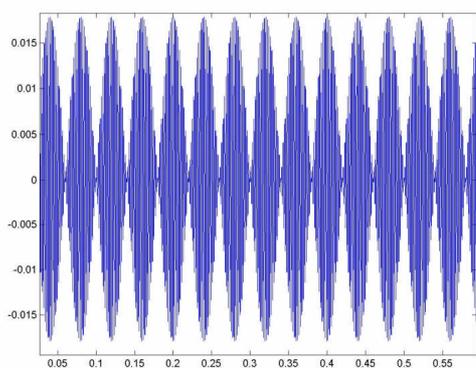
L'étude complexe de la rugosité exige de se limiter en première approche à des sons simples. Considérons le signal formé de deux sinusoïdes de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  :

$$Dy(t) = \cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)$$

Ce signal peut s'écrire en posant  $D_f = f_1 - f_2$  et  $f_{\text{moy}} = \frac{f_1 + f_2}{2}$  :

$$Dy(t) = 2|\cos(2\pi D_f t)| \cos(2\pi f_{\text{moy}} t)$$

Ce signal présente des battements à la fréquence  $D_f$ .



*figure 5 Phénomène de battements obtenus avec deux sinusoïdes de fréquences 500Hz et 525Hz*

Des études perceptives montrent que la rugosité perçue lors de l'écoute de deux sons purs dépend de leur écart fréquentiel  $D_f$  et du registre  $f_{\text{moy}}$ . Cette dépendance est directement liée à la largeur des bandes critiques, correspondant au filtrage auditif réalisé par la membrane basilaire. La rugosité disparaît pour un écart fréquentiel  $D_f$  supérieur à la largeur de la bande critique, qui croît par ailleurs avec la fréquence, et le maximum de rugosité est atteint pour  $D_f$  égal à un certain pourcentage de la largeur de bande critique. Cette approche décrit la rugosité en termes de proximité fréquentielle de partiels d'un son.

Une autre approche décrit le phénomène de rugosité en considérant les battements observés dans le temps. Considérons pour cette étude un son pur modulé sinusoïdalement en amplitude (SAM).

$$SAM(t) = (1 + m \cos(2 f_m t)) \cos(2 f_c t)$$

Les paramètres d'un signal SAM sont la fréquence centrale  $f_c$ , la fréquence de modulation  $f_m$  et la profondeur de modulation  $m$ . Il apparaît que la sensation de rugosité s'accroît quand la profondeur de modulation  $m$  croît. D'autre part, à  $m$  fixé, elle augmente avec la fréquence moyenne  $f_m$ , puis disparaît pour une fréquence dépendant de la largeur de bande critique correspondante. Enfin, lorsque la fréquence centrale  $f_c$  croît jusqu'à 2 kHz, le maximum de rugosité est atteint pour des fréquences  $f_m$  croissantes car la largeur de bande critique augmente ; en revanche au dessus de 2 kHz, la fréquence  $f_m$  produisant le maximum de rugosité reste constante et égale à 80 Hz. Pour ces hautes fréquences, ce n'est plus la bande critique qui est limitante mais la rapidité de décharges des cellules cillées responsables du codage temporel. Notons que le maximum de rugosité qu'il est possible d'obtenir pour des sons SAM est déterminé comme correspondant à  $f_c = 1\text{kHz}$ ,  $m = 1$  et  $f_m = 70\text{Hz}$ . La rugosité correspondante est choisie comme étant égale à 1 sur un échelle de mesure appelée asper.

Ainsi, dans le cadre de l'approche temporelle, la rugosité peut être prédite à partir de l'enveloppe temporelle des signaux issus de chaque filtre auditif.

Pour comparer les approches spectrales et temporelles, il semble primordial de s'intéresser aux effets de la phase. En ce sens, Terhardt (1947, cité par Pressnitzer) a comparé la rugosité des sons SAM et FM. Rappelons l'expression générale d'un son FM (modulé en fréquence) :

$$FM(t) = \sin \left( 2 f_c t + \frac{f}{f_m} \sin(2 f_m t + \phi) \right)$$

L'index de modulation  $\beta = \frac{f}{f_m}$  est le rapport entre l'écart fréquentiel  $f$  couvert par la modulation et la fréquence de modulation  $f_m$ . Le développement en série de Taylor d'un son FM pour  $\beta$  faible montre qu'un son SAM avoisine un son FM à une différence de phase près : la phase de la bande latérale grave est décalée de  $\beta$  radians pour le son FM. L'étude de la rugosité de ces deux signaux permet donc une première constatation sur l'effet de la phase. Il s'avère que le son FM est moins rugueux que le son SAM si la fréquence de modulation  $f_m$  est inférieure à 80Hz. Ainsi la phase influence la rugosité perçue, donnant plus d'importance à l'approche temporelle.

A partir de ces considérations sur des sons très simples, comment généraliser aux sons complexes ? Le problème principal est que d'un son simple à un son complexe, l'étendue spectrale s'élargit considérablement. On passe ainsi de l'étude de la rugosité obtenue à l'intérieur d'une bande critique à la rugosité issue d'une combinaison complexe de bandes critiques. Faut-il simplement additionner les effets de chaque bande critique ?

Les expériences réalisées sur ce sujet sont nombreuses et contradictoires. Retenons que lors de l'addition de deux sons SAM dans les conditions co-phases, l'ajout des rugosités correspondantes à chaque région fréquentielle augmente la rugosité générale du son, alors que dans les conditions anti-phases, cela ne la modifie pas. Par ailleurs, l'ajout des rugosités partielles de bruits filtrés diminue la rugosité globale ! En fait, il semble que la cohérence des enveloppes temporelles entre les bandes critiques soit à l'origine de ces phénomènes. L'exemple d'un son rugueux émis dans une pièce réverbérante est caractéristique : la rugosité perçue est moindre, du fait de la modification des phases et des amplitudes des composantes spectrales des sons réverbérés (Terhardt, 1974).

A partir de ces considérations générales, comment obtenir un modèle efficace de rugosité permettant de quantifier la rugosité des signaux qui nous intéressent ? Présentons le principe du modèle défini par Aures (1985) et amélioré par Daniel et Weber (1997, cité par Pressnitzer). La première étape consiste à décomposer le signal en bandes critiques à l'aide d'un banc de filtre. Le filtrage réalisé est non linéaire : comme le signal propagé le long de la membrane basilaire s'élargit avec le niveau, il doit dépendre de l'amplitude. De chaque signal ainsi obtenu est extrait ensuite l'enveloppe temporelle à partir de laquelle on calcule la rugosité en fonction de la profondeur de modulation et de la fréquence centrale. Enfin, la rugosité globale est obtenue par addition des rugosités partielles pondérées par un coefficient d'intercorrélation avec la bande critique voisine. Cette dernière étape reflète le parti pris des auteurs concernant la contribution des rugosités partielles. Malgré l'utilisation de quelques paramètres arbitraires (la valeur des coefficients de pondération et la forme des filtres), ce modèle fonctionne bien : son principe semble globalement pertinent. Seule la dernière étape peut être contestée : la contribution des rugosités partielles est encore mal connue.

## ***2. Rugosité du bruit moteur***

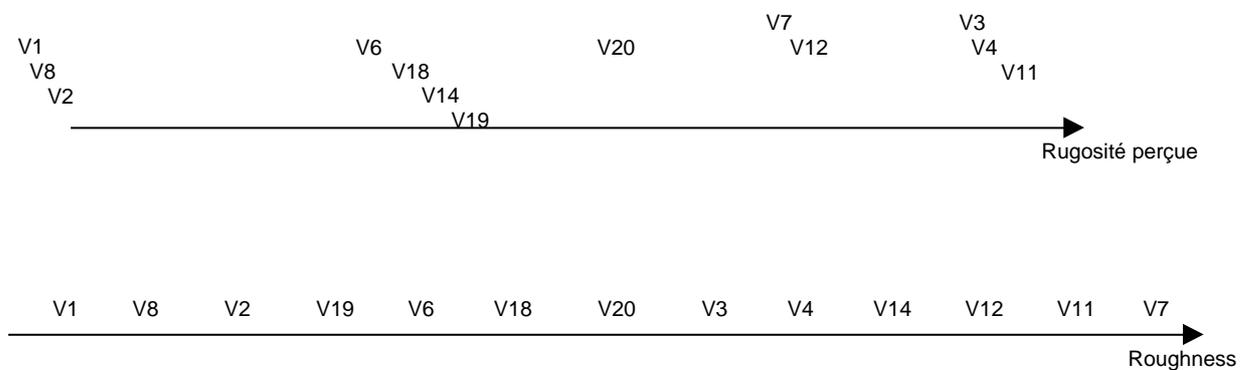
Une étude sur la rugosité du bruit GMP a été réalisée en 1998 par Nicolas Leclere (1998). Le bruit moteur et sa rugosité y sont abordés sous leur aspect harmonique. Les fréquences moyennes du spectre du bruit GMP (de 250 à 1000 Hz) correspondent à des bandes critiques de l'ordre de 100 à 160Hz. Or la rugosité maximale est obtenue pour un certain pourcentage de la largeur de bande critique. Les écarts fréquentiels du spectre provoquant alors le maximum de rugosité varient de 25 à 40Hz. Par conséquent les régimes moteurs concernés varient de 50 à 80 Hz, soit 3000 à 4800 tours/min, ce qui correspond à des situations réalistes et justifie la perception de rugosité du bruit de moteur. Comment alors maîtriser cette rugosité dans la coloration du bruit moteur ?

A l'aide de tests sensoriels, l'étude montre que le modèle de rugosité d'Aures est bien corrélé à la sensation de rugosité perçue dans le son GMP. Par ailleurs, l'étude met en évidence des

paramètres du signal corrélés à la rugosité : le niveau et la décroissance des harmoniques. L'influence du bourdonnement sur la perception de rugosité reste mal comprise.

Des études sensorielles ultérieures sur le typage sonore nuancent ces résultats. D'une part, la rugosité elle-même semble mal définie : plusieurs sensations se regroupent sous ce terme. D'autre part, le modèle d'Aures, bien que relativement efficace pour l'étude de sons synthétiques reste peu performant face aux bruits moteurs, plus complexes. En s'appuyant sur la connaissance a priori du signal qui nous intéresse, Martner, Zerbs et Feng (2002) ont développé un modèle de rugosité plus adapté. Le signal du bruit moteur a la particularité d'être composé de nombreux partiels évoluant avec le régime. Le modèle proposé consiste à réaliser le filtrage par un banc de filtre non pas à fréquences centrales fixes, mais à fréquences centrales évoluant avec le régime moteur :  $f_{m,k} = k.n/60$  Hz où  $n$  correspond au régime moteur en tours/min. L'hypothèse sous jacente est que le système auditif s'adapte aux variations des pics. Cette démarche permet d'éviter les cas où deux pics fréquentiellement proches sont séparés par le banc de filtre parce qu'éloignés tous les deux de la fréquence centrale de leur filtre respectif. D'autre part, la contribution des rugosités partielles de sons complexes est mal connue. Il semble plus prudent de s'arrêter au calcul des rugosités partielles au lieu de conclure trop hâtivement.

La première analyse effectuée consiste à classer quelques échantillons sonores de l'espace de catégorisation en fonction de la rugosité perçue (jugement personnel) et du paramètre Roughness calculé avec Artémis selon le modèle d'Aurès et moyenné temporellement.



*figure 6 classements d'échantillons sonores en fonction de la rugosité perçue et du paramètre Roughness*

Ce dernier classement n'est pas sans lien avec le jugement subjectif. Mais il semble difficile de juger de la rugosité sur une variation de régime : celle-ci évolue avec le temps. D'autre part, la sensation de rugosité perçue à l'écoute de V20 semble différente, car plus aiguë, plus métallique, que celle perçue à l'écoute V4 par exemple.

Notre travail sur la rugosité doit se recentrer sur deux points principaux :

- La rugosité décrit-elle une ou plusieurs sensations auditives ? L'écoute d'échantillons sonores tels que V4 et V20 provoque de fortes sensations de rugosité. Mais ces sensations sont très différentes. Est-il alors possible de comparer la rugosité de ces deux sons ?

- Le calcul de la rugosité perçue, jusqu'alors effectué avec Artémis en s'inspirant du modèle d'Aurès (paramètre Roughness), n'est pas fiable étant donné la méconnaissance scientifique sur l'effet du cumul de rugosités partielles. Il semble plus judicieux d'utiliser le paramètre Specific Roughness d'Artémis qui calcule les rugosités obtenues au niveau de chaque bande critique.

L'utilisation de jMax nous a montré que les harmoniques H3.5 H4 H4.5 sont principalement responsables de la sensation de roucoulement perçue à l'écoute de V4 ; les harmoniques d'ordre supérieur à 9 génèrent une partie du caractère râpeux perçue à l'écoute de V20. Le paramètre Specific Roughness nous confirme les observations jMax : V20 présente de forts coefficients pour les bandes de fréquence allant de 840 Hz à 1170Hz et correspondants aux harmoniques H9-H15 à 4000tr/min, contrairement à V4 qui a de forts coefficients pour les bandes 250 et 570 Hz (harmoniques 4 et 8 à 4000tr/min).

		V4	V20
Rough50	Left	0,116	0,114
	Right	0,129	0,117
Rough150	Left	0,104	0,041
	Right	0,122	0,062
Rough250	Left	0,134	0,111
	Right	0,146	0,161
} Correspond à H4 pour 4000 tr/min			
Rough350	Left	0,113	0,147
	Right	0,129	0,146
Rough450	Left	0,137	0,143
	Right	0,161	0,110
Rough570	Left	0,203	0,155
	Right	0,157	0,177
} Correspond à H8 pour 4000 tr/min			
Rough700	Left	0,152	0,169
	Right	0,147	0,207
Rough840	Left	0,124	0,182
	Right	0,160	0,198
Rough1000	Left	0,140	0,193
	Right	0,149	0,192
} BF 840-1170Hz correspondant au harmoniques H9-H15 à 4000 tr/min			
Rough1170	Left	0,143	0,177
	Right	0,154	0,170
Rough1370	Left	0,128	0,129
	Right	0,126	0,155
Rough1600	Left	0,113	0,116

	Right	0,111	0,124
Rough1850	Left	0,086	0,067
	Right	0,079	0,087
Rough2150	Left	0,026	0,024
	Right	0,032	0,043
Rough2500	Left	0,001	0,000
	Right	0,012	0,030
Rough2900	Left	0,000	0,000
	Right	0,008	0,000
Rough3400	Left	0,000	0,000
	Right	0,000	0,000
Rough4000	Left	0,000	0,000
	Right	0,000	0,000

*Tableau 4 Calcul des rugosités partielles avec Specific Roughness*

En outre, une expérience a été réalisée en janvier 2003 par Vincent Roussarie avec des étudiants de l'UTC. Deux groupes de 19 sujets doivent juger du caractère lisse/rugueux d'échantillons sonores en les classant selon une échelle d'intervalle composée de huit niveaux. Les échantillons sonores sont resynthétisés sous jMax à partir d'enregistrements de V16, de V11 et de V20, au régime de 4000tr/min. Les sons utilisés pour juger la rugosité sont resynthétisés en modifiant les amplitudes des harmoniques H3.5, H4 et H4.5 (surnommées hd).

Cette expérience met en évidence deux groupes de juges dont voici les résultats moyens :

lisse-rugueux	
V16r_hd+10	1,86
V16_ori	2,71
V16_hd+15	2,71
V16_hd+20	2,71
V11_hd+10	4,00
V11_ori	4,14
V20_hd+10	4,57
V11_hd+15	4,57
V20_hd+15	5,14
V11_sshd	5,43
V20_sshd	5,71
V20_ori	6,86
V16_ori	1,58
V16_hd+10	1,67
V11_sshd	2,92
V11_ori	3,31
V16_hd+15	3,64
V20_ori	4,42
V20_sshd	4,94
V11_hd+10	5,36
V20_hd+10	5,58
V16_hd+20	6,75
V11_hd+15	6,86
V20_hd+15	7,25

groupe 1 :

groupe 2 :

*Tableau 5 classements du plus lisse au plus rugueux effectués par les deux groupes*

Le premier groupe perçoit une forte rugosité à l'écoute de bruits moteur dépourvus d'harmoniques H3.5 H4 H4.5. Ils écoutent donc un phénomène large bande. Au contraire, le deuxième groupe juge un son d'autant plus rugueux que l'amplitude des harmoniques H3.5 H4 et H4.5 est élevée. Par conséquent, le terme rugosité ne renvoie pas au même phénomène perceptif selon les auditeurs.

Par ailleurs, les partiels du son moteur ne sont pas parfaitement harmoniques. Les variations fréquentielles sont responsables d'une dissonance qui augmente l'impression globale de rugosité. L'idée est alors venue de quantifier les écarts fréquentiels des sons étudiés.

delta freq/freq	Left	V13	V8	V4	V15	V21	V1	V16	V2	V7	V18	V9
		V20	V11	V12	V17	V5	V10	V3	V14	V6	V19	

*Tableau 6 classement des échantillons sonores en fonction des écarts types fréquentiels*

Le classement des enregistrements des voitures en fonction des écart types fréquentiels obtenu en analysant les voies de gauche fait apparaître deux groupes : un groupe dont le paramètre est plutôt bas contient les voitures appartenant à la partie droite de l'espace des timbres (puissantes et feutrées en jaune), l'autre groupe contenant les voitures de la partie gauche de l'espace des timbres (les sportives et les aéros en vert). Une seule voiture : V7 se trouve dans le mauvais groupe. Mais il faut rappeler que sa principale caractéristique (le sifflement) est probablement contenue dans la partie bruitée.

Cette observation peut nous aider à mieux comprendre la sensation de rugosité perçue à l'écoute de certains bruits moteurs. Il est en effet possible que cette variation fréquentielle de pseudo-harmoniques soit responsable d'une forte dissonance. L'écoute des parties harmoniques des échantillons et leur comparaison avec ces résultats est effectuée. Le roucoulement de V4 est peut-être effectivement plus doux, bien que très présent, que celui de V3. Cette approche demande à être approfondie.

En conclusion, comparer la rugosité de ces deux voitures d'un point de vue subjectif ou d'un point de vue signal en utilisant Roughness sur Artémis n'est pas pertinent puisque plusieurs sensations se regroupent sous le terme rugosité et des paramètres différents sont moyennés dans Roughness. C'est en tous cas l'hypothèse faite après observations

subjectives et signal des sons moteurs. Nous proposons alors de décomposer l'attribut rugosité en deux sensations perceptives : le roucoulement engendré par les harmoniques H3.5 H4 H4.5 et le caractère râpeux issu des harmoniques H9-H15. La réalisation d'un test perceptif nous permettra de valider ou d'infirmer cette hypothèse. Par ailleurs, les hypothèses énoncées pourraient nous aider à mieux comprendre l'influence du bourdonnement sur la rugosité.

## II. Bourdonnement

La perception du bruit du moteur dans l'habitacle d'une voiture est difficilement descriptible étant donnée la complexité et la variabilité temporelle d'un tel signal. Cependant, l'auditeur dégage un attribut perceptif principal : le bourdonnement. Cette sensation est perçue de manière très différente selon les voitures et semble être un facteur important du typage sport. Il s'agit de la "voyelle" que les panélistes appellent TYPON ou TYPAN dans les expériences d'analyse sensorielle. C'est le 'hhonnnannn' que l'on chante traditionnellement pour imiter le son d'une voiture. Le bourdonnement se rapproche donc des voyelles nasales produites par l'homme. Par conséquent, son étude conduit naturellement à le comparer avec les signaux de parole.

Par ailleurs, le bourdonnement recouvre une autre sensation auditive lorsqu'il s'intensifie : il devient bosse de bourdonnement et correspond à une résonance. Avant d'étudier le bourdonnement en général, tentons de comprendre ce passage du formantique au résonant. Pour cela, remarquons que l'important niveau de l'harmonique H2 est largement responsable de la sensation de résonance perçue par exemple, à l'écoute de V13.

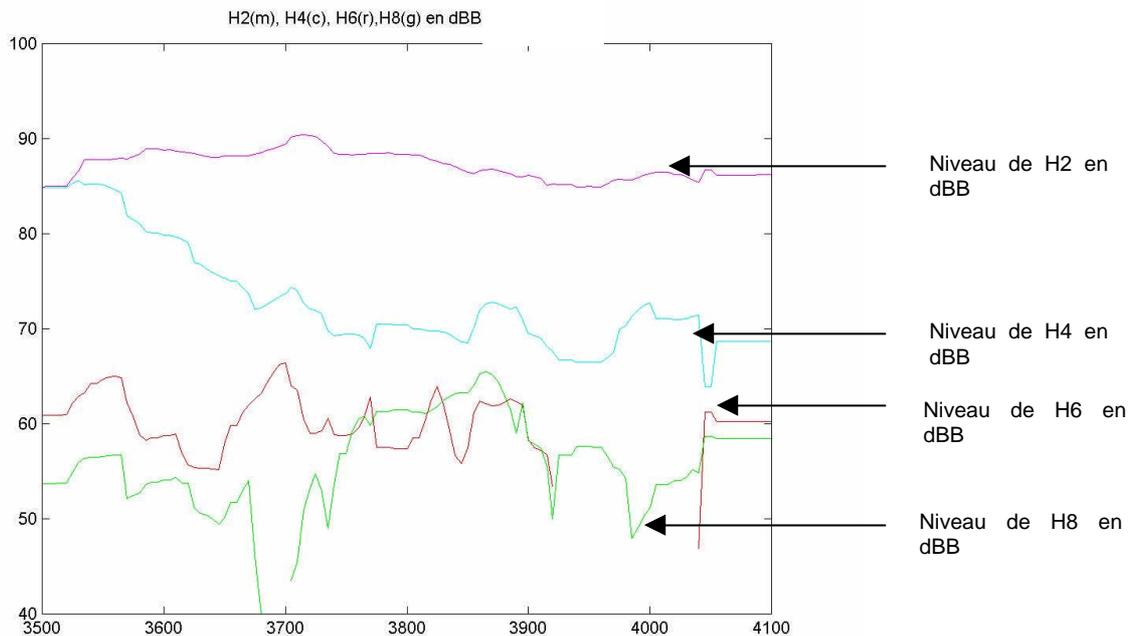


figure 7 Niveau des harmoniques H2, H4, H6 et H8 en fonction du régime

La modification du niveau de l'harmonique H2 avec jMax permet le passage brusque du formantique au résonant inspirant l'hypothèse de l'existence d'un seuil de bosse de bourdonnement, que l'on estime à 88dBB en écoutant et observant le niveau de H2 correspondant, pour V13. La réalisation d'un test perceptif doit nous éclairer sur ce point.

Avant de comparer les signaux de bruit moteur aux signaux de parole, nous allons rappeler le mécanisme de production de la voix.

### **1. Production de la voix**

Les poumons compressent de l'air qui est envoyé au larynx à travers la trachée. Le larynx produit alors un signal d'excitation qui se propage dans le conduit vocal. Ce conduit, composé de la bouche, la langue, les lèvres, les narines, est de forme et de volume variables. C'est la déformation du conduit vocal qui produit les articulations de la voix.

Le signal d'excitation peut être de trois types :

- les voyelles sont produites par des signaux d'excitation périodiques. Les cordes vocales constituées par un muscle fendu peuvent entrer en vibration sous l'effet de la pression en amont et fournir ainsi un signal acoustique triangulaire riche en harmoniques d'une fréquence fondamentale. Celle-ci varie de 80 à 250 Hz pour les hommes et 180 à 300 Hz pour les femmes.
- Les consonnes fricatives (v, z, f, s) sont produites par des signaux bruités créés par des turbulences d'air obtenues au niveau de certains rétrécissements du conduit vocal.
- Les consonnes occlusives (p, t, g, d) sont produites par un signal d'excitation en échelon généré par une brusque ouverture.

Le signal d'excitation peut être modélisé soit par une source d'impulsions périodiques (pour la production des voyelles), soit par une source de bruit blanc (pour la production des consonnes).

Le conduit vocal peut être modélisé par un filtre qui varie en fonction du temps. Ce filtre est composé de plusieurs résonances (formants).

La production de la voix peut donc être représentée par un modèle source-filtre correspondant au signal d'excitation et au conduit vocal. Dès lors, la structure fine du spectre est contrôlée par la source et l'enveloppe spectrale est contrôlée par le filtre. Celui-ci est appelé filtre formantique et comporte généralement deux résonances : les deux premiers formants suffisent à caractériser une voyelle.

### **2. Bourdonnement du bruit moteur**

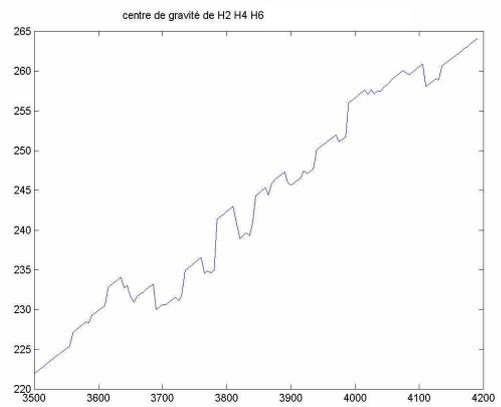
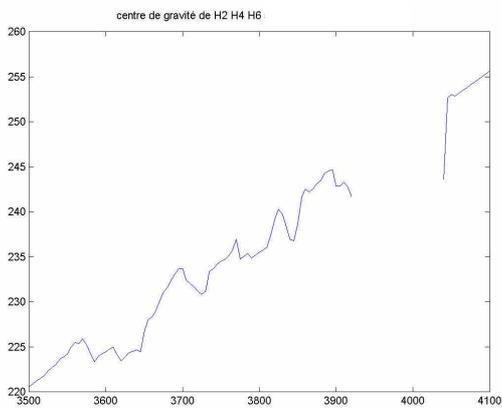
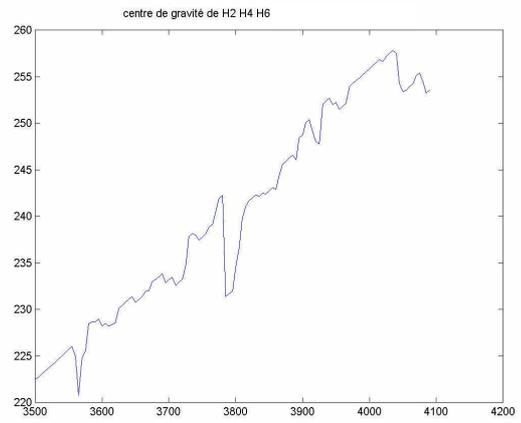
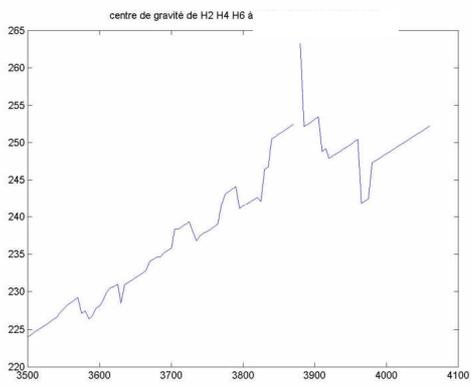
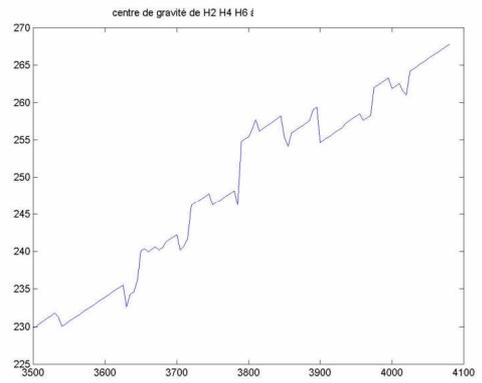
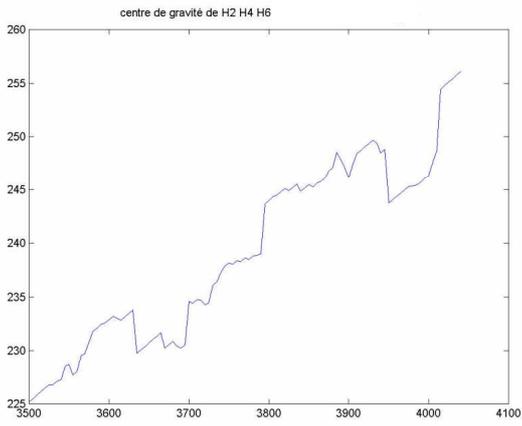
A présent, nous faisons l'hypothèse qu'une partie du signal du bruit moteur est comparable à des voyelles nasales : "on" et "an". L'enregistrement de ces voyelles et leur analyse harmonique montrent que les signaux résultants présentent un premier formant à 230 Hz et à 750 Hz, respectivement pour "on" et "an". Une routine Matlab est utilisée pour synthétiser ce type de signaux. Il s'agit d'un programme de synthèse de type source filtre. On vérifie que le premier formant suffit à synthétiser ces voyelles et que l'augmentation de la fréquence du premier formant à partir de 230 Hz produit des sons de plus en plus proches de la voyelle "an" (*exemples sonores*

avec un premier formant à 230Hz ; 260Hz ). Une deuxième routine Matlab permet de synthétiser des voyelles dont le pitch et le premier formant varient temporellement par la technique OverLap Add. L'idée est alors de modéliser la partie harmonique du bruit moteur lors d'une montée de régime par un pitch et un formant variables, de synthétiser un tel signal à l'aide de la routine Matlab, et d'analyser l'effet perçu. Les routine Matlab sont disponibles en annexe II.

Une première modélisation formantique d'un spectre de bruit moteur consiste à considérer la fréquence de l'harmonique H0.5 comme pitch et la fréquence de l'harmonique H2 comme premier formant, étant donné l'amplitude de cette harmonique généralement supérieure aux autres. Pour une montée de régime entre 3500 et 4000 tr/min, la fréquence de H0.5 varie entre 29 et 33 Hz, et celle de H2 entre 117 et 133 Hz. Le signal correspondant est éloigné du ressenti propre au bruit moteur. Le pitch est bien plus grave que celui observé dans les signaux de parole. La voyelle émise par le moteur doit, pour être perçue, présenter un pitch comparable à ceux rencontrés en parole. Par ailleurs, la fréquence de premier formant reste trop grave pour que l'on puisse comparer la voyelle perçue à un "on-an".

L'écoute attentive des échantillons de bruit moteur "sport" et "puissant" du test de catégorisation montre que certains enregistrements de voitures comme V4 et V11 présentent peu de bourdonnement, au sens formantique. L'observation signal des échantillons effectuée indique que, contrairement aux autres voitures, celles-ci ont des niveaux d'harmoniques paires proches des niveaux des autres harmoniques. Les harmoniques paires semblent donc jouer un rôle primordial dans la perception du bourdonnement. L'écoute des seules harmoniques paires du signal moteur sous jMax confirme leur rôle primordial dans la perception du bourdonnement. Par ailleurs, la modification des niveaux des harmoniques H2, H4 et H6 suffit à modifier largement le phonème perçu : on entend plutôt un 'on' quand la H2 est plus importante que les deux autres, et plutôt un 'an' dans le cas contraire.

Ces considérations nous incitent à proposer un nouveau modèle formantique : la fréquence de H2 correspond au pitch, et le centre de gravité spectral de H2, H4 et H6 correspond au premier formant (F1). Entre 3500 et 4000 tr/min, la fréquence du pitch choisie varie dans des zones correspondantes aux pitches observés en parole. D'autre part le centre de gravité spectrale des harmoniques H2, H4 et H6 des voies de droite d'enregistrements de certaines voitures sport et puissantes (V1, V4, V11, V12, V14, V13, V18, V20) est calculé en fonction du régime moteur : ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par analyse de voyelles.



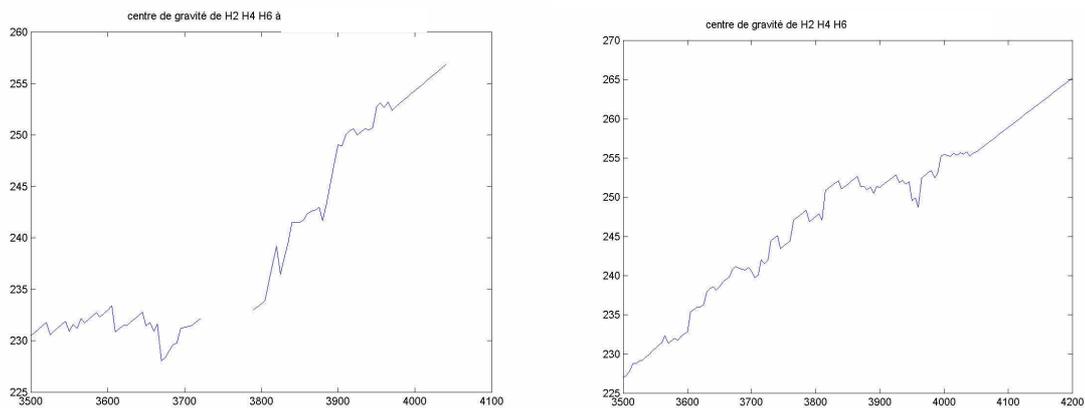


figure 8 centre de gravité spectrale des harmoniques H2, H4 et H6

Certaines courbes sont incomplètes aux régimes où l'une des harmoniques concernées par le calcul n'est pas reconnue lors de l'analyse du signal. D'autre part, les niveaux des harmoniques varient très rapidement en fonction du régime et s'annulent parfois, ce qui entraîne les ruptures de pente observées dans les figures.

Les routines Matlab sont mises à profit pour synthétiser les voyelles correspondant à ces différentes variations (*exemples sonores*). L'écoute de ces sons de synthèse est fort instructif : les reconstitutions du bourdonnement de V20, V12 et V14 présentent un net changement de voyelle contrairement aux autres voitures. Cette variation dans le bourdonnement est tout autant perçue à l'écoute des échantillons sonores réels. En conséquence, le modèle formantique choisi paraît pertinent.

A l'aide de ce modèle, tentons à présent de comprendre pourquoi V20, V14 et V12 laissent entendre une variation de phonème, contrairement aux autres voitures étudiées. A priori, plus la fréquence du premier formant est élevée, plus le phonème perçu se rapproche d'un 'an'. Cependant, la fréquence maximale du premier formant de V14, V20 et V12 n'est pas la plus élevée parmi toutes les voitures étudiées. En revanche, les plages de fréquence du premier formant de ces deux sportives sont plus larges. Il faut effectivement avoir une variation formantique suffisamment importante pour percevoir un changement de timbre. Il est donc logique que les voitures dont la montée de régime est plus rapide, les sportives, présentent une plus grande évolution du timbre sur des montées de régime de 2s.

L'observation plus approfondie des courbes montre que les variations formantiques des sportives V14, V12 et V20 sont plus linéaires que les autres. Par ailleurs, le calcul des pentes de ces variations formantiques fournit un résultat intéressant :

V12	0.06
V20	0.078
V14	0.06
V13	0.056
V1	0.056
V11	0.053
V4	0.053

*Tableau 7 pentes des variations fréquentielles de F1 en fonction du régime moteur*

Les sportives V14, V12 et V20 présentent une pente de croissance formantique supérieure aux autres voitures. Ainsi, les pentes des variations formantiques en fonction du régime moteur diffèrent d'une voiture à l'autre, en augmentant pour une plus importante variation de phonème perçue. Cet effet est réalisé en décalant le centre de gravité spectral de H2, H4, H6 vers l'aigu : ces voitures présentent des niveaux de H4 et H6 relativement élevés par rapport à H2 comparativement aux autres voitures. Il est clair que si le premier formant est décalé vers H6, sa croissance fréquentielle en fonction du régime moteur sera d'autant plus importante.

Des calculs effectués sur notre base de paramètres signal correspondant aux échantillons des voitures sportives et puissantes de l'espace de catégorisation confirment les observations précédentes. Les voitures étudiées sont classées en fonction des rapports (Harmoniques paires / H impaires) , (Harmonique 2 / Harmoniques globales) et (Harmoniques paires / Harmonique 2) :

Lhp/Lh2		Lh2/Lh		Lhp(dB)/Lhi	
	Right		Right		Right
V1	0,78	V4	1,22	V4	1,05
V2	0,78	V11	1,31	V11	1,07
V6	0,79	V7	1,33	V7	1,10
V13	0,79	V3	1,35	V18	1,15
V19	0,79	V12	1,38	V14	1,16
V18	0,79	V14	1,40	V3	1,17
V20	0,79	V18	1,41	V6	1,17
V14	0,80	V6	1,41	V19	1,19
V12	0,81	V20	1,42	V20	1,23
V7	0,81	V19	1,42	V12	1,25
V11	0,81	V13	1,45	V2	1,29
V3	0,82	V1	1,45	V1	1,32
V4	0,86	V2	1,46	V13	1,38

Tableau 8 (Harmoniques paires / H impaires), (Harmonique 2 / Harmoniques globales) et (Harmoniques paires / Harmonique 2)

Les observations subjectives (personnelles) sont représentées dans le tableau sous forme de couleur : les voitures présentées en rouge sont celles qui présentent peu de bourdonnement au sens formantique, les voitures surlignées en jaune sont celles qui ont un fort bourdonnement "on", enfin les voitures en bleu sont celles qui présentent de fortes variations formantiques. Ces observations sont ainsi reliées aux paramètres signaux calculés. La première ligne du tableau informe sur les niveaux d'harmoniques paires par rapport au niveau d'harmoniques impaires. Il a été observé que le bourdonnement est lié à l'émergence des harmoniques paires, la présence des deux voitures qui ne présentent pas de bourdonnement en bas du classement est donc logique. D'autre part, les bourdonnantes en "on" sont classées dans les premières : la deuxième ligne et la troisième ligne du tableau nous indiquent que c'est l'harmonique H2 qui est principale responsable du bourdonnement et qui renforce le niveau des harmoniques paires. En effet, ces voitures sont les plus riches en harmonique H2 par rapport au niveau moyen des harmoniques et les moins riches en harmoniques paires par rapport à l'harmonique H2. Enfin, ces calculs confirment l'importance des harmoniques paires autres que l'harmonique H2 pour entendre des variations formantiques. Les voitures à forte variation formantique présentent des harmoniques paires supérieures aux autres et un niveau d'harmoniques paires proche du niveau de l'harmonique H2.

Pour conclure, il est possible d'affirmer que le bourdonnement est provoqué par les harmoniques paires. Il faut donc que le niveau relatif de ces harmoniques soit suffisamment élevé, ce qui va à l'encontre d'une forte rugosité. En effet, l'écart fréquentiel entre les harmoniques est trop élevé aux régimes classiques pour percevoir une rugosité. Par ailleurs, plus le niveau des harmoniques H4 et H6 est élevé comparativement à l'harmonique H2, plus important sera le changement de timbre perçu lors d'une montée de régime. Cet effet auditif sera également renforcé sur si la montée de régime est rapide.

Enfin, la linéarité de la variation formantique semble avoir une importance. En outre, il convient de comprendre l'influence de cette évolution de phonème du bourdonnement sur le typage sport. Ces observations doivent être approfondies par la réalisation du test +/- sport.

## Chapitre III. Etudes perceptives

L'objectif des tests perceptifs est de mieux comprendre la notion de typage sport du bruit moteur. Nous aborderons cette notion selon deux axes : une approche globale nous permettra de recueillir des informations sur la perception de la sportivité des bruits moteur en général ; une autre approche, plus spécifique, consiste à étudier précisément les notions perceptives de rugosité et de bourdonnement. En effet, rugosité et bourdonnement sont a priori des phénomènes influents sur la sportivité perçue. D'autre part, à travers ces tests, nous souhaitons lier des ressentis auditifs subjectifs à des paramètres signaux objectifs.

Pour se faire, nous partons des hypothèses établies dans les chapitres précédents :

- Le niveau des harmoniques H4-H6 par rapport à celui de H2 et des autres harmoniques influent sur l'évolution phonémique "on-an" perçue lors d'une montée de régime.
- Les bosses de bourdonnement apparaissent à partir d'un certain seuil de niveau de H2.
- La rugosité est une sensation décomposable en deux ressentis qui correspondent à deux paramètres signaux : le roucoulement est lié au niveau des harmoniques H3.5 H4 H4.5, le caractère râpeux est lié au niveau des harmoniques H9-H15.

### I. Mise en place des tests perceptifs

Nous avons recruté 56 volontaires parmi les collaborateurs PSA pour participer à trois tests. Parmi ces collaborateurs, quelque uns étaient acousticiens, mais aucun ne travaillait sur le typage du bruit moteur.

Le premier test porte sur les différentes représentations de la sportivité du bruit moteur. Le deuxième test concerne la gêne provoquée par les bosses de bourdonnement. Le troisième test vise à mettre en évidence les différents ressentis de "rugosité". Tous ces tests présentent des sons de moteur contrôlés par les paramètres signaux proposés ci-dessus.

#### **1. Déroulement des tests**

Les tests ont été réalisés entre le 30 juin et le 4 juillet 2003 dans le laboratoire d'acoustique de l'équipe PEFH. 56 juges ont participé. Le groupe de compose de 13 femmes et 43 hommes. 40 personnes ont entre 20 et 30 ans, 14 entre 30 et 40 ans et 2 entre 40 et 50 ans.

Chaque juge a répondu consécutivement aux trois tests (sportivité, bosse de bourdonnement, rugosité).

Pour chaque test, une interface Fizz est réalisée : une page de consigne est affichée, puis une série de pages correspondant à chacun des sons est présentée dans un ordre aléatoire. Une série de 5 pages correspondant à 5 sons prédéfinis et contenant les sons extrêmes de chaque test est présentée au préalable. Cette série, non différenciée des autres pages par les juges, constitue une phase d'entraînement permettant aux juges de calibrer leur jugement par rapport au panel de sons présentés. Les autres pages sont présentées dans un ordre aléatoire aux sujets afin d'éviter un effet d'ordre.

L'expérience se déroule dans le laboratoire acoustique de l'équipe PEFH. Les sons sont stockés sur le PC-Maître FIZZ. Le système de restitution est composé de :

- 6 PC Hewlett Packard
- 6 pré-amplificateurs Head Acoustics PEQ IV
- 6 amplificateurs Head Acoustics PV A IV.2
- 6 casques électrostatiques Head Acoustics HA II

L'écoute se fait en binaural.

Le laboratoire d'acoustique permet de recevoir 6 participants en même temps. Chaque séance dure environ 45 min. Les participants remplissent d'abord un questionnaire révélant entre autre leur style de conduite et leur degré de sympathie pour les véhicules sports. Puis, leur sont présentés le laboratoire de recherche et la notion de typage sonore du bruit moteur.

## ***2. Description des tâches***

Test1 : +/- sport

Nous demandons aux sujets de noter le caractère sportif de sons sur une échelle non structurée allant de peu sport à très sport. Ils doivent également porter un jugement hédonique sur une échelle non structurée allant de "je n'aime pas du tout" à "j'aime beaucoup".

Préparation des échantillons sonores :

Notre objectif étant d'établir un lien clair entre des paramètres signaux et des ressentis auditifs, il est apparu nécessaire de modifier des signaux réels de bruit moteur selon les paramètres choisis. Pour observer l'influence seule de ces paramètres, nous avons dû modifier un unique signal de bruit moteur. L'enregistrement de V16 a été retenu comme base sonore. Ce choix a été motivé par le caractère feutré de la voiture. Celle-ci ne contient donc a priori aucune des caractérisations sport ou puissant. Par ailleurs, le caractère sportif dépendant largement de l'évolution temporelle du bruit moteur, nous choisissons de travailler avec des montées de régime (PA de 4 secondes à partir de

3500 tr/min). Comme tous les signaux proviennent de la même voiture, nous écartons l'influence évidente de la rapidité de montée de régime sur le caractère sportif du son moteur.

Les échantillons sonores sont créés à partir d'un enregistrement de V16 auquel nous retirons 3dB à la partie bruitée avec jMax. Le rapport des niveaux de la partie harmonique et de la partie bruitée est ainsi augmenté de sorte que les échantillons sonores se rapprochent des classes sport et puissant. Les autres paramètres signaux modifiés sont ceux relevés lors de l'étude signal sur la rugosité et le bourdonnement :

- le niveau de H3.5-H4-H4.5
- le niveau de H9-H15
- le niveau de H2
- le niveau de H4 et H6

Chaque échantillon sonore est créé sous jMax en augmentant ou non de 10 dB l'un ou plusieurs des paramètres ci-dessus. Nous obtenons ainsi 16 échantillons. D'autre part, une loi temporelle est utilisée pour gérer le niveau de H2 et de H4-H6 dans une montée de régime : il s'agit d'une droite croissante de 0 à 20 dB ou décroissante de 20 à 0 dB. Des échantillons sont alors formés en modifiant également le niveau de H9-H15. 4 échantillons supplémentaires sont ainsi créés. Les échantillons formés sont disponibles en écoute et leur nomenclature est indiquée en annexe III.

Déroulement du test :

Avant de démarrer le test, on demande aux participants, afin de se mettre en condition, de s'imaginer qu'ils roulent sur une route nationale et s'apprêtent à doubler un camion très rapidement : ils passent en 3<sup>ème</sup> et accélèrent pied au plancher. Ils peuvent donc associer les sons à une scène réaliste et ainsi se concentrer sur chaque son sans être perturbés par une écoute causale. Une mise en garde est également effectuée : les sons se ressemblent, et leur degré de sportivité aussi : il n'y a pas de V6...

La séance Fizz est lancée.

Après une page d'accueil apparaît la page de consigne du premier test :

Vous allez écouter des sons dont vous devrez évaluer le caractère sportif sur une échelle de ce type

peu sport

très sport



115

et donner votre appréciation sur une autre échelle

je n'aime pas du tout

j'aime beaucoup



Cliquez sur PAGE SUIVANTE pour commencer le test

**A V O U S D E J O U E R !**

**PAGE SUIVANTE**

Dès la page suivante, le test débute. Chaque participant doit évaluer 25 sons et donc valider 25 pages de ce type (5 pages d'entraînement et 20 pages correspondant aux 16 sons à évaluer) :

Cliquez sur le bouton Play pour écouter le son

Play

Évaluez son caractère sportif en positionnant le curseur sur l'échelle



peu sport

très sport

387

Appréciez-vous ce son ? Répondez en positionnant le curseur sur l'échelle



je n'aime pas du tout

j'aime beaucoup

00:00

**PAGE SUIVANTE**

Le premier test se termine par une question ouverte sur la notion de bruit moteur sport. Nous ferons attention à l'interprétation des verbalisations ; le lien entre représentation et langage est encore incertain et un mot pour un sujet peut vouloir dire autre chose pour un autre. Ces commentaires pourront tout de même nous aider à mieux comprendre le jugement de chaque participant.

Pourriez-vous décrire en quelques mots ce qu'est, pour vous, un son de voiture sport?

TEXTE \_\_\_\_\_ 1

TEXTE \_\_\_\_\_ 2

TEXTE \_\_\_\_\_ 3

TEXTE \_\_\_\_\_ 4

PAGE SUIVANTE

:53 [5, 52] MESSAGE N°1

## test2 : bosses de bourdonnement. Test de gêne

On demande aux juges d'évaluer la gêne que procure des sons sur une échelle non structurée allant de "supportable" à "insupportable".

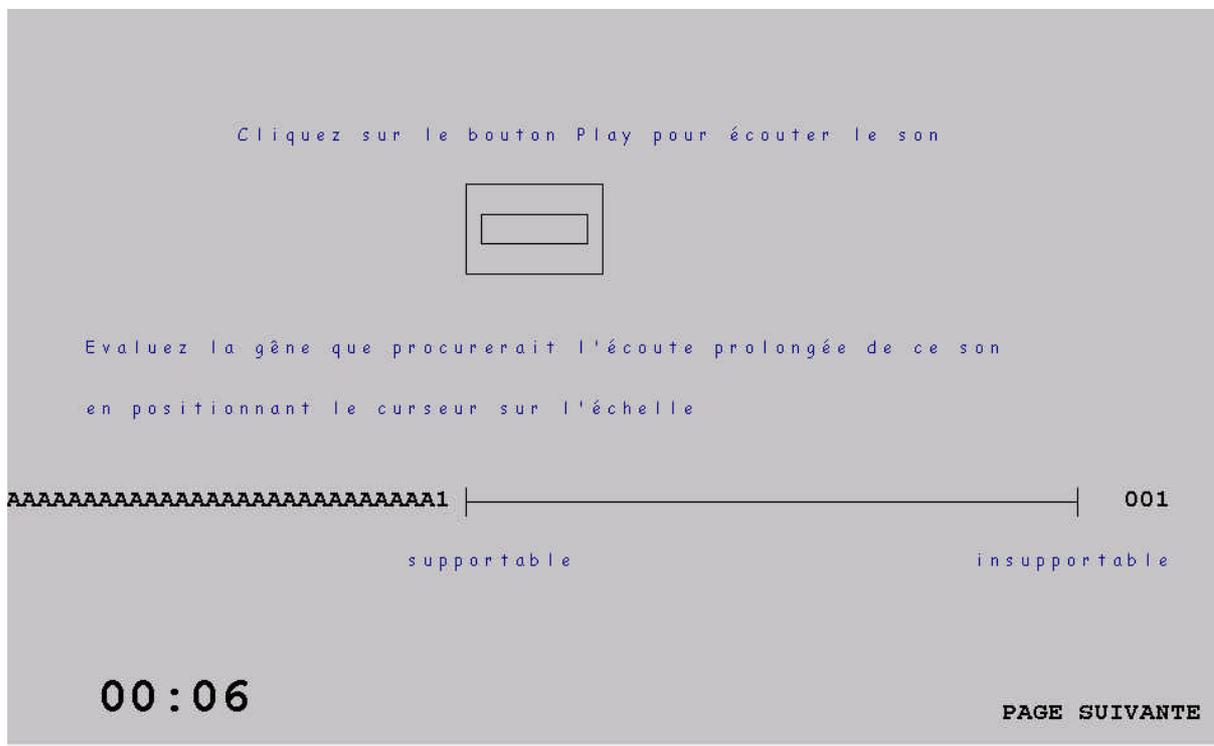
Préparation des échantillons sonores :

L'objectif est de mettre en évidence le passage brusque du bourdonnant supportable au résonnant insupportable. Nous pensons que le niveau de H2 en est largement responsable. Des sons doivent donc être modifiés en contrôlant le niveau de H2. D'autre part, la sensation de gêne pouvant s'apparenter à d'autres sensations, et par là à d'autres paramètres, nous choisissons de proposer aux sujets des sons de voitures différentes. Enfin, la notion de bosse de bourdonnement recouvre une sensation ponctuelle, survenant à un certain régime. Nous choisissons de présenter des sons dont le régime est constant, à 4000tr/min.

Les échantillons sonores sont ainsi formés en modifiant sous jMax le niveau de H2 des enregistrements de V1 (puissante) et de V12 (sportive) en régime stabilisé à 4000 tr/min pendant 2 secondes. Le niveau de H2 est incrémenté de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 ou 14dB. Nous obtenons 16 sons.

Déroulement du test :

Après une première page de consigne suivent 21 pages de ce type (5 pages d'entraînement et 16 pages correspondant aux 16 sons à évaluer, dans un ordre aléatoire):



test3 : rugosité

Les juges doivent évaluer le caractère rugueux d'une série de sons sur une échelle non structurée allant de "pas du tout rugueux" à "très rugueux".

Préparation des échantillons sonores :

Comme pour le test +/- sport, notre objectif est d'établir un lien entre des paramètres signaux et des ressentis auditifs. Nous devons donc modifier des signaux réels de bruit moteur selon des paramètres choisis. Pour observer l'influence seule de ces paramètres, nous avons dû modifier un unique signal de bruit moteur.

Les échantillons sont créés en modifiant un enregistrement de V16. Les niveaux de H2, H3.5-H4-H4.5 et H9-H15 sont incrémentés, ou non, de 5 ou de 10 dB. On obtient ainsi 18 sons. Les modifications des deux derniers paramètres découlent directement des observations signal sur la rugosité. Le niveau de H2 est également modifié pour observer l'influence du bourdonnement sur la rugosité.

Déroulement du test :

Après avoir indiqué la consigne aux juges, nous leur précisons que la rugosité est une notion subjective. Si les sujets ne se font aucune représentation de la rugosité d'un son, on leur suggère de faire l'analogie avec la perception tactile d'une surface rugueuse.

Après une page de consigne apparaît une série de 23 pages (5 pages d'entraînement+18 pages de test) :

The screenshot shows a web-based test interface with a grey background. At the top, the text reads "Cliquez sur le bouton Play pour écouter le son". Below this is a play button icon consisting of a square with a horizontal rectangle inside. The next instruction is "Évaluez sa rugosité en positionnant le curseur sur l'échelle". Below the instruction is a horizontal scale. On the left side of the scale is a long string of 'A' characters followed by a '1'. On the right side is "001". Below the scale, the text "pas du tout rugueux" is on the left and "très rugueux" is on the right. At the bottom left, a timer shows "00:06". At the bottom right, the text "PAGE SUIVANTE" is displayed. At the very bottom of the page, there is a small footer that reads "50/54 (4 / 53) MESSAGE N°1".

Le test se termine par une question ouverte sur la rugosité. Tout comme la premier test, nous souhaitons recueillir un maximum d'informations potentielle, tout en prenant des précautions quant à l'interprétation de ces données :

Pourriez-vous décrire en quelques mots ce qu'est, pour vous, un son rugueux ?

TEXTE \_\_\_\_\_ 1

TEXTE \_\_\_\_\_ 2

TEXTE \_\_\_\_\_ 3

TEXTE \_\_\_\_\_ 4

PAGE SUIVANTE

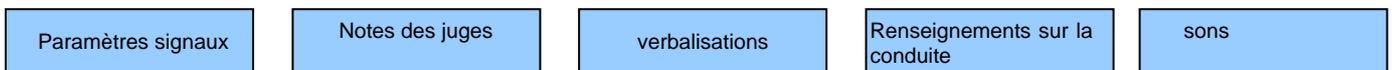
## II. Traitements des données

### 1. Méthode générale de traitement des résultats des tests

Pour chacun des trois tests, nous emploierons la même méthode d'analyse conseillée par Pauline Faye et décrite ci-après.

Données :

Nous disposons de différents types de données :



Certains types de données sont disponibles sans traitement spécifique : les sons de resynthèse (leur écoute), les notes attribuées aux sons par les juges, les verbalisations sur la sportivité et la rugosité, le style de conduite (que les juges définissent eux-mêmes dans la fiche de renseignement). D'autres données, comme les paramètres signaux, doivent être calculées. Pour cela, nous utilisons le logiciel Artémis. Les paramètres suivants sont mesurés sur les voies droites de chaque sons :

- $dB, dBB, dBA$  : les niveaux en dB, dBB, dBA.
- $L_{H_2}, L_{H_4}, L_{H_6}$  : les niveaux des harmoniques H2, H4 et H6 en dBB. Pour cela, le signal est échantillonné tous les 50 tr/min et tronqué par une fenêtre de Hanning. Sont ensuite mesurés en dBB les niveaux des harmoniques H2, H4 et H6 identifiables grâce à la courbe du régime moteur en fonction du temps contenue dans chaque signal. La connaissance du régime moteur induit effectivement celle des fréquences des harmoniques.
- $H246$  : Le niveau des harmoniques H2, H4 et H6 réunies. Le signal est filtré par 3 passes bande en parallèle dont la fréquence centrale suit les harmoniques H2, H4 et H6 (obtenue à l'aide de la courbe de régime en fonction du temps).
- $coeff F1$  : le centre de gravité des harmoniques H2-H4-H6, obtenu à partir des niveaux

moyens des harmoniques H2, H4 et H6 :  $coeff F1 = \frac{2L_{H_2} + 4L_{H_4} + 6L_{H_6}}{L_{H_2} + L_{H_4} + L_{H_6}}$ . Ce coefficient

correspond à la pente de variation formantique décrite dans le chapitre sur le bourdonnement.

- $Sonie$  : la sonie est calculée en sones. Le signal est filtré par bande de tiers d'octave. Pour chaque bande, on calcule le niveau pondéré avec le coefficient adéquat.
- $Sharp$  : l'acuité calculée en acum par la méthode d'Aurès.
- $Roughness$  : la rugosité calculée en asper par la méthode d'Aurès.

- *SpecRoughH4* : la fonction Specific Roughness calcule les rugosités partielles obtenues sur chacune des 24 bandes critiques. SpecRoughH4 correspond à la rugosité partielle d'une bande critique : celle dont la fréquence centrale est 250 Hz. Cette plage de fréquence est choisie car elle correspond aux fréquences des harmoniques H3.5, H4 et H4.5 sur la plage de régime observée.
- *SpecRoughH9-15* : c'est la moyenne des rugosités partielles correspondant aux bandes critiques de fréquences centrales 570Hz, 700Hz, 840Hz et 1000Hz. Ces plages de fréquence correspondent aux harmoniques H9-H15 pour les régimes considérés.

Ces calculs sont disponibles en annexe IV.

Traitements :

Pour traiter les données, nous utilisons différentes techniques d'analyse :



- CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) : cette technique tente de représenter la similarité entre produits (nos juges). Elle permet de séparer les produits en groupe de produits qui se ressemblent. Cette technique itérative consiste à créer à chaque étape une partition obtenue en agrégeant deux à deux les éléments les plus proches repérés en calculant les distances euclidiennes entre tous les couples possibles de produits. Cette méthode est appliquée aux matrices contenant les notes attribuées par les juges à chaque son, préalablement centrées, pour chaque test. Elle est mise en œuvre sous Matlab. Le résultat d'une telle analyse est un dendrogramme représentant les distances entre les juges, et une courbe d'inertie représentant la proximité des produits regroupés en fonction du nombre de classes. Prenons l'exemple de celui obtenu pour le test +/-sport :

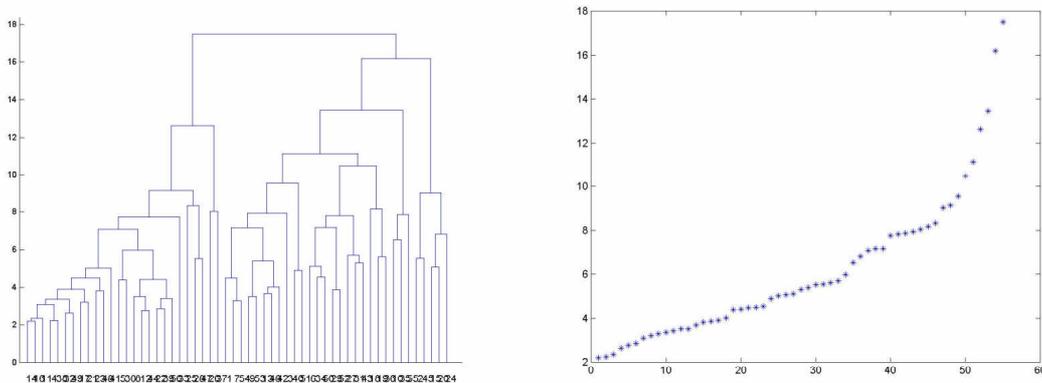
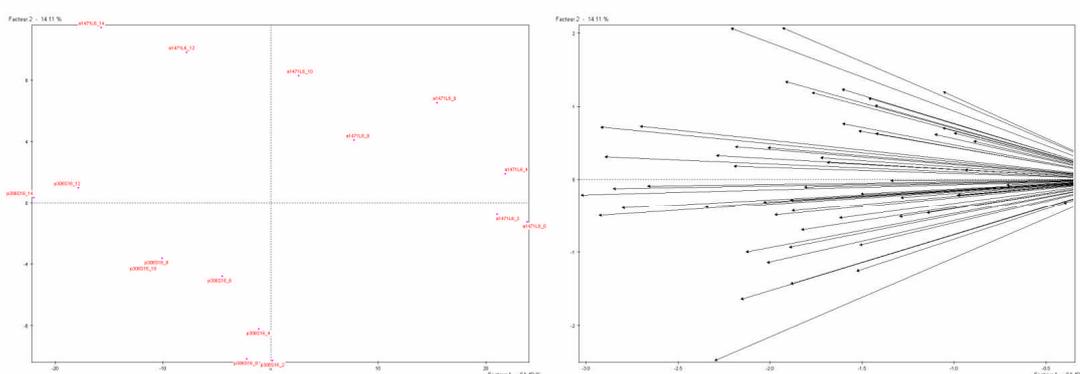


figure 9 dendrogramme et courbe d'inertie obtenus par CAH sur les résultats du test +/- sport

Si l'on choisit de former 56 classes, l'inertie sera évidemment minimale. Il s'agit alors de décider du nombre optimal de classes permettant de mettre en évidence des tendances générales tout en gardant le maximum d'homogénéité par classe. Les moyennes des notes attribuées par classe sont ensuite calculées et exploitées.

- ACP non normée ( Analyse en Composante Principale) : l'objectif d'une telle analyse est d'évaluer la ressemblance entre les individus (les sons). Il s'agit de résumer l'ensemble des variables (les opinions des juges) par un petit nombre de variables orthogonales appelées composantes principales. Cela consiste mathématiquement à diagonaliser la matrice de covariance calculée dans l'espace d'origine (formé par les 56 juges). On observe alors la projection des sons sur les axes principaux du nouvel espace (les vecteurs correspondants aux valeurs propres maximales et qui expliquent donc le maximum de variance), et les cercles de corrélations correspondants qui représentent la corrélation des juges avec les axes. Ce traitement est effectué avec le logiciel SPAD. Voici un exemple de traitement SPAD effectué sur le test de gène.



*figure10 projections et corrélations obtenues par ACP sur les résultats du test de gène*

La figure de gauche représente la projection des sons du test sur les deux axes principaux expliquant 78% de la variance observée. La figure de droite représente les corrélations des juges en fonctions de ces deux axes.

Ce traitement est effectué sur les notes des tests bruts centrées selon les juges et sur les notes centrées observées selon les différentes classes obtenues par CAH. Il permet de mettre en évidence les composantes principales pour chaque classe de sujets.

- Régressions linéaires : il s'agit de calculer avec Excel une droite qui s'ajuste au plus près des données, par la méthode des moindres carrés. Ceci nous permet de faire le lien entre les notes moyennes attribués aux sons par classes de juges et les paramètres acoustiques et psychoacoustiques calculés avec Artémis.

- Ecoute : n'oublions pas qu'il s'agit de perception et que notre oreille forme un bon outil d'analyse. L'écoute des sons en fonction des classements des juges, ou selon les axes mis en évidence par ACP est un moyen efficace pour appréhender les paramètres subjectifs primordiaux.
- Le lien entre classements des sons et verbalisation ou style de conduite est évident. Ces éléments sont des indices pour nous aider à mieux comprendre les jugements effectués.

Méthode générale d'analyse :

La méthodologie choisie pour étudier chacun des trois tests est résumée dans le schéma suivant :

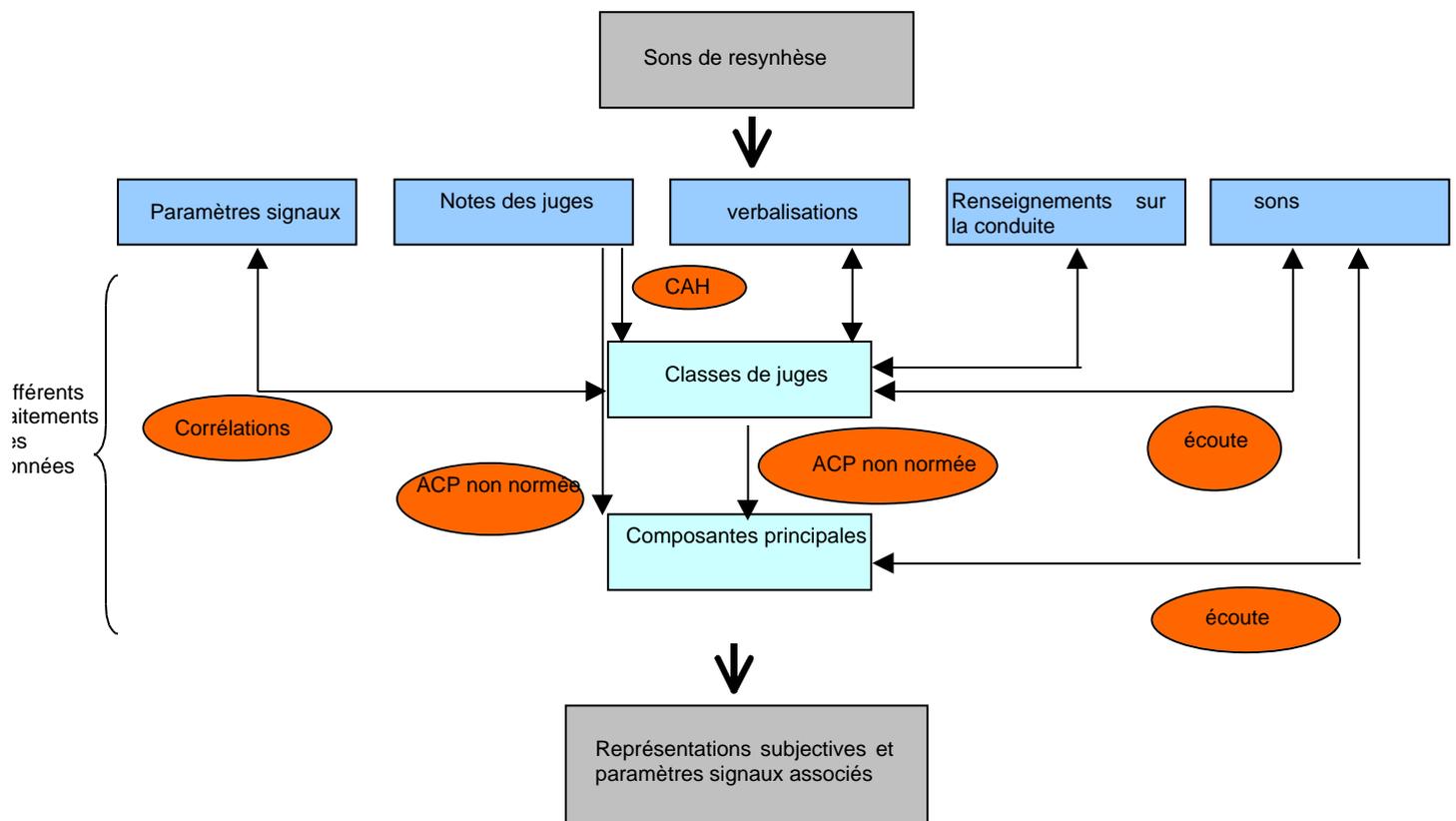


Figure 11 méthode générale de traitement des résultats

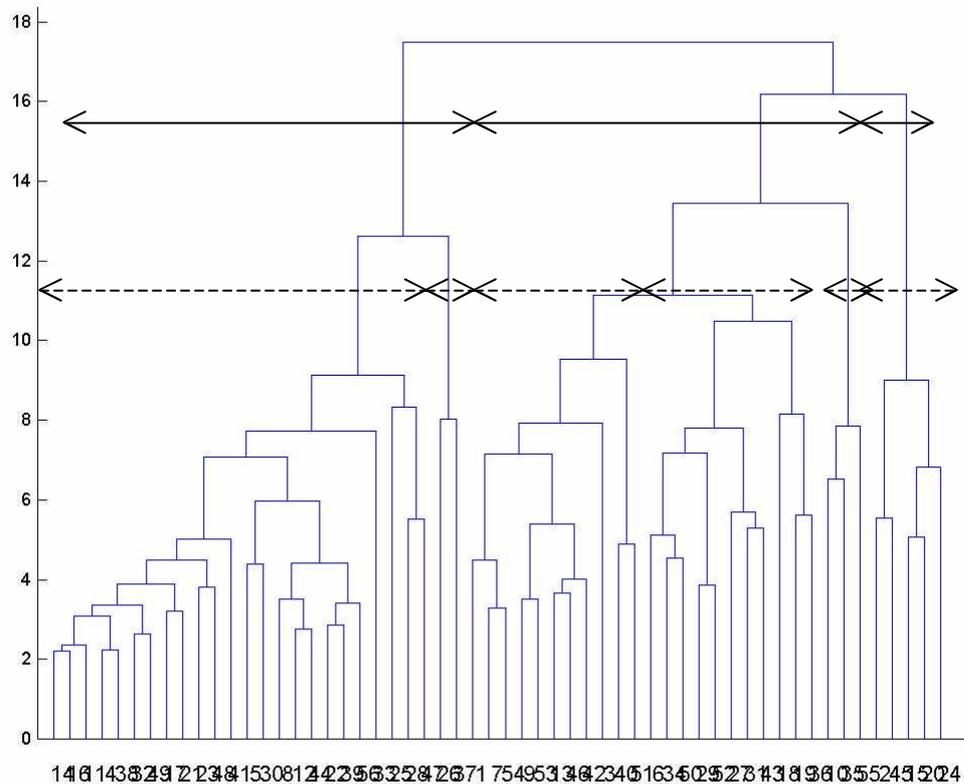
Ce traitement, effectué pour chaque test, permet de mettre en évidence les différentes tendances perceptives des sujets et de lier ces tendances à des paramètres signaux, outils indispensables pour prévoir efficacement les ressentis provoqués par les sons moteurs.

## 2. Analyse du test +/-sport

Dans ce test, les sujets devaient juger la sportivité perçue à l'écoute de 20 sons et donner une appréciation hédonique.

### Analyse par CAH :

Ce test correspond à notre approche globale de l'étude du typage sport. Nous espérons mettre en évidence des classes de sujets sensibles à différents types de sportivité. C'est pourquoi, la première analyse effectuée est une CAH. Nous obtenons le dendrogramme suivant et la courbe d'inertie associée :



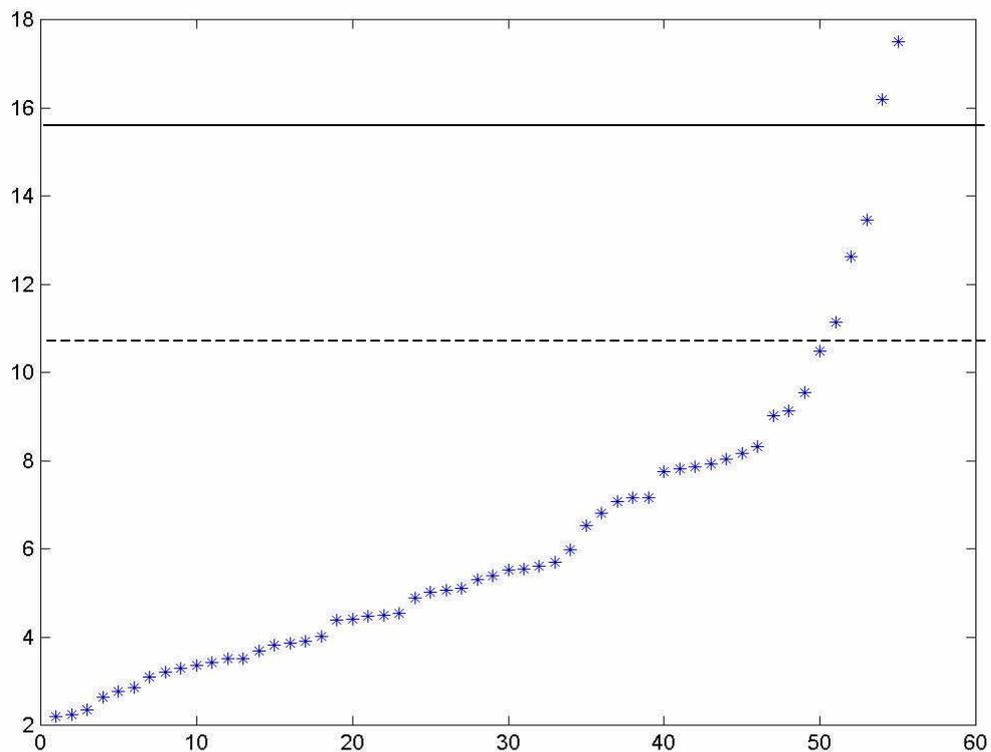
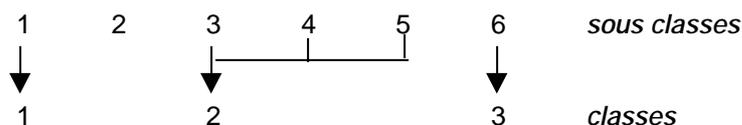


figure 12 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test +/- sport

En abscisse du dendrogramme sont indiqués les numéros des juges (de 1 à 56). Ces juges sont regroupés par similarité de leur jugement de sportivité. Pour décider du nombre de classes à former, nous analysons la courbe d'inertie. En effet, le nombre optimal de classes correspond à la rupture de pente de cette courbe ; ce critère nous indique le nombre de noeuds du dendrogramme expliquant le maximum de variance. Nous formons alors 6 classes de juges (numérotées de 1 à 6) représentées en traits pointillés sur le dendrogramme. Pour chacune des 6 classes, nous calculons les moyennes des notes attribuées aux sons et écoutons les classements de sportivité résultants. Il apparaît que le classement effectué par la classe 2 est marginal. Cette classe ne contient que deux sujets. Nous décidons de ne pas tenir compte de leurs réponses. Les 5 classes restantes ne sont pas très différentes. Nous décidons alors de réduire le nombre de classes (trait plein). Nous formons 3 classes de cette manière :



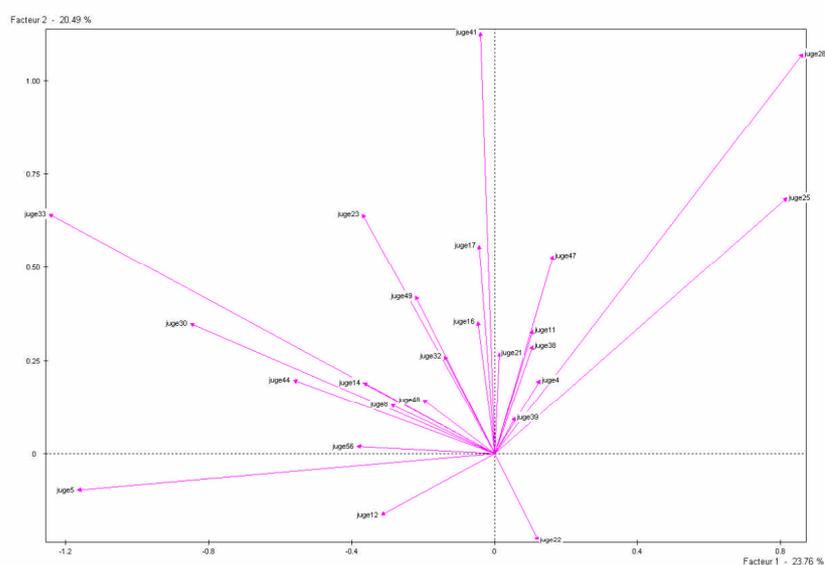
A nouveau les moyennes des notes sont calculées pour chacune des 3 classes, et les nouveaux classements sont établis (cf annexe V). La classe 1 contient 24 sujets, la classe 2 en contient 25, et la classe 3 ne compte que 5 sujets.

Pour comprendre les classements effectués par les juges des 3 classes, nous écoutons les sons et étudions les verbalisations. Les principales descriptions de la sportivité sont : le niveau, la rugosité, le caractère sourd et la variation du timbre pendant la montée de régime. Ces descriptions vont dans le sens de nos hypothèses, cependant il n'apparaît pas de différences nettes entre les classes. Nous notons uniquement que les juges de la classe 1 ont plus de difficulté à décrire un son que les juges des classes 2 et 3, plus précis.

### Analyse ACP :

Afin de préciser les différences d'écoute propres aux trois classes, nous effectuons une ACP non normée sur les résultats de chaque classe.

#### - classe 1



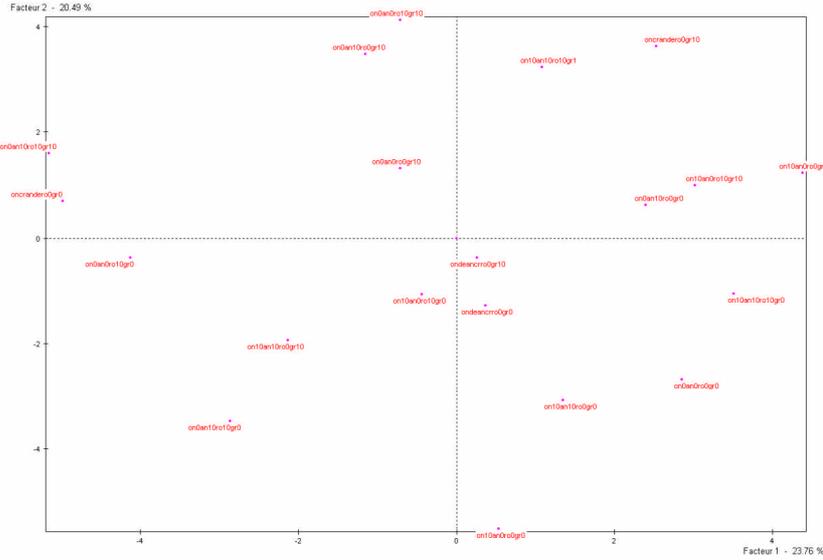


figure 13 corrélations et projections associées à la classe 1 du test +/- sport

Le cercle des corrélations montre que la classe 1 n'est pas très homogène. Les critères subjectifs choisis pour cette classe ne sont pas clairs. D'autre part, la plage de notation utilisée pour juger les sons est étroite. Les juges ont probablement trouvé le test trop difficile. Les sons sont effectivement très proches et peuvent être difficilement distinguables pour certains sujets.

- classe 2

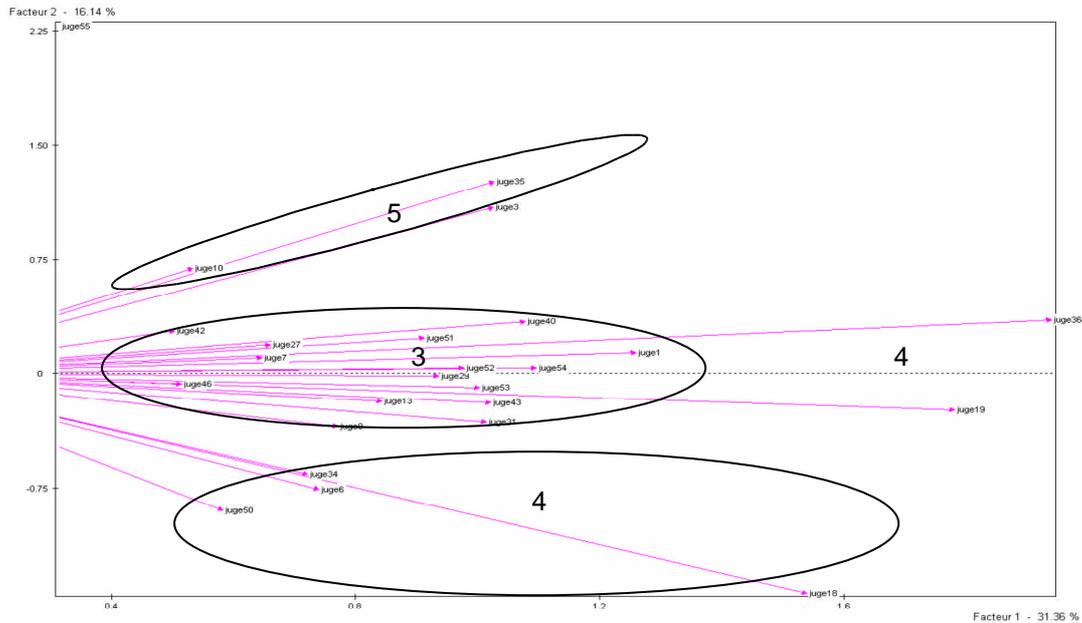
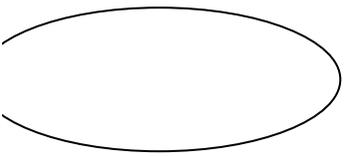
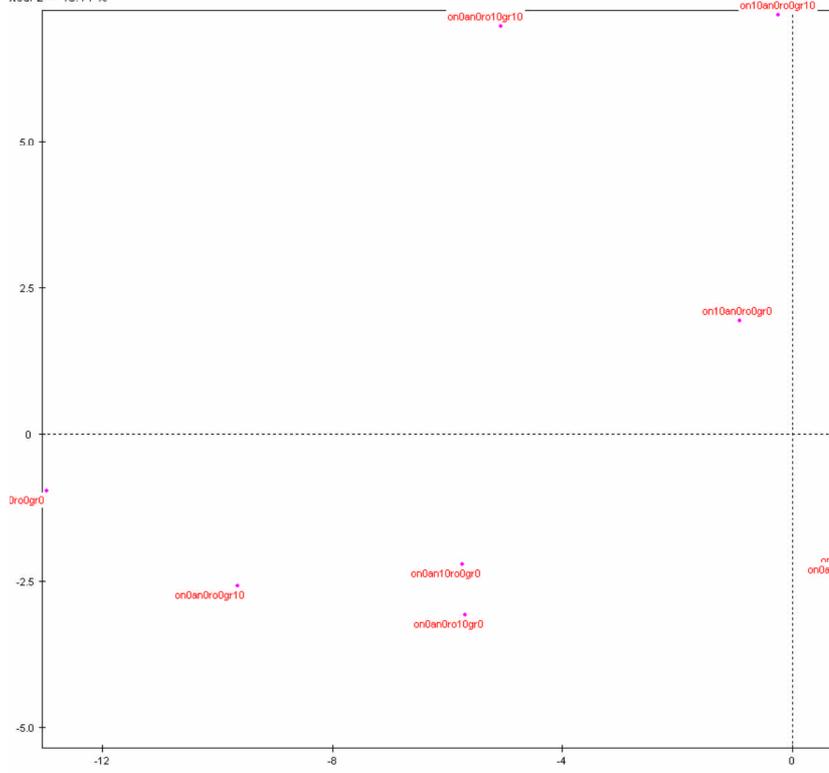


figure 14 corrélations associées à la classe 2 du test +/- sport

steur 2 - 16.14 %





Conclusion :

L'analyse effectuée confirme l'importance des premières harmoniques paires responsables du bourdonnement et des harmoniques H9-H15 responsables de la rugosité. D'autre part, certains jugent sport des sons de moteurs à fort bourdonnement, alors que d'autres accordent plus d'importance à la rugosité.

L'analyse des résultats globaux par ACP rassemble les observations effectuées pour chaque classe.

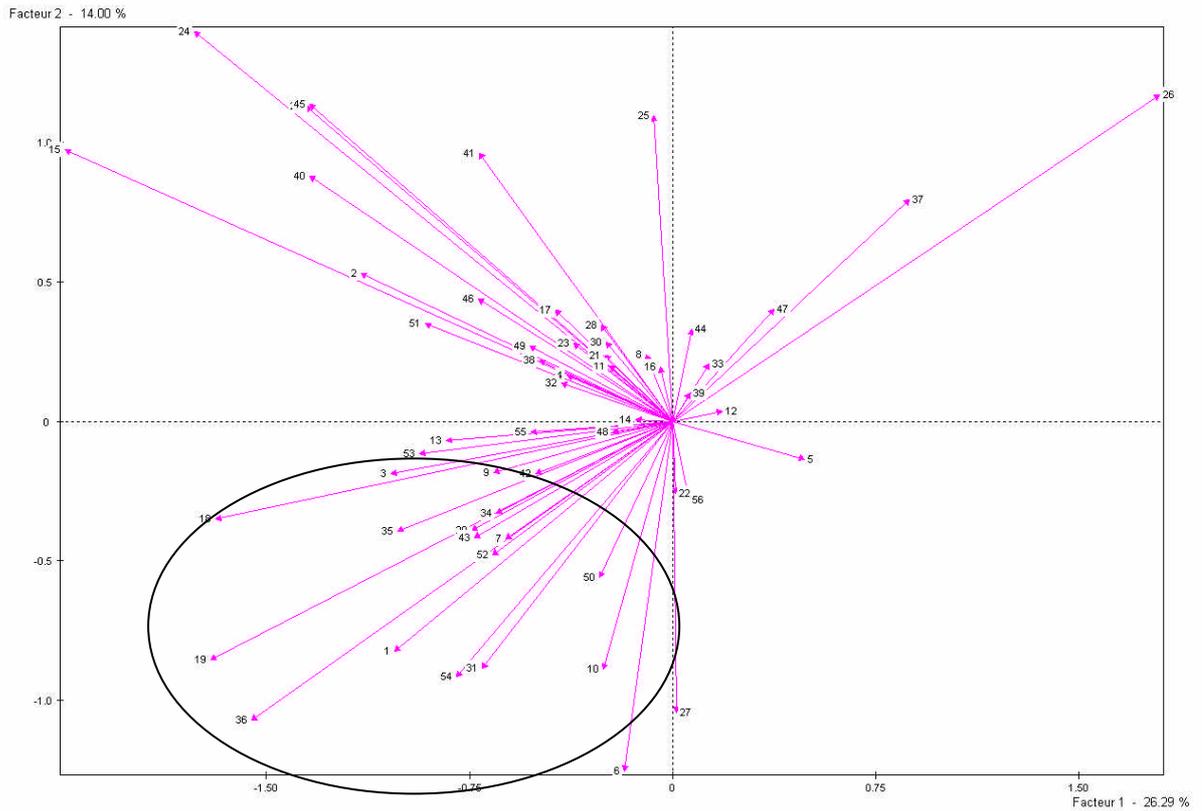


figure 18 corrélations au test +/- sport

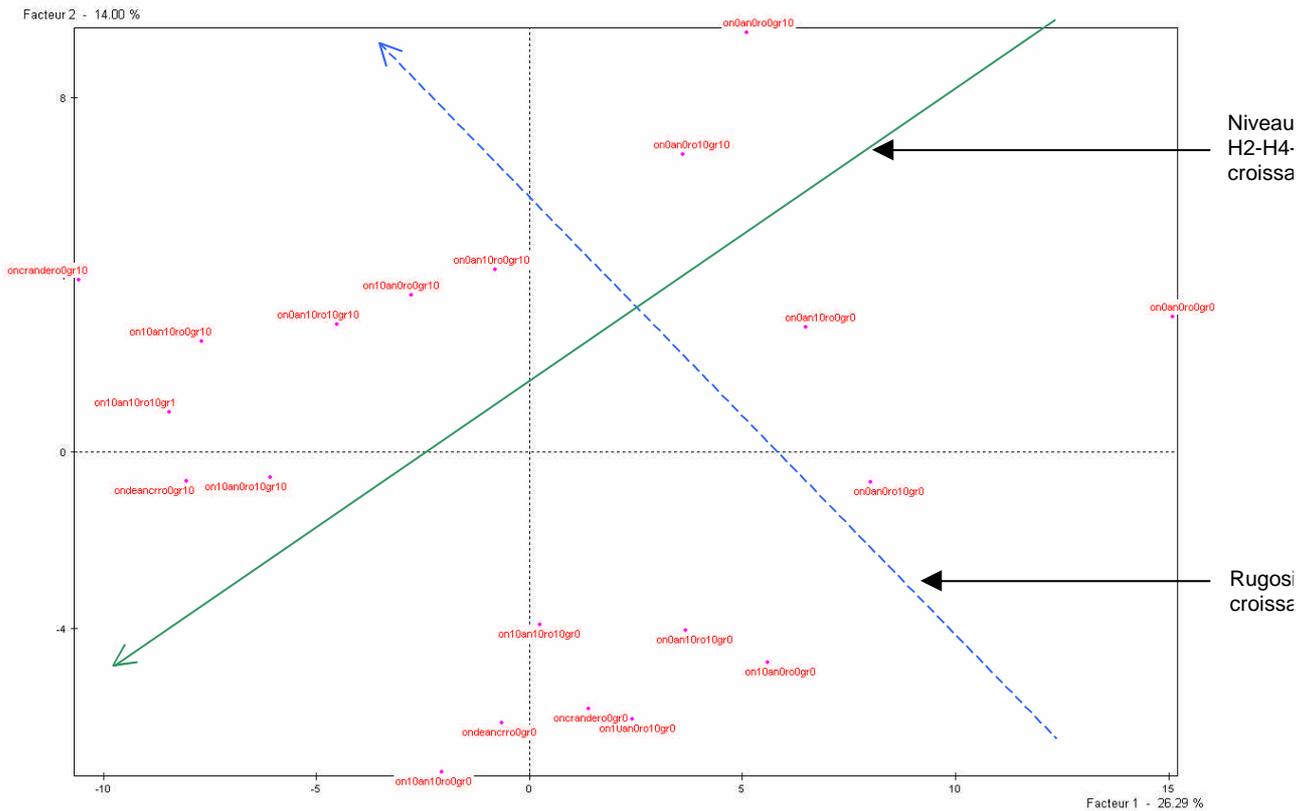


figure 19 projections associées test +/- sport

Les axes bleu et vert sont ajoutés en remarquant une certaine évolution des paramètres des sons. L'axe bleu indique une rugosité croissante. C'est l'axe suivi par la classe 3, représentée en fond bleu sur le cercle des corrélations. L'axe vert évolue avec le niveau des harmoniques H2-H4-H6. Il est suivi par la classe 2, en fond vert. Enfin, la classe 1, représentée par le fond orange, n'est pas consensuelle. Les deux juges écartés pour l'analyse sont rayés sur le cercle des corrélations.

#### Analyse des corrélations entre les ressentis subjectifs et les paramètres signaux :

Les différents ressentis subjectifs de la sportivité du son moteur sont observés. Il reste à les relier à des paramètres acoustiques et psychoacoustiques. Pour cela, nous calculons les coefficients de détermination liant les paramètres signaux et les notes moyennes attribuées aux sons pour chaque classe. Disposant de 20 produits (les sons), la régression est significative à 1% pour un coefficient de détermination supérieur à 0,318. Les coefficients sont rassemblés dans le tableau suivant :

	notes classe1	notes classe 2	notes classe3
dBA	0,01	0,60	0,04
dBB	0,19	0,54	0,02
sonie	0,00	0,73	0,41
sharp	0,46	0,03	0,47
SpecRoughH4	0,16	0,01	0,07
SpecRoughH9-15	0,35	0,07	0,67
Roughness	0,43	0,02	0,59
L_H6 (dBB)	0,02	0,24	0,05
L_H4 (dBB)	0,02	0,20	0,00
L_H2 (dBB)	0,46	0,24	0,01
notes classe1	1,00	0,01	0,11
notes classe 2	0,01	1,00	0,18
notes classe3	0,11	0,18	1,00
H246	0,15	0,57	0,02
coeff F1	0,27	0,00	0,01

Tableau 9 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 3 classes du test +/- sport

Les paramètres intuités SpecRoughH9-15 et H246 sont pertinents, contrairement à SpecRoughH4 et coeff F1.

Nous pouvons distinguer les trois classes :

La classe 1 n'est pas corrélée à la sonie ; la classe 2 n'est pas corrélée à l'acuité ; la classe 3 n'est pas corrélée au niveau de H2, H4 et H6.

Pour approfondir l'influence des paramètres signaux sur les trois classes, nous effectuons une régression linéaire entre deux paramètres dont les coefficients de détermination sont significatifs et les notes, de manière à obtenir la meilleure corrélation possible. On prend soin de choisir deux paramètres indépendants. Les coefficients de corrélation entre paramètres sont rassemblés en annexe VI.

- classe 1

$$notes = 22.04 \text{ SpecRoughH9\_15} - 0.06 L_{H_2} + 1.88 \quad \text{avec } r^2 = 0.77$$

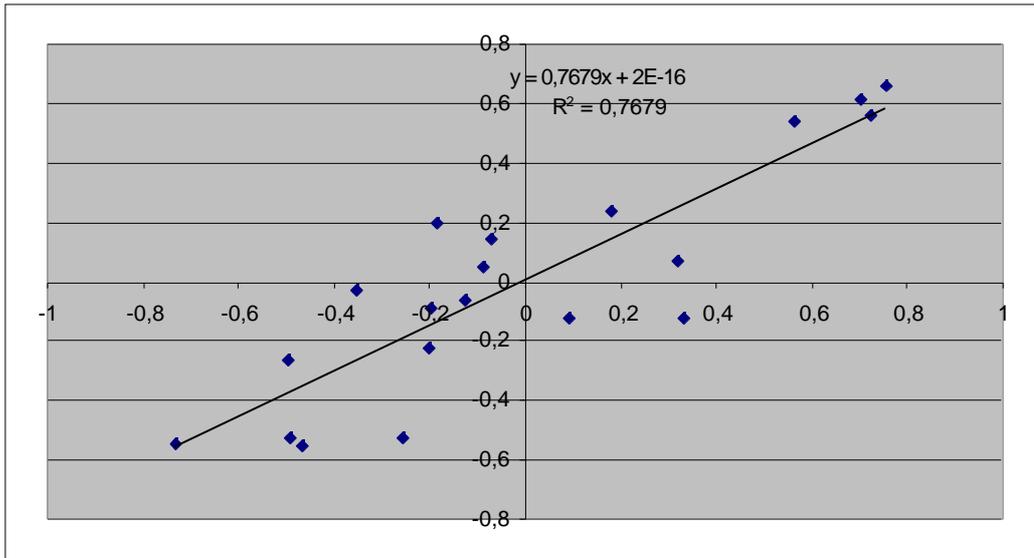


figure 20 régression linéaire entre les notes de la classe 1 et les paramètres SpecRoughH9\_15 et

$$L_{H_2}$$

Cette régression est significative. Le niveau de H2 est inversement corrélé à la sportivité. La rugosité induite par les harmoniques H9-H15 (la rugosité râpeuse) augmente la sportivité.

- classe 2

$$\text{notes} = 0.48 \text{ sonie} + 0.06 L_{H_6} - 10.91 \quad \text{avec } r^2 = 0.78$$

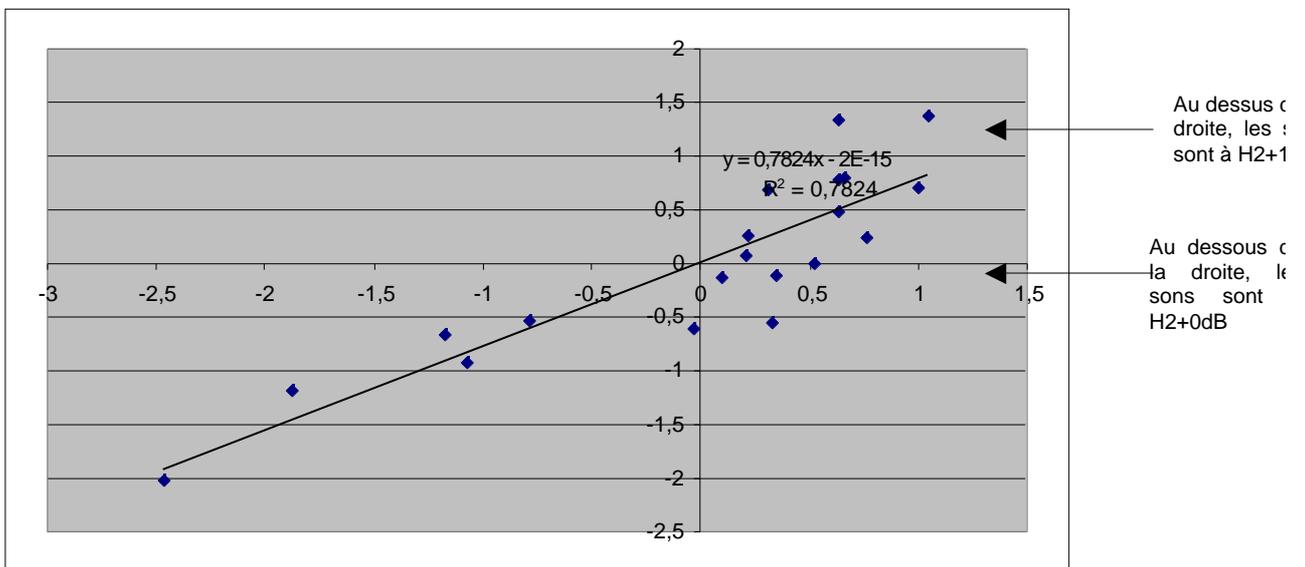


figure 21 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres sonie et  $L_{H_6}$

Cette classe assimile sportivité et sonie. Le niveau de H6 augmente également la sportivité perçue.

- classe 3

$notes = 0.44 \text{ specRoughH9}_{-15} + 117.8 \text{ sonie} - 20.19$  avec  $r^2 = 0.75$

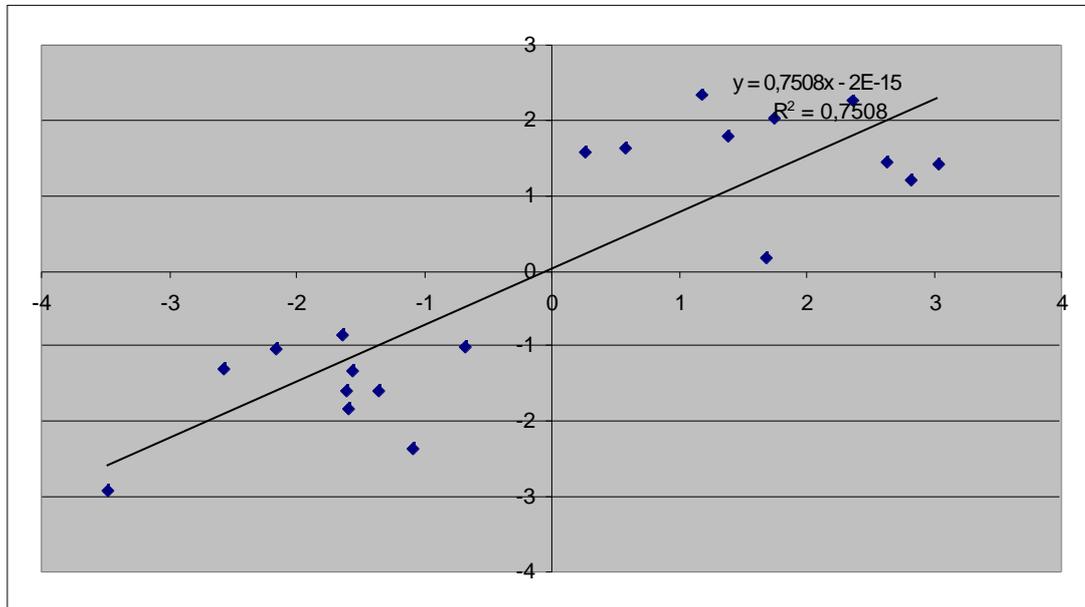


figure 22 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres *specRoughH9\_15* et *sonie*.

Sonie et rugosité râpeuse augmentent la sportivité perçue.

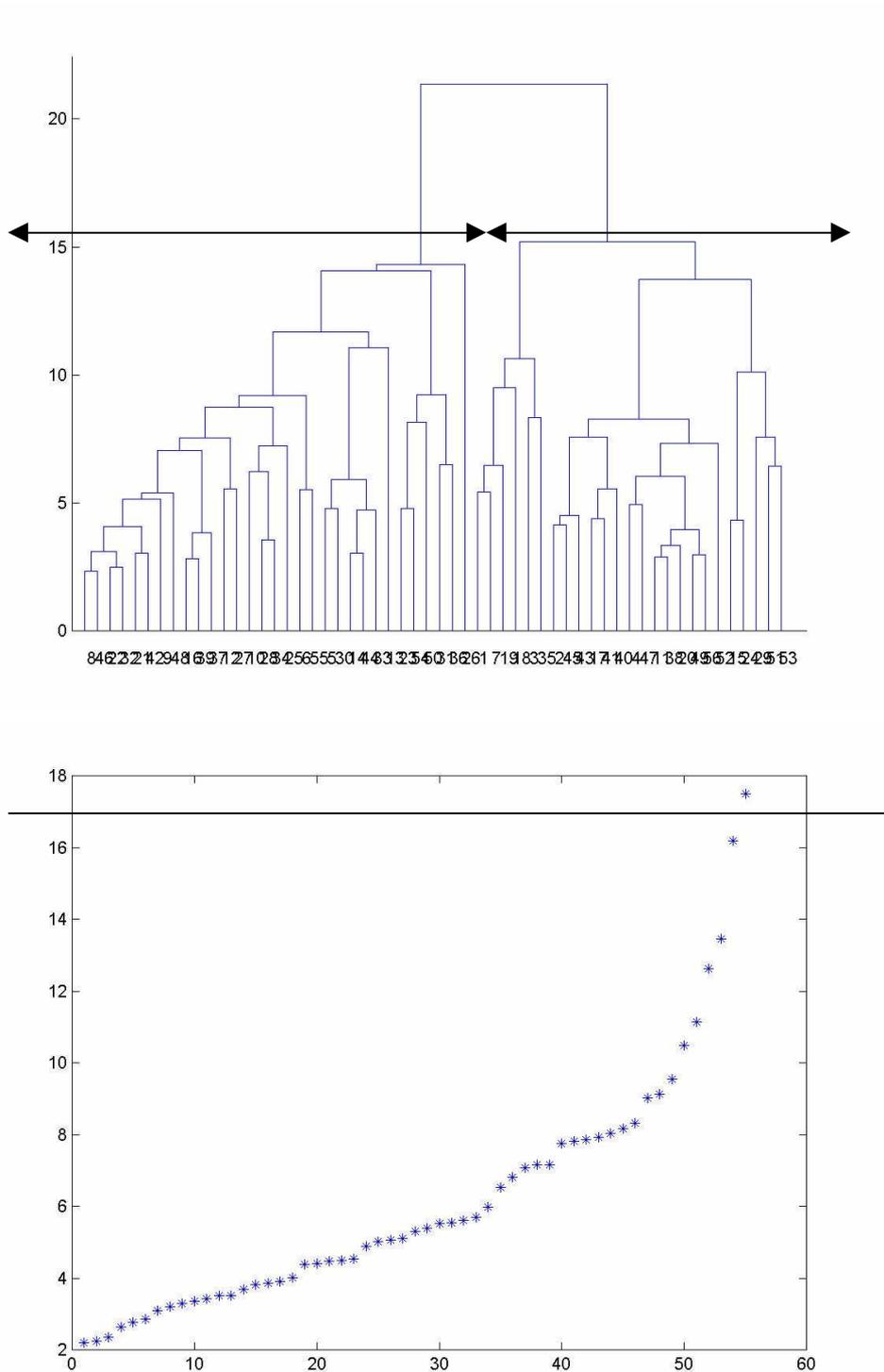
Pour résumer, les régressions effectuées sont significatives et confortent les tendances observées lors de l'analyse ACP :

La classe 2 est globalement sensible à la sonie et à H246 (paramètres corrélés à 0.66 avec la sonie). Cette classe confirme l'importance du niveau des harmoniques paires. Par ailleurs, le paramètre physique adapté pour représenter le niveau sonore est la pondération en dBA. La classe 3 est sensible à la rugosité. Le paramètre SpecRoughH9-H15 est plus adapté que le paramètre Roughness pour la mesurer.

Ces résultats confirment la prédominance du bourdonnement et de la rugosité dans le jugement de sportivité d'un son moteur. Chaque sujet privilégie l'un ou l'autre de ces attributs.

Analyse du test hédonique :

La première analyse effectuée est une CAH. Nous obtenons le dendrogramme et la courbe d'inertie associés suivants :



*figure 23 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test hédonique*

Nous divisons les sujets en deux classes de 30 et 26 sujets et calculons les moyennes par classe. Nous écoutons les classements des sons effectués par groupe de sujet. Il apparaît que la classe 1 n'aime pas les sons râpeux et que la classe 2 aime les sons bruyants. Les fiches de

renseignements remplis par les sujets indiquent que la classe 1 contient 16% de sujets pratiquant une conduite sport, contre 58% pour la classe 2. Ceci explique les premières tendances observées.

Les calculs de droites de régression entre les notes attribuées par classe et les paramètres signaux confirment les tendances observées par l'écoute.

	notes classe1	notes classe 2
dBA	0,00	0,24
dBB	0,08	0,25
sones	0,27	0,78
acum	0,20	0,15
SpecRoughH4	0,05	0,04
SpecRoughH9-15	0,50	0,54
Roughness	0,44	0,38
L_H6 (dBB)	0,11	0,09
L_H4 (dBB)	0,01	0,07
L_H2 (dBB)	0,14	0,13

*Tableau 10 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 2 classes du test hédonique*

Choisissons les deux paramètres indépendants les plus pertinents pour chaque classe :

$$\text{class1} = -39.12 \text{ SpecRoughH9\_15} - 0.06 L_{H_2} + 8.12 \text{ avec } r^2 = 0.66$$

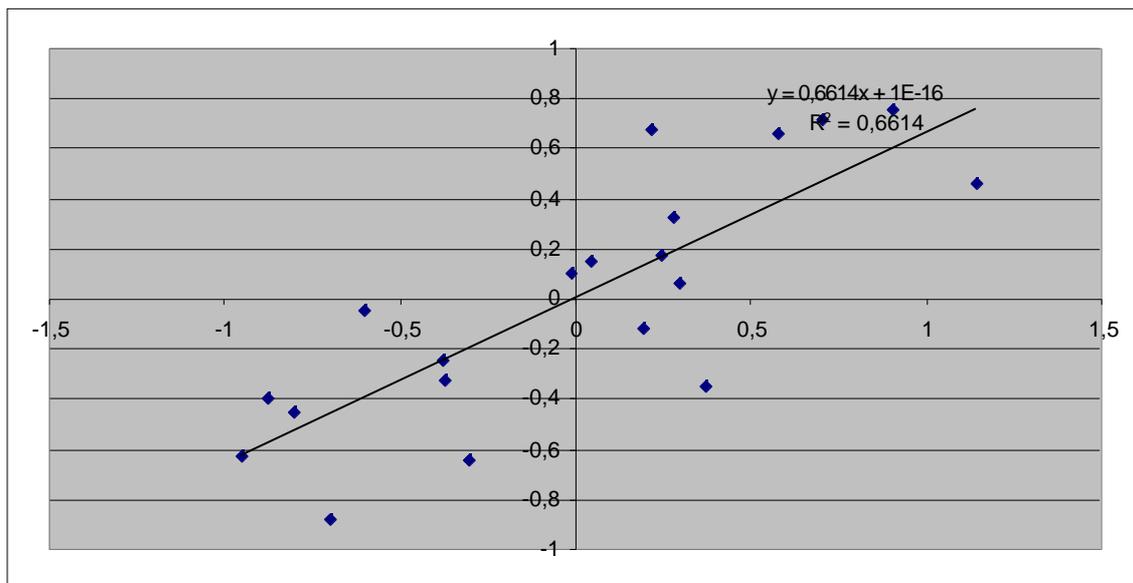


figure 24 régression linéaire entre les notes de la classe 1 et les paramètres *specRoughH9\_15* et

$$L_{H_2}.$$

$$\text{classe2} = 30.99 \text{ SpecRoughH9\_15} + 0.38 \text{ sonie} - 9.67 \text{ avec } r^2 = 0.91$$

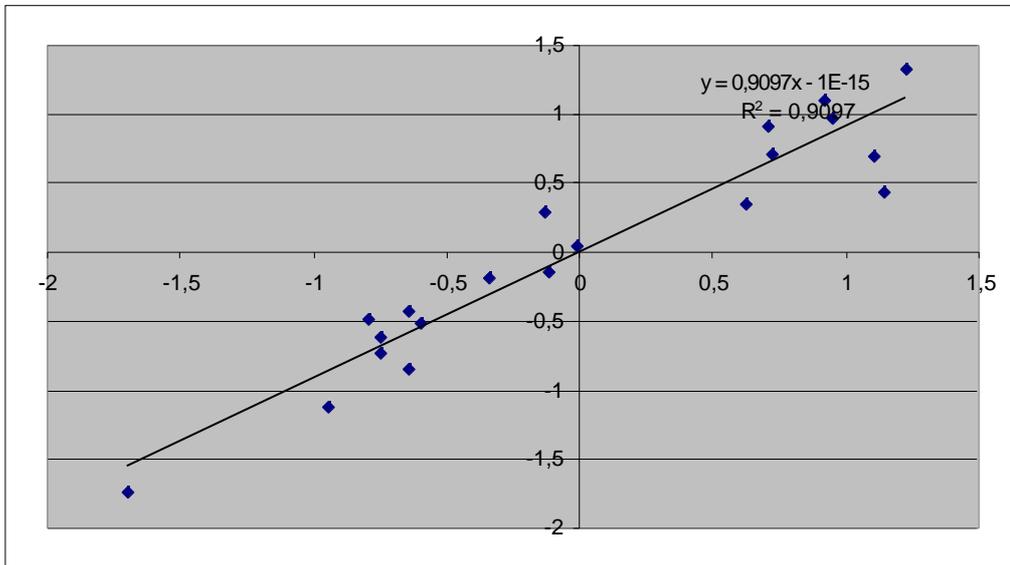


figure 25 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres *specRoughH9\_15* et

*sonie*.

Ainsi, le groupe de sujets sondé se divise en deux classes : certains aiment les sons de véhicules sport, et par là le niveau de bruit et la rugosité. Au contraire, les autres n'aiment pas les sons de véhicules sport, en particulier les sons rugueux.

### 3. Analyse du test sur la gêne

Les juges devaient évaluer la gêne procurée par l'écoute de 16 sons.

Nous calculons la moyenne des notes attribuées par les juges et réalisons le classement des sons du moins gênant au plus gênant (cf annexe V). La plage des notes utilisée est très large, ce qui indique la discriminabilité des sons. Pour le confirmer, nous réalisons une ACP sous Spad.

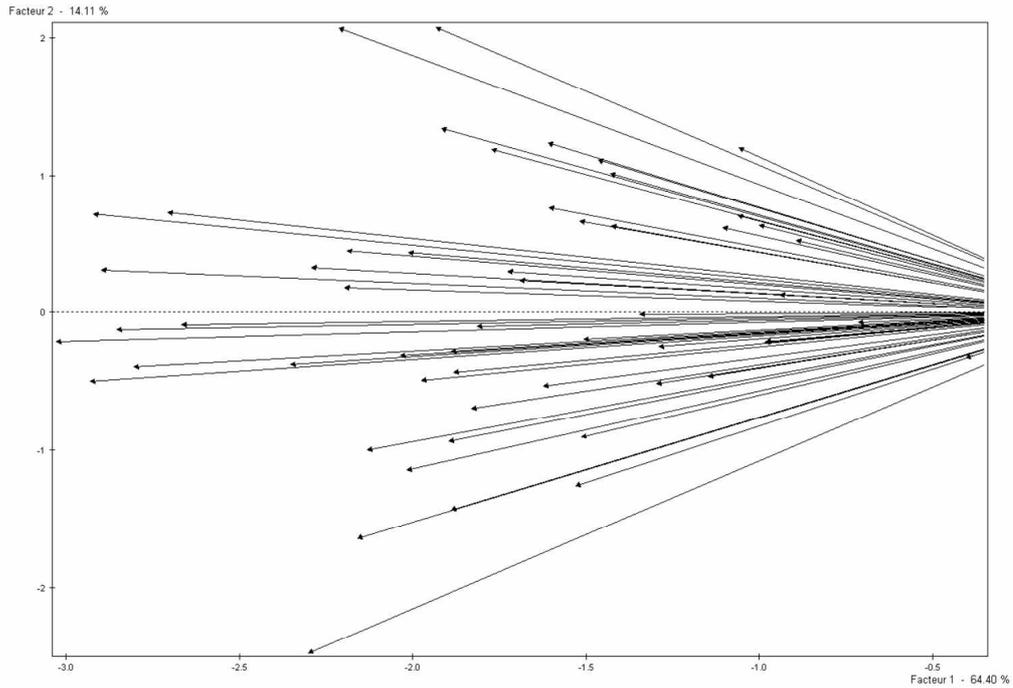


figure 26 corrélations associées au test de gène

Le premier axe explique 64% de variance et est unanimement suivi par les juges pour noter la gène perçue.

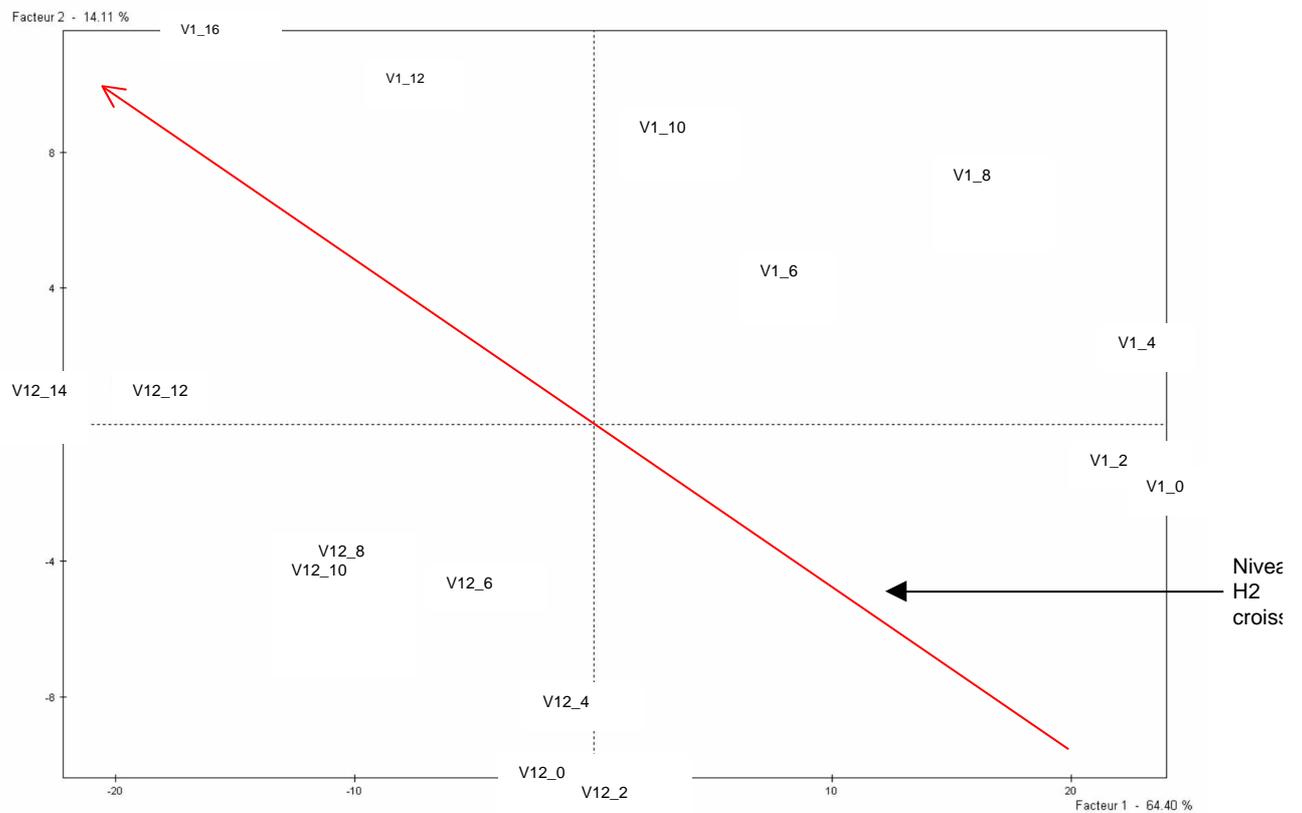
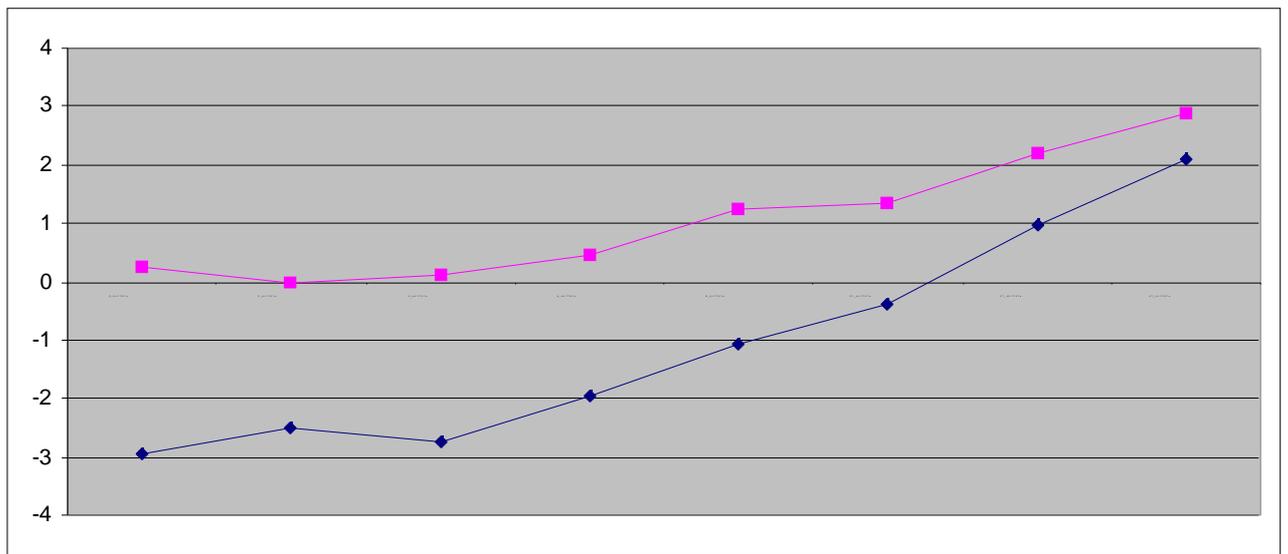


figure 27 projections associées au test de gène

Les sons sont projetés sur les deux axes principaux. L'axe rouge est ajouté à l'analyse : celui-ci semble suivre le niveau de H2. Ce dernier paramètre n'est donc pas le principal facteur de la gêne perçue (qui est le Facteur 1).

La courbe suivante représente les notes attribuées par son : en rouge sont représentées les notes des sons issus de la V12, en bleu, ceux de la V1. L'axe des abscisses suit l'augmentation du niveau de la H2.



*figure 28 notes moyennes par sons*

Ainsi, V12 est a priori plus gênante que V1. Par ailleurs, à partir d'un certain seuil de niveau de H2 (correspondant à  $L_{H2}+8\text{dB}$ , soit environ 73.5 dBB), l'augmentation du niveau de H2 augmente la sensation de gêne.

#### Corrélations avec les paramètres signaux :

Nous calculons les coefficients de détermination entre les notes moyennes attribuées à chaque son et les paramètres signaux. Disposant de 16 produits (les sons), la régression est significative à 1% pour un coefficient de corrélation supérieur à 0,388.

	note gêne
L_H2 (dBB)	0,60
L_H_moy (dBB)	0,51
dB	0,92
dBA	0,97
dBB	0,86
sone	0,97
acum	0,10

Tableau 11 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes du test de gêne

La sensation de gêne est fortement corrélée à la sonie. La première composante principale mis en évidence par ACP correspond effectivement à la sonie. La deuxième composante principale semble liée à l'acuité.

Nous effectuons une régression linéaire entre les notes et deux paramètres importants : le niveau de H2 et l'acuité :

$$\text{notes} = 0.37 L_{H_2} + 11.9 \text{ Sharp} - 36.31 \quad r^2 = 0.88$$

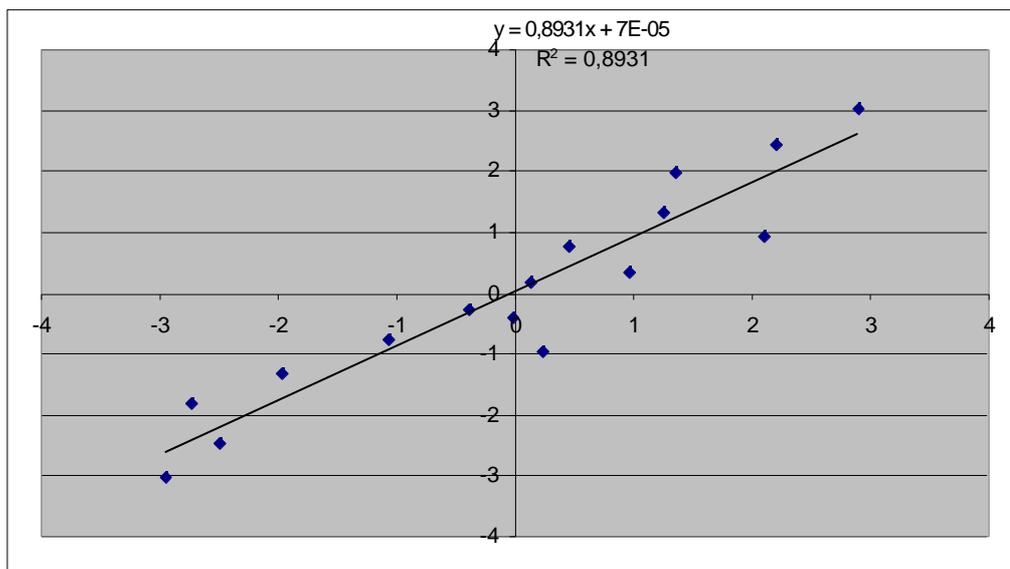


figure 29 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres  $L_{H_2}$  et Sharp .

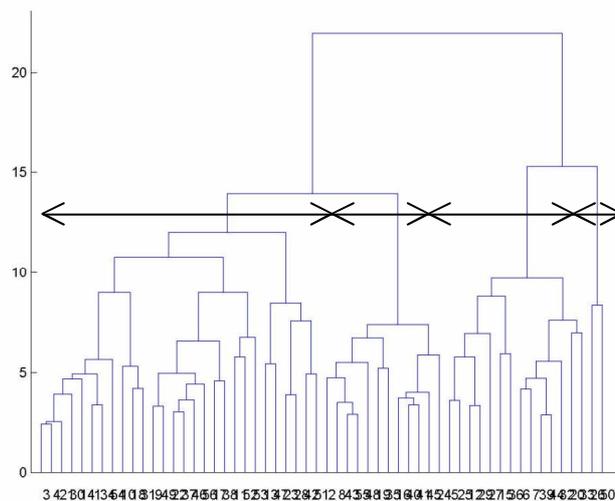
Ainsi, la gêne n'est pas uniquement dépendante du niveau de H2.

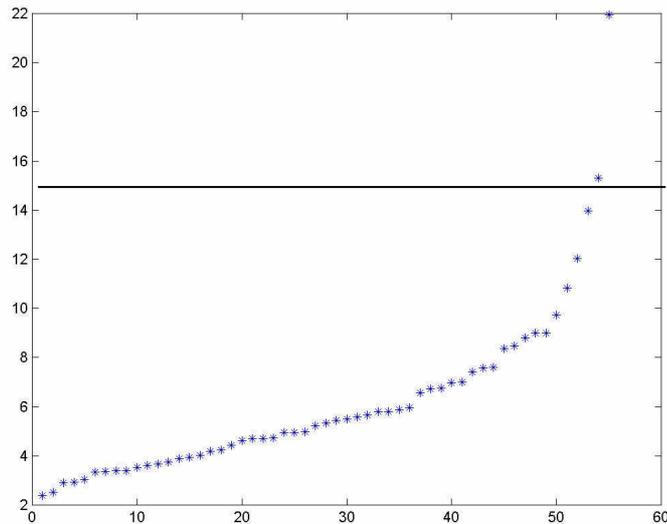
Pour résumer, à partir d'un certain seuil, l'augmentation du niveau de H2 augmente la gêne ressentie. Mais il apparaît que le paramètre quantifiant efficacement la gêne est le paramètre psychoacoustique sonie.

#### 4. Analyse du test sur la rugosité

Dans ce test, les juges doivent évaluer le caractère rugueux d'une série de 18 sons.

Afin de mettre en évidence les différents ressentis des juges, nous réalisons une CAH. Nous obtiendrons ainsi des classes de sujets ayant une perception homogène de la rugosité.

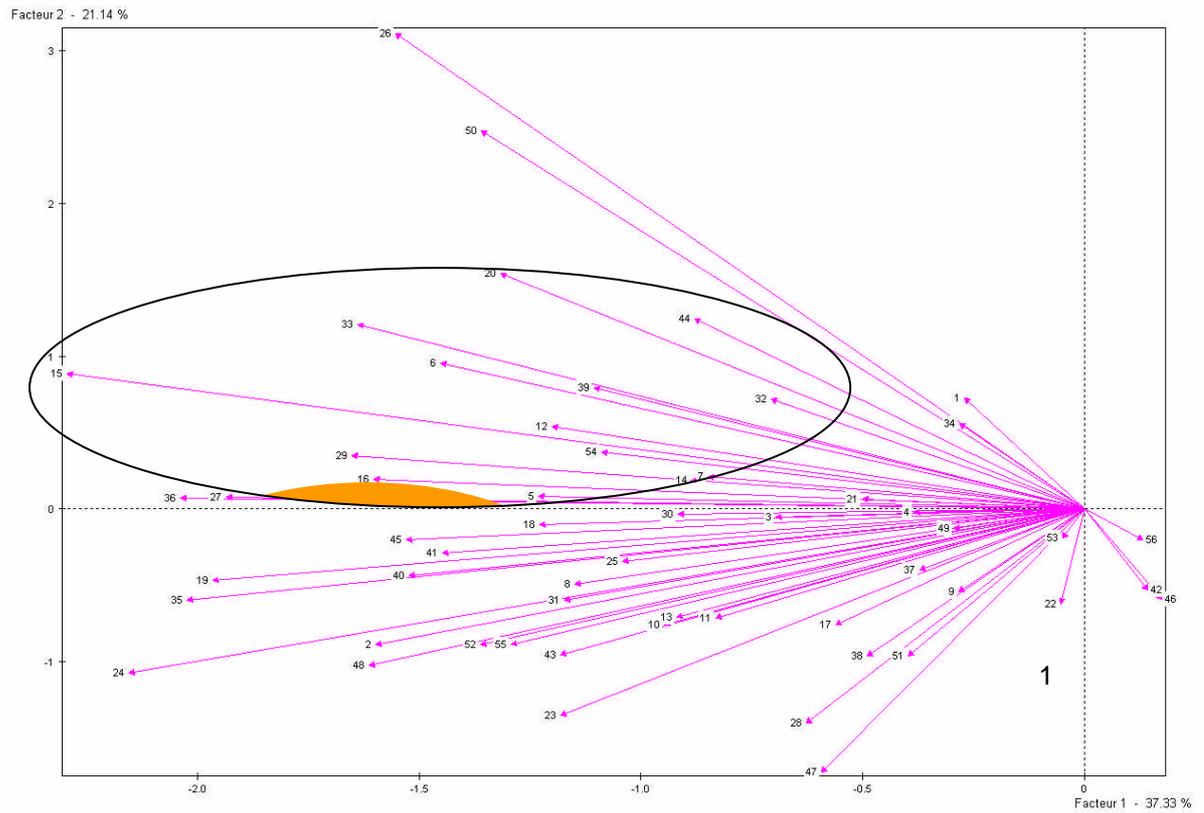




*figure 30 dendrogramme et courbe d'inertie associés au test de rugosité*

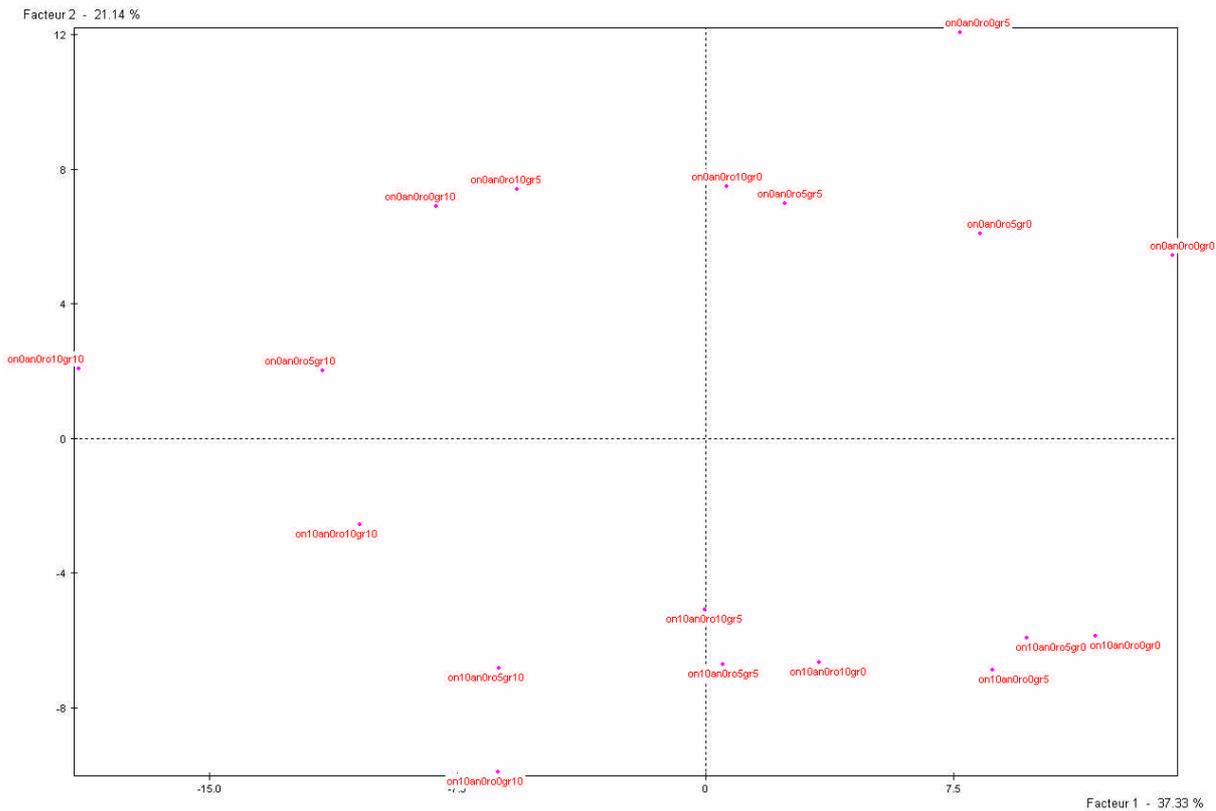
L'observation de la courbe d'inertie et l'écoute des classements de rugosité des sons effectués par les groupes formés nous poussent à répartir les juges en 4 classes. La classe 4 ne compte que deux juges et le classement effectué est marginal. Nous décidons de ne pas tenir compte de cette classe. Nous conservons trois classes (numérotées de 1 à 3) comptant respectivement 28, 12 et 14 sujets. L'écoute des classements de rugosité effectuée pour chacune des classes laisse entendre des différences : l'influence du bourdonnement sur la rugosité varie d'une classe à l'autre. Ceci se vérifie à l'étude des verbalisations : certains écoutent les sons "métalliques aigus", alors que d'autres pensent que la rugosité "convient mieux à un son grave" et nécessite "un note forte en fond". Toutefois, le son jugé le plus rugueux est le même pour les trois classes : c'est celui dont on a augmenté le niveau des harmoniques H3.4 H4 H4.5 et des harmoniques H9-H15. Par ailleurs, il semble que tous les juges perçoivent plus de rugosité à l'écoute des harmoniques H9-H15 qu'à l'écoute des harmoniques H3.5 H4 H4.5.

Nous effectuons une ACP sous Spad pour approfondir l'analyse :



*figure 31 corrélations associées au test de rugosité*

Les deux premières composantes principales expliquent 58% de la variance. Les juges suivent pratiquement unanimement l'axe 1 pour juger la rugosité. Les trois classes sont toutefois distinguables. Les notes de deux juges (appartenant à la classe 4) ne sont pas prises en compte.



*figure 32 projections associées au test de rugosité*

La projection des sons sur les deux axes principaux montre que l'axe 2 est corrélée au niveau de H2 : les sons se situant dans le demi plan haut ont un niveau de H2 inférieur de 10 dB aux sons placés dans le demi plan bas de la projection.

La classe 1 préconise plus de niveau de H2 pour sentir plus de rugosité, contrairement aux classes 2 et 3, ce qui va dans le sens des premières observations.

#### Corrélations avec les paramètres signaux :

Il faut relier les ressentis des sujets aux paramètres acoustiques et psychoacoustiques. Pour cela, nous calculons les coefficients de corrélation liant les paramètres signaux et les notes moyennes attribuées aux sons pour chaque classe. Disposant de 18 produits (les sons), la régression est significative à 1% pour un coefficient de corrélation supérieur à 0,348. Les coefficients sont rassemblés dans le tableau suivant :

	notes classe 1	notes classe2	notes classe3
roughness	0,30	0,54	0,75
L_H2 (dBB)	0,17	0,03	0,26
dB	0,31	0,13	0,14
dBA	0,49	0,38	0,00
dBB	0,39	0,21	0,06
sonie	0,72	0,57	0,02
sharp	0,00	0,07	0,55
SpecRough H4	0,20	0,39	0,29
SpecRough H9-H15	0,46	0,57	0,58

Tableau 12 coefficients de détermination entre les paramètres signaux et les notes des 3 classes du test de rugosité

Le coefficient SpecRoughH9-H15 est plus pertinent que le paramètre Roughness (pour les juges des classes 1 et 2) ; en revanche, le coefficient SpecRoughH4 n'est corrélé aux notes des juges que pour la classe 2. Nous avons déjà remarqué que la sensation de roucoulement n'était pas discriminée de la sensation de rugosité râpeuse au travers des classements des différentes classes de juges.

La classe 1 est fortement corrélée à la sonie alors que la classe 3 ne l'est pas du tout. La classe 3 est fortement corrélée au paramètre Roughness. Les verbalisations de la classe 3 étant plus précises que celles de la classe 1, nous pensons que les juges de la classe 3 étaient moins "naïfs" que ceux de la classe 1, et par là distinguaient le caractère rugueux de l'intensité du son. Quant à la classe 2, c'est la seule à ne pas présenter de corrélation avec le niveau de H2 : la classe 1 est corrélée positivement avec le niveau de H2 (qui est corrélé à la sonie), la classe 3 est corrélée négativement avec le niveau de H2.

Pour approfondir l'influence des paramètres signaux sur les trois classes, nous effectuons une régression linéaire entre deux paramètres indépendants et les notes, en prenant soin d'obtenir la meilleure variance possible. Nous privilégions le paramètre dBA, plus physique, au paramètre Sonie. Les coefficients de corrélation entre paramètres sont rassemblés en annexe.

$$\text{Classe 1 : } notes = 49.74 \text{ SpecRoughH9\_15} + 0.21 \text{ dBA} - 19.38 \quad r^2 = 0.76$$

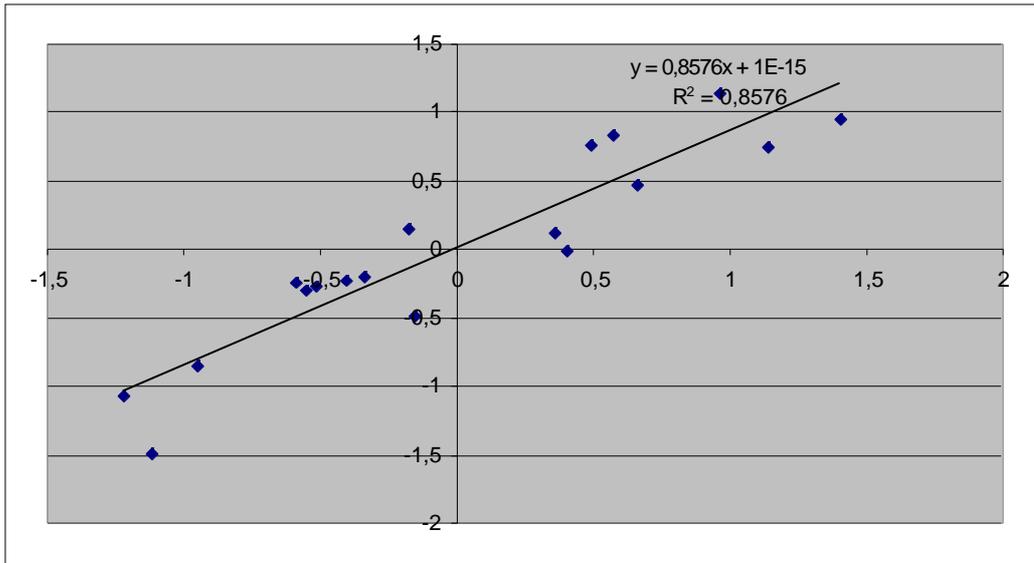


figure 33 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres *specRoughH9\_15* et *dBA*.

Classe 2 :  $notes = 120.10SpecRoughH9_15 + 0.42dBA - 41.61 \quad r^2 = 0.86$

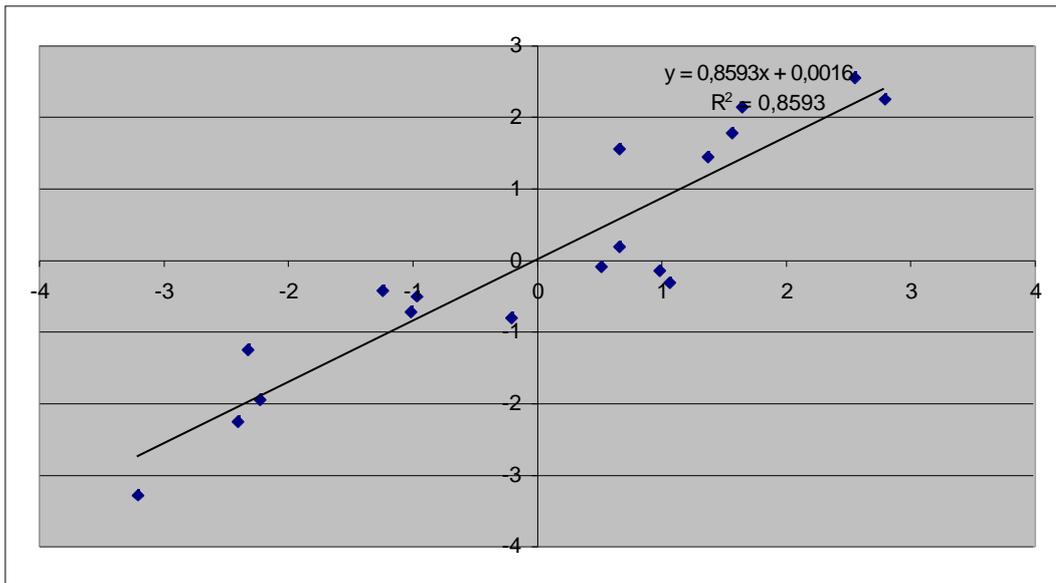


figure 34 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres *specRoughH9\_15* et *dBA*.

Classe 3 :  $notes = 127.50 \text{ SpecRoughH9}_15 - 0.17 L_{H_2} - 2.84 \quad r^2 = 0.83$

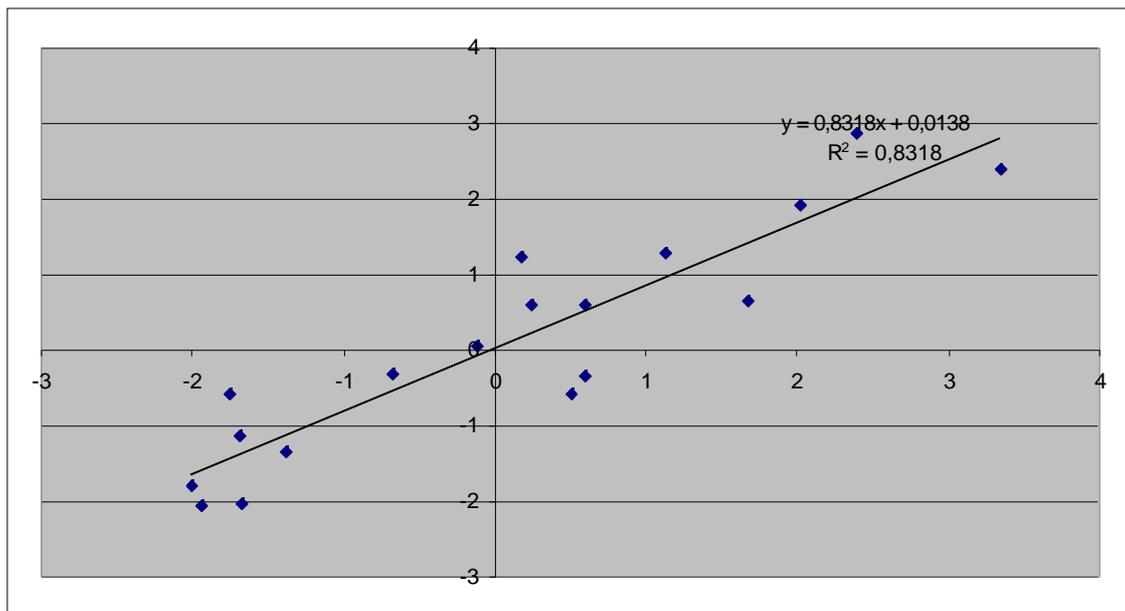


figure 35 régression linéaire entre les notes de la classe 2 et les paramètres *specRoughH9\_15* et  $L_{H_2}$ .

Les trois classes présentent des notes corrélées à *SpecRoughH9-15*. Les juges des classes 1 et 2 perçoivent plus de rugosité quand les sons sont plus forts ; ceux de la classe 3 ne sont pas influencés par le niveau sonore.

La régression effectuée entre les paramètres *Roughness* et  $L_{H_2}$ , et les notes de la classe 3 n'apporte pas de meilleure variance. Ainsi, la paramètre *SpecRoughH9-15* est parfaitement efficace.

Pour résumer, les régressions effectuées sont significatives et confortent les tendances observées lors de l'analyse ACP : le jugement de rugosité s'effectue principalement à l'écoute du râpeux des harmoniques H9-H15. Le paramètre *SpecroughH9-15* est adapté pour quantifier la rugosité. Par ailleurs, certains juges pensent que le niveau de H2 augmente la rugosité perçue, d'autres pensent le contraire.

## Chapitre IV. Discussion

### I. Confrontation résultats/hypothèses

Les analyses des tests de typage sonore ont permis de montrer que, comme nous l'avions présumé, les attributs perceptifs rugosité et bourdonnement influent sur le typage sport du bruit moteur. Par ailleurs, nous avons remarqué que chaque auditeur privilégie l'un ou l'autre de ces attributs en fonction de sa propre représentation du typage sport. Ainsi, l'existence de sous-classes est montrée. Il serait intéressant de poursuivre cette étude en faisant le lien entre ces sous-classes de juges et les catégories clients. Ainsi le bruit moteur pourra être travaillé en fonction de la cible client visée.

Les résultats du test de rugosité n'ont pas permis de vérifier notre hypothèse. En effet, la décomposition de phénomène auditif de rugosité en roucoulement et rugosité râpeuse n'a pas été mise en évidence. Dans notre test, les juges ont plutôt écouté le caractère râpeux pour évaluer la rugosité. Ainsi, le paramètre SpecRoughH9-15 apparaît comme quantitatif de la rugosité.

L'influence du niveau de l'harmonique H2 varie selon la perception des différents juges. Certains juges se sont avérés être de très bon "verbalisateurs", en employant des termes spécifiques au domaine de l'acoustique. Nous pensons que ces sujets avaient un certain niveau d'expertise dans ce domaine. Ces juges, les plus "experts", pensent que le niveau de H2 a tendance à diminuer la rugosité perçue. Les autres pensent le contraire. En fait, l'harmonique H2 augmentant, le niveau global s'élève, laissant percevoir à certains juges plus de rugosité. Comme les harmoniques responsables de la rugosité sont éloignées en fréquence de l'harmonique H2, le phénomène de masquage est moindre. En revanche, plus le son est fort, plus il est pénible et donc, pour certains, plus rugueux. Ce dernier avis semble être celui qui nous importe puisque nous nous intéressons plus à la perception de conducteurs que d'"experts" en acoustique. Il serait pertinent de contrôler plus le niveau d'expertise des sujets, et choisir des sujets parmi les clients de PSA.

A partir d'un certain niveau, plus l'harmonique H2 augmente, plus la gêne se renforce. Cette harmonique est alors émergente et nous sommes en présence d'une bosse de bourdonnement. Mais la gêne dépend d'autres paramètres que le niveau de l'harmonique H2, comme par exemple de l'acuité. En fait, la gêne est surtout liée à la sonie.

Comme nous le supposions, les harmoniques paires H2, H4 et H6 influent sur le bourdonnement perçu. Il faut que le niveau de ces harmoniques soit suffisamment élevé et que le niveau de l'harmonique H6 par rapport à celui de l'harmonique H2 ne soit pas trop faible pour percevoir la variation formantique du bruit moteur.

Le test hédonique ajoute que certains juges apprécient les sons de moteur fort et rugueux, contrairement à d'autres. Remarquons que les juges n'appréciant guère niveau et rugosité sont

ceux qui composent principalement la classe 1 du test +/- sport, classe qui n'est pas homogène. Ainsi, interroger des juges qui ne sont pas sensibles à la sportivité du son moteur n'est pas judicieux.

L'objectif principal de cette étude était de trouver les paramètres signaux qui contrôlent le typage sport du bruit moteur. Nous avons mis en évidence les paramètres principaux :

- La sonie influe sur la sportivité. Nous lui préférons le paramètre dBA, plus physique.
- Le paramètre SpecRoughH9-H15 est représentatif de la rugosité.
- Le niveau global et les niveaux relatifs de H2-H4-H6 joue un rôle dans la perception du bourdonnement.

## II. Remarques sur le processus expérimental

Les sons des tests étaient pour la plupart artificiels, et pourtant personne n'a émis de remarques à ce sujet (sauf pour le test de gêne dans lequel certains sons étaient volontairement exagérés).

Les sons préparés pour les tests se ressemblaient beaucoup. Aussi, beaucoup de juges ont été décontenancés par l'expérience et pensaient avoir répondu au hasard. Pourtant, tous les classements effectués suivent une certaine logique. En fait, les réponses aux tests sont souvent intuitives si bien que le juge n'a pas conscience de sa stratégie de jugement. Un exemple particulièrement frappant de ce phénomène est le résultat du test sur la gêne : le classement moyen est fortement corrélé à la sonie. Or, les sons du test étaient tels que même un groupe de juges expert ne pourrait classer si bien les sons selon le niveau perçu. Il apparaît donc que sous couvert de classement selon la gêne, les juges ont inconsciemment jugé le niveau.

Le niveau d'expertise des sujets tant en acoustique qu'en connaissance de la voiture n'était pas homogène. Pour être au plus proche du ressenti du client, il faudrait interroger le client lui-même (et non des collaborateurs PSA) !

## III. Conclusion et perspectives

En conclusion, différentes "images auditives" du typage sport ont été mises en évidence. Elles sont liées à des paramètres signaux tels que la sonie, SpecRoughH9-H15 et les niveaux des harmoniques H2, H4 et H6. Pour concrétiser ces résultats, il faut d'une part les attribuer à des catégories de clients. Ainsi, l'élaboration de cibles sonores de bruit moteur sera facilitée. D'autre part, il faut approfondir les connaissances des effets de modifications techniques sur les paramètres signaux.

D'autres attributs perceptifs du bruit moteur influent sur le typage. Il s'agit d'attributs contenus dans la partie bruitée du bruit moteur comme par exemple les sons 'sss', 'fff'. L'analogie entre signal moteur et signal de parole nous semble pertinente et nous pensons qu'il serait judicieux de l'étendre à ces autres composantes du bruit moteur, d'autant plus que les descripteurs générés en analyse sensorielle sont presque tous formés à partir d'onomatopées.

Par ailleurs, l'analogie formantique doit s'étendre de l'analyse d'attributs perceptifs à l'analyse globale du typage sonore.

Dans un test de catégorisation, au lieu de demander aux sujets de décrire les groupes de sons formés avec des mots, on peut leur demander de le chanter ou de l'imiter à l'aide d'onomatopées. Le même travail peut être effectué pour le typage du bruit moteur d'un seul véhicule au travers de toutes ces situations de vie.

Le sujet chante ce qu'il considère comme primordial dans le signal, en tous cas ce pour quoi il a regroupé ces sons particuliers. Ainsi, dans l'analyse des signaux chantés, on a directement accès à l'information importante pour le sujet. De plus, on reste dans le domaine sonore : il y a imitation sonore ; il est donc bien plus direct de trouver des paramètres signal caractéristiques du groupe d'échantillons. On bénéficie de plus des techniques de traitement de la parole déjà développées. En outre, un événement acoustique est une fonction du temps : un son chanté aussi, pas un mot. Avec cette technique, on garde ainsi l'évolution temporelle, les transitoires, qui contiennent une grande partie de l'information associée au timbre.

Ainsi, le chant paraît être un indice efficace pour décrire le ressenti auditif.

## Bibliographie

Aurès, W. (1985). Un procédé de calcul de la rugosité. *Acoustica*, 58.

Gaver, W. W. (1993). What in the world do we hear ? An ecological approach to auditory source perception. *Ecological Psychology*, 5 (1) , 1-29.

Grey, J.M. (1977) Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *Journal of Acoustical Society of America*, 61, 1270-1277

Helmholtz, (1868). *Théorie physiologique de la musique*.

Helmholtz, H. von. (1877). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. 1877, 6th ed., Braunschweig: Vieweg, 1913; trans. by A.J. Ellis as *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*" (1885). Reprinted New York: Dover, 1954.

Leclere, N. (1998). Etude de la coloration des bruits moyennes fréquences du groupe moto-propulseur. *Rapport de stage PSA/PEFH*

Lescop, O. (2001). Caractérisation par métrologie sensorielle de bruits d'habitacle automobile pour la qualification du Typage Sport. *Rapport d'activité acoustique 4. PSA/PEFH*

Martner, O., Zerbs, C., John Feng, B. (2002). Psychoacoustic model for the objective determination of engine roughness. *Sound quality symposium*, Dearborn, Michigan.

McAdams, S., Winsberg, S., Donnadieu, S., De Soete, G., Krimphoff, J. (1995) "Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes", *Psychological Research* 58, 177-192.

McAdams, S. (1997). l'organisation perceptive de l'environnement sonore. *Rencontres IPSEN en ORL*.

Pressnitzer, Daniel : Perception de rugosité psychoacoustique: D'un attribut élémentaire de l'audition à l'écoute musicale, *Thèse: Acoustique, Traitement de Signal et Informatique Appliqués à la Musique*, Octobre 1998.

Repp, B. H. (1987). The sound of two hands clapping : an exploratory study. *Acoustical Society of America*, 81 (4) , 1100-1109.

Richard, F., Roussarie, V. (2002). Catégorisation sonore : approche méthodologique. Cas de la coloration moteur. *Note technique PSA/PEFH.*

Richard, F., Roussarie, V. (2002). Analyse-resynthèse sonore : présentation des outils Additive et jMax. *Note technique PSA/PEFH.*

Richard, F., Roussarie, V. (2002). Analyse-resynthèse de signaux sonores pour la qualification de l'identité sonore des véhicules. HARTIS : HARmonics Real-Time Synthesis. *Note technique PSA/PEFH.*

Terhardt, E. (1974). On the perception of periodic sound fluctuations (roughness), *acustica 30*, 201-213.