



PSA PEUGEOT CITROËN



# **MASTER Sciences De l'Ingénieur**

**Option Mécanique et Ingénierie des Systèmes**  
**Acoustique, Traitement de signal, Informatique pour la Musique**

**Présenté par :**

**Vincent Hédont**

## **Etude de la qualité sonore d'appareils de soufflage et de climatisation**

**Responsables de stage :**

**Stéphanie Viollon  
Vincent Roussarie  
Edouard Siekierski  
Sandrine Segrétain**

**Année 2005**

**Collaboration Interaction Acoustique et Thermique**

**EDF Etudes et Recherches /**

**PSA Peugeot Citroën Perception et Facteurs Humains**



# Remerciements

---

Je remercie Michel GUIVARCH pour m'avoir accueilli dans l'équipe AMA T63 d'Etudes et Recherches pour travailler pendant 5 mois sur ce sujet d'acoustique intérieure.

Je tiens à remercier mes encadrants Stéphanie VIOLLON et Edouard SIEKIERSKI d'EDF et Vincent ROUSSARIE et Sandrine SEGRETAIN de PSA Peugeot Citroën, pour m'avoir guidé et communiqué leur expérience tout au long du stage. Le travail en équipe a permis la confrontation des points de vue de chacun et une réflexion approfondie qui ont contribué à la réussite du projet.

Je remercie aussi les intervenants extérieurs qui m'ont aidé au cours du stage, Mickaël SAUVAGE pour l'acquisition des sons, les statisticien(nes) de PSA, Pauline Faye et Emmanuelle DIAZ ainsi que Justin qui ont répondu à mes nombreuses questions et corrigé mes erreurs avec gentillesse.

Merci à Marinette pour le bon café à EDF le matin, aux collègues qui ont testé les interfaces des tests.

Merci à l'agent du garage EDF pour le prêt de voitures avec autoradio lors des trajets dans les bouchons à Vélizy.

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	<b>3</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Introduction sur les sons de soufflage</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Indicateurs physiques utilisés pour l'étude des sons</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. Intensité du son</b> .....	<b>7</b>
2.1.1. Définition de la sonie .....	7
2.1.2. Mesure de la sonie.....	8
2.1.3. Niveau de pression acoustique .....	8
2.1.3.1. Echelle des décibels .....	8
2.1.3.2. Expression de la valeur du seuil différentiel d'intensité $\Delta I/I$ .....	9
2.1.3.3. Mesure du niveau de pression acoustique .....	9
2.1.3.4. Fonctions de pondérations.....	10
2.1.4. Attributs fréquentiels des sons .....	10
2.1.4.1. Effets de masquage .....	10
2.1.4.2. Filtres auditifs et bandes critiques.....	11
<b>2.2. Descripteurs psychoacoustiques spécifiques</b> .....	<b>11</b>
2.2.1. Rugosité et force de fluctuation .....	11
2.2.1.1. Centre de gravité spectral et acuité .....	13
<b>2.3. Indicateur spécifique aux sons de soufflage</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Constitution du corpus de sons</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1. Système d'acquisition des sons</b> .....	<b>15</b>
3.1.1. Prise de son avec une tête instrumentée.....	15
3.1.2. Détails du système .....	16
<b>3.2. Contexte des prises de sons</b> .....	<b>16</b>
<b>3.3. Réduction du corpus sonore</b> .....	<b>17</b>
<b>4. Tests perceptifs sur les sons du corpus réel</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1. Mise en place pratique des tests</b> .....	<b>18</b>
4.1.1. Chaîne de restitution .....	18
4.1.1.1. Composition de la chaîne de restitution .....	18
4.1.1.2. Calibration de la chaîne de restitution.....	19
4.1.1.2.1. Réponse en fréquence.....	19
4.1.1.2.2. Gain de à la diffusion .....	19
4.1.2. Interface et sujets des tests .....	20
<b>4.2. Test de comparaison par paires sur la préférence</b> .....	<b>20</b>
4.2.1. Traitement des résultats.....	21
4.2.1.1. Calcul de notes sur les occurrences de préférence .....	21
4.2.1.2. Calcul des Scores de Bradley et Terry .....	22
4.2.1.3. Comparaison entre les scores de B&T et les notes sur les occurrences .....	23
4.2.2. Analyse des résultats .....	24
4.2.2.1. Discussion sur les scores de B&T .....	24
4.2.2.2. Mise en relation avec les indicateurs physiques.....	25
4.2.3. Synthèse .....	27
<b>4.3. Test de comparaison par paires sur la dissemblance</b> .....	<b>28</b>
4.3.1. Traitement des résultats.....	28
4.3.1.1. Eléments de théorie .....	28
4.3.1.1.1. Calcul des distances.....	29
4.3.1.1.2. Construction de l'espace multidimensionnel.....	30

4.3.1.2.	Traitement des données brutes .....	31
4.3.1.2.1.	Réduction des matrices de dissemblance .....	31
4.3.1.2.2.	Calcul pratique d'un espace multidimensionnel.....	31
4.3.1.2.3.	Modèles multidimensionnels calculés .....	32
4.3.2.	Analyse des résultats .....	33
<b>4.4.</b>	<b>Mise en relation des résultats des deux tests</b> .....	<b>34</b>
4.4.1.	Traitement .....	34
4.4.2.	Analyse.....	34
4.4.2.1.	Plan factoriel 1/2 .....	34
4.4.2.2.	Plan factoriel 1/3 et 3/4 .....	36
4.4.3.	Synthèse .....	38
<b>4.5.</b>	<b>Questions à caractère évocatif</b> .....	<b>39</b>
4.5.1.	Traitement des résultats.....	40
4.5.2.	Analyse des résultats .....	40
4.5.3.	Synthèse .....	45
<b>5.</b>	<b>Création d'un corpus de sons de synthèse.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.</b>	<b>Objectifs.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.</b>	<b>Choix des sons réels pour la synthèse.....</b>	<b>46</b>
<b>5.3.</b>	<b>Création des sons des synthèse .....</b>	<b>47</b>
5.3.1.	Ajout de la composante bruitée.....	47
5.3.2.	Egalisation en sonie.....	49
5.3.3.	Indicateurs calculés pour les sons de synthèse.....	50
<b>6.</b>	<b>Tests perceptifs sur les sons de synthèse.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1.</b>	<b>Mise en place .....</b>	<b>51</b>
<b>6.2.</b>	<b>Test de comparaison par paires sur la préférence .....</b>	<b>52</b>
6.2.1.	Traitement des résultats.....	52
6.2.1.1.	Calcul des notes sur les occurrences de préférence.....	52
6.2.1.2.	Modèle de Bradley Terry sur la préférence.....	52
6.2.1.3.	Comparaison entre les scores de B&T et les notes sur les occurrences .....	53
6.2.2.	Analyse des résultats .....	53
<b>6.3.</b>	<b>Test de comparaison par paires en dissemblance .....</b>	<b>55</b>
6.3.1.	Traitement des résultats.....	55
6.3.1.1.	Modèles multidimensionnels calculés.....	55
6.3.1.2.	Modèle multidimensionnel non métrique à 4 dimensions.....	55
<b>6.4.</b>	<b>Mise en relation des résultats des deux tests .....</b>	<b>56</b>
6.4.1.	Traitement .....	56
6.4.2.	Analyse.....	57
6.4.2.1.	Plans factoriels 1/2 et 1/3 .....	57
6.4.2.2.	Plan factoriel 3/4 .....	59
6.4.3.	Synthèse .....	60
<b>Conclusion .....</b>	<b>61</b>	
<b>Bibliographie.....</b>	<b>62</b>	

# Introduction

---

Les sons qui nous entourent ne cessent d'augmenter à la fois en quantité et en diversité. En ville, nous sommes entourés d'un bruit de fond sourd et incessant, et le paysage sonore des villes [1] évolue sans cesse. Cependant, les nouveaux objets technologiques utilisent pleinement nos capacités sensorielles et ont favorisé l'apparition de sons à but fonctionnel : sonnerie du téléphone, signal d'annonce dans les gares, signal d'alerte pour l'oubli d'extinction des phares de voitures. D'autres sons générés par des objets dont ce n'est pas la vocation initiale apparaissent dans notre environnement sonore et excitent nos sens de manière transversale. L'impact visuel d'un objet est non négligeable sur l'appréciation de la gêne perçue par les sources acoustiques [2]. Par extension, il semble difficile d'étudier la perception acoustique d'un objet en isolant simplement ses fonctionnalités acoustiques. On ne peut pas séparer l'impact sensoriel thermique, visuel ou même tactile de l'objet sonore d'étude, de ses caractéristiques acoustiques.

L'étude qui suit, concerne les sons produits par les systèmes de soufflage d'air conditionné dans un contexte d'interaction acoustique et thermique. Que ce soit dans l'habitat ou dans un véhicule, les constructeurs souhaitent améliorer le confort pour répondre aux attentes des consommateurs. C'est pour répondre à ces questions que les industriels EDF et PSA mènent en partenariat une étude sur la qualité acoustique des appareils de climatisation et soufflage en contexte d'interaction acoustique et thermique. Le confort est le produit de l'intégration de plusieurs modalités sensorielles. Or, mesurer une perception est complexe, ce qui oblige à l'identification des sensations monodimensionnelles mises en jeu.

Cette année, l'orientation choisie pour le partenariat est acoustique, et le but du stage est de développer des connaissances sur l'espace sonore des bruits de soufflage d'un point de vue physique et perceptif. Le mémoire se divise globalement en 3 parties : une première partie est consacrée à l'introduction aux sons de soufflage et aux indicateurs psychoacoustiques utilisés pour leur description physique. La seconde partie concerne l'acquisition de sons de soufflage /air conditionné et leur réduction en un corpus exploitable lors de tests perceptifs acoustiques. Dans la troisième partie, il est question de la mise en place de deux tests d'écoute de sons réels, de sons de synthèse et de leur analyse.

## 1. Introduction sur les sons de soufflage

Concernant les systèmes de soufflage/air conditionné au sens large, les études significatives sur le sujet ont été principalement menées par l'ASHRAE, *Association of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers*, depuis 1993 [3]. Des sons de systèmes de soufflage non gênants ont été enregistrés. Trois de ces sons à sonorités particulières qualifiées de « ronronnant », « rugissant » et « strident » ont abouti à la création de 3 gabarits dans les bandes d'octaves moyennes. Pour déterminer la gêne occasionnée par un son de système de soufflage/air conditionné, l'ASHRAE propose le calcul du QAI, Quality Assessment Index. Ce calcul est basé sur une mesure de la déviation en dB par bande d'octave, entre les niveaux de pression acoustique du son analysé et ceux du gabarit, « ronronnant », « strident » ou « rugissant », qui possède les mêmes niveaux de pression acoustique dans les bandes d'octave moyennes. Le problème posé par le calcul de cet indicateur de qualité est qu'il repose sur les spectres en bandes d'octave de bruits non gênants « ronronnant », « strident », « rugissant ». Mais peut-on s'accorder sur la qualification d'un bruit gênant et sur le choix du gabarit à utiliser pour le calcul du QAI ?

U.AYR, E., F.MARTELOT [4], [5] proposent de caractériser l'impact des sons de soufflage in situ auprès d'utilisateurs dans des bureaux plus ou moins occupés et à divers étages d'un immeuble. L'évaluation de la gêne occasionnée se fait par des questionnaires que l'on met en relation avec des mesures acoustiques de  $L_{Aeq}$ ,  $L_{eq}$ , sonie selon Zwicker. Elles ont montré la forte corrélation entre la gêne occasionnée et les  $L_{A90}$  mesurés.

Une étude récente a été réalisée en collaboration entre l'IRCAM et EDF [6] sur des sons de soufflage enregistrés en chambre sourde. Cette étude met en avant l'importance de la composante harmonique des signaux acoustiques par rapport à la part résiduelle bruitée due au caractère aléatoire des sons de soufflage. Elle met en évidence la relation entre les jugements de dissemblance entre sons et l'indicateur physique NHR(A), Noise to Harmonic Ratio en dBA, dont le calcul est détaillé plus loin dans le rapport. Aussi, à partir du groupe de sujets testé il a été montré qu'il existe des classes de sujets dont les perceptions sont clairement distinctes. Pour certaines classes de sujets, l'intensité subjective du son n'est pas un facteur déterminant du choix de préférence.

En ce qui nous concerne, les critères acoustiques développés sur la base de spectres en bandes d'octave ne nous semblent pas satisfaisants puisqu'ils ne tiennent pas compte de la spécificité des sons de soufflage/air conditionné qui possèdent deux composantes assez distinctes : un contenu harmonique d'une part, et une composante bruitée d'autre part. Par la suite, nous utilisons des indicateurs acoustiques faisant appel aux caractéristiques spectrales des deux composantes du signal.

## 2. Indicateurs physiques utilisés pour l'étude des sons

### 2.1. Intensité du son

#### 2.1.1. Définition de la sonie

La sonie est l'équivalent sensoriel de l'intensité physique d'un son. Elle permet d'évaluer le volume sonore réellement perçu. A l'heure actuelle, les facteurs physiques du son à l'origine des variations de la sonie ne sont certainement pas tous connus. On introduit généralement la sonie par les courbes isosones. Ce sont des courbes interpolées entre les stimuli égaux ou forces sonores de sons purs qui s'étendent sur toute la gamme fréquentielle audible présentés en incidence frontale de champ libre en écoute binaurale.

### 2.1.2. Mesure de la sonie

Lors de l'expérience, des sons purs de fréquences connues sont présentés à des auditeurs en écoute binaurale et champ libre. Les courbes d'égalité d'intensité sont obtenues en faisant varier la fréquence du son présenté tout en ajustant son niveau afin qu'il produise une même sensation de force sonore qu'un son de 1kHz. Par ailleurs, l'intensité du son correspondant à un certain niveau de pression acoustique mesuré a été augmentée jusqu'à obtenir une impression sonore jugée double par l'auditeur, correspondant à un doublement de la sonie. A savoir environ 10dB SPL pour un son pur de 1kHz.

L'unité de mesure de la force sonore est le phone. Le phone équivaut au dB SPL pour un son à pur à la fréquence 1kHz. L'oreille n'ayant pas un fonctionnement linéaire, on se ramène à une expression de la sonie réelle exprimée en sonies par la formule :

$$S = 2 \cdot 10^{(p-40)/10}$$

En résumé pour un son pur à la fréquence 1kHz :

Sonie S exprimée en sonies	Sonie P exprimée en phones	Niveau de pression acoustique
S=1	P=40 phones	L <sub>p</sub> =40dB
S=2	P=50 phones	L <sub>p</sub> =50dB

Les courbes d'isophonie mettent en évidence la sensibilité fréquentielle de l'oreille, maximale entre 500Hz et 4000Hz et incluent les niveaux de seuil minimal perceptible et le niveau de seuil de la douleur. La difficulté survient lorsqu'il s'agit de comparer la sonie d'un son pur de 2kHz avec celle d'un son complexe de spectre soit continu, soit formé de nombreuses raies. On distingue plusieurs types de sonie. Il y a la sonie réelle, évaluée par méthode directe expérimentale, et les sonies obtenues par calcul suivant des algorithmes basés sur des modèles physiques de perception des sons. Un de ces algorithmes a abouti à la norme ISO 532B, ou calcul de la sonie suivant Zwicker [7].

La sonie réelle est modulée par nombre d'effets physiologiques et psychologiques qu'il est encore difficile d'inclure dans les modèles de calculs actuels. Deux de ces aspects sont remarquables. La sonie réelle d'un son pur ou complexe est toujours modifiée par la présence d'un bruit de fond qui exerce un effet de masquage à la fois temporel et fréquentiel. De plus on remarque que l'oreille se comporte comme un intégrateur d'énergie, les résultats actuels n'étant valables que pour des sons de durée supérieure à 500ms, durée à partir de laquelle la sonie reste constante pour un son pur de niveau et de hauteur donnée. On constate aussi que la réduction de la durée d'un son entraîne une diminution de la sonie. [7]

### 2.1.3. Niveau de pression acoustique

#### 2.1.3.1. Echelle des décibels

Si l'on reprend la loi de Fechner, soit I<sub>0</sub> l'intensité physique proportionnelle à l'énergie acoustique de l'onde sonore perçue au seuil auditif et I<sub>max</sub> à celle au seuil douloureux statistique supportable pour un individu, on constate que I<sub>max</sub>/I<sub>0</sub> = 10<sup>12</sup>.

Le calcul du stimulus associé en appliquant la loi de Fechner est :

$$S = k \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{I_{max}}{I_0}\right)$$

k est a priori une constante arbitraire :

Intensité physique du stimulus W/m <sup>2</sup>	Stimulus perçu
I= I <sub>max</sub>	S=12k
I= I <sub>0</sub>	S=0k

Puisque l'intégration suivant la loi de Fechner représente la somme de toutes les fractions  $\Delta I/I$ , en posant  $k=1$  en souvenir de Graham Bel l'échelle de sensation de force sonore à 12 échelons a été proposée. Pour une intensité I<sub>max</sub>, le stimulus est alors S<sub>Bel</sub>=12 échelons. Cependant, expérimentalement, il a été constaté que le Bel était une échelle trop importante pour exprimer les  $\Delta I/I$  auditifs réels. En posant  $k=10$ , on a multiplié le nombre d'échelons d'égale sensation auditive par 10 pour obtenir 120 échelons au lieu de 12.

D'où l'échelle des décibels S<sub>dB</sub>=120 échelons.

### 2.1.3.2. Expression de la valeur du seuil différentiel d'intensité $\Delta I/I$

Ce seuil est le rapport entre la plus petite augmentation d'intensité sonore perceptible et l'intensité du son lui-même. Il est quasiment constant  $\Delta I/I=15\%$  à  $20\%$ . Il faut donc augmenter de  $20\%$  l'intensité acoustique pour que l'accroissement soit perceptible. Prenons un son mesuré à 80dB, il correspond à une intensité  $I=10^8$  W/m<sup>2</sup>. Supposons que l'on augmente de façon juste perceptible l'intensité acoustique.

Alors  $I=10^8 * 120/100=12 * 10^7$  W/m<sup>2</sup> d'où  $S=10 * \log(12 * 10^7)=0.8$ dB

L'augmentation juste perceptible ne correspond plus à un échelon exprimé en décibels. Ce dB physique étroitement lié à l'amplitude de l'onde de pression acoustique mesurée dans l'environnement de l'auditeur n'est pas une échelle de sensation auditive bien qu'elle s'en rapproche. Par exemple, elle ne tient pas compte de la sensibilité fréquentielle de l'oreille.

### 2.1.3.3. Mesure du niveau de pression acoustique

Les outils de mesure physique ont été développés pour mesurer le niveau de pression acoustique représentatif de l'intensité sonore sur la base d'un critère purement énergétique. Le niveau de pression acoustique L en dB qui dépend de la pression acoustique P instantanée exprimée en PASCAL (Pa), par rapport à une pression acoustique de référence P<sub>0</sub>=2.10<sup>-5</sup> Pa est obtenu en appliquant la formule :

$$L = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

Pour mesurer un bruit fluctuant beaucoup sur une longue durée, on utilise le niveau équivalent L<sub>eq</sub> exprimé en dB sur une durée T. Ce niveau est le niveau de pression acoustique qu'aurait un bruit de même intensité que la moyenne quadratique du bruit mesuré si il était stable et continu sur la même durée.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10 \frac{L}{10} dt \right]$$

#### 2.1.3.4. Fonctions de pondérations

La sensibilité de l'oreille est exprimée par les courbes d'isotonie représentant les niveaux nécessaires pour que deux sons purs de fréquences différentes donnent la même impression de force sonore. Trois courbes de filtrage simplifiées simulant les atténuations présentées par les courbes isotoniques passant par 40, 70, 100 dB à 1kHz font état de norme, et conduisent aux niveaux exprimés en dB(A), dB(B), dB(C). Une formule analytique en fréquence pour chacune des pondérations avec une erreur maximum inférieure à 0.5 dB est donnée par les relations suivantes avec  $x = \log(f(\text{enHz}))$  [8]

Type de pondération	Fonctions de pondération
A	$y = -184.78 + 160.66 \cdot x - 55.73 \cdot x^2 + 10.07 \cdot x^3 - 0.83 \cdot x^4$
B	$y = -147.34 + 171.11 \cdot x - 77.82 \cdot x^2 + 16.64 \cdot x^3 - 1.14 \cdot x^4$

**Tableau 1 Fonctions de pondérations [8]**

La pondération A est abondamment utilisée dans le domaine de l'acoustique environnementale, de l'acoustique industrielle et de la qualité sonore, bien qu'elle ne soit représentative que de la sélection fréquentielle de l'oreille à un niveau de 40dB SPL pour un son pur présenté binauralement en champ libre. Les calculs de densité spectrale de puissance sous MATLAB sur les sons de soufflage du test seront pondérés A à l'aide d'une routine qui fait appel à la formule analytique ci dessus.

#### 2.1.4. Attributs fréquentiels des sons

On s'est vite aperçu que la mesure de l'intensité sonore exprimée en dB (A) ou calculée en sonnes ne suffisait que de manière énergétique et globale à accéder à l'information d'agrément sonore. Les études de la perception d'un son à multiples composantes spectrales, spectre de raie présentant des tonalités marquées ou continu ont conduit à l'introduction de concepts liés au contenu fréquentiel des sons.

##### 2.1.4.1. Effets de masquage

Il y a effet de masquage lorsque deux sons entretiennent un rapport de proximité dans le domaine fréquentiel et temporel. Dans le domaine fréquentiel cet effet dépend des amplitudes relatives des sons et de  $\Delta f$  l'écart en fréquence qui les sépare. Un son pur seul génère un masquage partiel à la fois temporel et fréquentiel, les sons non perçus sont appelés sons masqués. Suivant le niveau et la fréquence du son pur, l'effet de masque temporel s'étendra sur une zone allant de 2ms avant le son pur et pourra se prolonger jusqu'à 15ms après son extinction.

Par analogie avec la lumière, prenons un son reconnaissable en temps que tel, ajouté à un bruit. Le masquage consiste en la modification des mécanismes de détection de ce signal. Dans le cas d'un spectre complexe, les niveaux des composantes fréquentielles du son dont l'amplitude sera inférieure au niveau de seuil de détection ne seront pas détectées. On peut donc considérer que ces stimuli n'induiront pas d'excitation neurale et n'entreront pas dans un mécanisme de perception. Cependant, elles peuvent toutefois produire un masquage fréquentiel partiel pourvu que le niveau du masque soit détectable.

L'effet d'un bruit blanc, c'est à dire à densité spectrale constante pour toutes les fréquences du spectre audible, sur la courbe de détection est caractéristique. Les seuils de détection ne sont pas modifiés pour les fréquences allant du grave à 500Hz, mais un décalage continu d'environ 10dB est observé lorsque la fréquence est multipliée par 10. [7]

Zwicker interprète ce décalage et propose l'interprétation physique suivante. L'oreille prend en compte l'énergie du bruit masquant non pas uniformément sur la bande 20Hz-20kHz, mais sur des zones fréquentielles contiguës appelées bandes critiques dont la particularité tient en leur largeur variable et leur forme.

#### 2.1.4.2. Filtres auditifs et bandes critiques

L'hypothèse de Fletcher [9], [10] est que lors d'un processus de détection, au seuil de masquage lorsque le son est juste détectable dans un bruit large bande, la puissance du son masqué est égale à la puissance du bruit masquant. Le filtre auditif ayant en entrée la stimulation extérieure et en sortie le motif d'excitation cochléaire est celui fournissant le meilleur rapport signal sur bruit. La largeur du filtre auditif utilisé est la largeur spectrale du bruit blanc masquant le son correspondant à une largeur de bande critique, le reste étant éliminé par filtrage. La largeur d'une bande critique s'exprime donc comme le rapport de l'intensité du son test au seuil par la densité spectrale du son masqué.

Leur largeur est variable, 100Hz pour les basses fréquences allant jusqu'à 500Hz puis croissent à hauteur de 20% de la fréquence centrale. Diverses transformations d'échelle sont utilisées. Elles ont pour résultat une relation linéaire entre la fréquence du son responsable de la stimulation et les phénomènes physiologiques cochléaires. La formulation donnée par Zwicker et Fastl [7], définit la relation entre l'échelle des barks, en fonction de la fréquence exprimée en Hz. A une zone fréquentielle allant de 0Hz à 16kHz correspond une échelle fréquentielle sensorielle s'étendant entre les valeurs 0 à 24 barks. Moore et Glasberg [11], proposent un autre type de filtre appelé ERB, dont la largeur est équivalente au filtre auditif, résultat d'une fonction de la fréquence centrale du filtre.

## 2.2. Descripteurs psychoacoustiques spécifiques

Ces critères découlent des propriétés physiques des sons. Ils ont été élaborés afin de quantifier des attributs perceptifs subjectifs de sons environnementaux. Historiquement, leur étude prend un tournant essentiel avec la révolution industrielle. R. Murray Schaffer qui s'intéresse à l'évolution du paysage sonore [1], écrit : "Les pulsations de machines, leur constante vibration finirent par avoir, partout sur l'homme un effet anesthésiant". A l'heure actuelle, la motivation de la recherche en perception des sons et de leur impact sur les hommes est fortement dirigée vers les notions d'agrément / désagrément. En effet, les produits usinés doivent répondre à un cahier des charges incluant des données perceptives comme l'ergonomie acoustique. Pour cela, il faut pouvoir anticiper sur l'impact sonore produit par un objet en relation avec ses caractéristiques techniques. Dans le domaine de l'automobile, les sensations de confort, de sportivité ou de sécurité laissées par un véhicule sont calculables sous forme de combinaisons spécifiques d'indicateurs psychoacoustiques.

### 2.2.1. Rugosité et force de fluctuation

L'apparition de machines à énergie électrique ou mécanique dans nos sociétés est à l'origine de nouveaux sons dans le paysage sonore. Ces machines sont des sources acoustiques à fortes

composantes spectrales. Typiquement, le champ magnétique à la bobine du transformateur électrique branché sur le réseau de distribution EDF produit un son de fréquence fondamentale aux alentours de 50Hz et ses harmoniques. De tels systèmes provoquent des sensations psychoacoustiques identifiables sous le terme de rugosité ou de force de fluctuation suivant le cas. L'étude de la rugosité sonore des bruits de moteur est révélatrice de leur caractère sportif [12].

On fait l'hypothèse que dans un son il n'y a pas d'effet de masquage entre spectre large bande et tons purs d'égales intensités. La perception des deux tons de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  dépend fortement de la différence  $\Delta f = f_2 - f_1$ , ce qui donne lieu à deux sensations caractéristiques. Aux basses fréquences de modulation, lorsque  $\Delta f$  est inférieur à 15/20Hz, une seule tonalité est perçue avec une sonie fluctuante. Le son fluctuant est perçu plus fort que le son stationnaire de même niveau équivalent de pression acoustique. Du point de vue de l'auditeur, sa hauteur correspond à celle d'un son pur présenté seul de fréquence :  $f_1 + \frac{\Delta f}{2}$

Van Helmholtz est le premier à décrire en détails ce phénomène bien connu des musiciens. Il donne lieu à la définition de dissonance musicale lorsque des perturbations de l'harmonie sont causées par les battements entre sons de fréquences harmoniques. A l'inverse, la consonance musicale apparaît lorsque certains rapports entre les fréquences harmoniques sont observés. On peut regrouper ces phénomènes sous le terme force de fluctuation.

$f_{\text{mod}}$  Un modèle de calcul de la force de fluctuation fonction de la fréquence de la modulation d'amplitude  $f_{\text{mod}}$  et de l'effet de masque  $\Delta L$  a été défini par Zwicker et Fastl [7].

$$F[\text{Vacil}] = \frac{\Delta L}{\left(\frac{f_{\text{mod}}}{4}\right) + \left(\frac{4}{f_{\text{mod}}}\right)}$$

Lorsque  $\Delta f$  est supérieur à 15Hz, les fluctuations de sonie disparaissent et une sensation de rugosité sonore apparaît jusqu'à ce que l'écart entre les deux sons purs dépasse la largeur de la bande critique centrée en  $\Delta f / 2$ . Au delà on entend les sons séparément.

L'intensité de la sensation de force de fluctuation se mesure en vacil. La référence de 1 vacil est donnée pour un son de 1kHz à 60dB, 100% modulé en amplitude à la fréquence de 4Hz.

La rugosité se calcule en asper. Un asper étant par définition la rugosité d'un son pur de 1kHz à 60dB de niveau de pression acoustique modulé en amplitude à la fréquence 70Hz.

Pour autant, la relation entre amplitude de modulation et fréquence n'est pas si directe, puisque les variations temporelles de sonie sont la cause d'effets de masquage. On introduit l'amplitude de masque temporel  $\Delta L$  représentant la différence entre le maximum et le minimum de la sonie. Du fait de l'effet de retard se traduisant par un effet de masquage sonore, l'amplitude du masque temporel est plus faible que l'amplitude de la modulation, cette différence augmentant pour des hautes fréquences de modulation.

Alors la rugosité peut s'évaluer par :  $R = f_{\text{mod}} \cdot \Delta L$

D'après les travaux de Zwicker publiés en 1990, une rugosité partielle est calculée dans chaque bande critique. On tient compte de l'amplitude de modulation et des effets de masquage par intégration pour obtenir la rugosité totale. Pour des sons complexes, la rugosité

calculée et la sensation perçue diffèrent et se pose alors le problème de la contribution des rugosités partielles calculées dans chaque bande critique pour le calcul de la rugosité totale.

Toutefois, pour un son ne comportant qu'une seule fréquence de modulation et une intégration linéaire des rugosités partielles, d'après [7] :

$$R[asper] = 0.3 f_{\text{mod}} \int_0^{24\text{barkx}} \Delta LE(z) dz$$

Avec  $f_{\text{mod}}$  en Hz et  $\Delta LE(z)$  en dB/Barks

La limite inférieure de la rugosité est 0.07 asper pour un son de fréquence 1kHz modulé en amplitude à 70%. Lorsque l'on fait varier les caractéristiques d'un son, la qualité du modèle de calcul de la rugosité est vérifiable par son habileté à reproduire les modifications de la rugosité subjective perçue.

Plusieurs modèles ont été élaborés pour quantifier la force de fluctuation et la rugosité d'un son à partir de ses composantes spectrales : Aures 1985, Zwicker et Fastl 1990, Daniel et Weber 1997. Bien qu'il soit sujet de discussion sous certains angles, le modèle de Zwicker [7] a été adopté comme référence et est implémenté dans les logiciels de calculs spécifiques comme dBFA de 01dB [13].

#### 2.2.1.1. Centre de gravité spectral et acuité

Les travaux menés en particulier au LAUM, sur le timbre des instruments de musique ont permis de révéler une dimension perceptive importante du son décrite verbalement par le terme "brillance". Il apparaît dans d'autres études portant sur l'analyse de sons de véhicules et bruits de trafic que l'une des dimensions les plus importantes soit aussi liée au centre de gravité spectral. La répartition de l'énergie en fonction du contenu fréquentiel d'une source se traduit par le calcul du Centre de Gravité Spectral. A partir d'un spectre harmonique ou non sur l'ensemble des fréquences d'un spectre moyenné sur quelques secondes.

L'expression du Centre de Gravité Spectral est d'après [14] : Approches de la qualité sonore cours de P.SUSINI.

$$CGS = \frac{\sum_{i=1}^N f(i)L(i)}{\sum_{i=1}^N L(i)}$$

$L(i)$  est calculé en dBA et  $f(i) = i * f_e / 2N$   $1 \leq i \leq 8192$   $f_e = 44,1$  kHz

Cette indicateur est calculé sur les sons du corpus de sons de soufflage, à la fois sur leur part harmonique et leur composante bruitée. Dans le premier cas on l'appelle, SCH (Spectral Centre of Gravity of Harmonic), et dans le deuxième SCN (Spectral Centre of Gravity of Noise).

Un descripteur psychoacoustique appelé acuité, équivalent au CGS a été développé sur la base du concept de bandes critiques de Zwicker. Des expériences sont réalisées sur des bruits de circulation routière et ferroviaire [15] avec trois types de sons à sonie équivalente et dont l'acuité est différente. Il est montré que la gêne augmente lorsque l'acuité augmente; ce descripteur est le second facteur de désagrément après la sonie

### 2.3. Indicateurs spécifiques aux sons de soufflage

Les sons enregistrés en habitacle de véhicule dans le contexte d'interaction acoustique et thermique, sont complexes. Pour notre étude, on peut simplement les décomposer en deux parties. L'une est porteuse d'information en provenance du moteur du véhicule, et l'autre est le bruit produit par l'ensemble du système de climatisation : compresseur, détendeur, propagation dans les conduites et passage aux grilles de soufflage. Chaque son comporte une composante harmonique et une composante aléatoire de type « bruit » large bande filtré passe bas.

Pour obtenir les deux composantes du son, les harmoniques du signal audio sont extraits avec le programme ADDITIVE développé à l'IRCAM qui utilise le vocodeur de phase SuperVP, sous une interface logiciel JMax. Les paramètres nécessaires pour l'extraction des harmoniques et la resynthèse du signal sont les suivants :

Paramètre	Valeur
Intervalle de recherche de Fo	5Hz à 10Hz
Fenêtre temporelle d'analyse	80ms
Pas temporel d'analyse	10ms
Attaque et décroissance	10ms
Nombre d'harmoniques pour la resynthèse	100
Seuil de détection par rapport au bruit	90dB

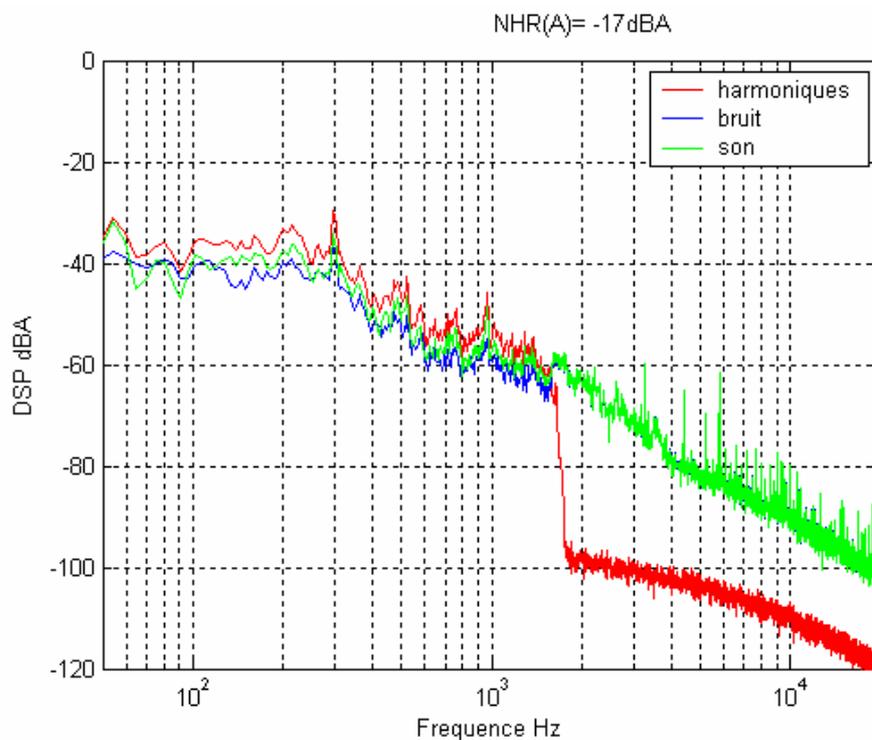
**Tableau 2 Paramètres pour l'extraction d'harmoniques**

La fréquence fondamentale recherchée pour nos sons est celle de la fondamentale moteur, qui se situe dans la bande fréquentielle allant de 5Hz à 15Hz. Pour la recombinaison du signal harmonique de synthèse, on ne garde que les 100 premiers harmoniques détectés. Au-delà, l'ajout d'harmoniques supplémentaires n'apporte plus d'information acoustique pertinente.

On dispose alors d'un signal harmonique, qui est essentiellement produit par le moteur, et d'un signal résiduel bruité, de type son de soufflage large bande. Ces deux signaux sont la base du calcul du critère NHR(A), rapport entre la moyenne de la DSP (densité spectrale de puissance) du signal bruité pondéré A et de la moyenne de la DSP du signal harmonique pondéré A. Pour le calcul de la moyenne de la DSP du signal harmonique, on ne tient compte que des valeurs de DSP comprises entre le maximum de la DSP et le maximum moins 40dB. Ce critère énergétique fournit une fréquence maximale des harmoniques, variable suivant le type de son de soufflage mais généralement comprise entre 1000Hz et 2000Hz.

L'écoute séparée du son et de la décomposition en part harmonique et part bruitée met en évidence l'interaction entre les harmoniques et bruit. Il existe notamment des effets de masquage fréquentiels des basses fréquences sur les hautes fréquences du signal. Le calcul des densités spectrales de puissance révèle où se situe la majeure partie de l'énergie pour chacune des composantes.

Ci-dessous, les densités spectrales de puissances des signaux calculées sous MATLAB avec la fonction PSD, suivant la méthode de Welch du périodogramme moyenné sur le signal audio écourté à 3 secondes. Les paramètres de calcul sont le nombre de point de la FFT,  $nfft=10192$  pts, les autres paramètres sont les paramètres par défaut de la fonction, sans recouvrement, avec un fenêtrage Hanning. Pour le son 3,  $NHR(A)=-17$ dB.



### 3. Constitution du corpus de sons

La première phase exploratoire pour l'étude des sons produits par les systèmes de soufflage/climatisation a commencé par une série d'enregistrements au Centre Technique PSA Peugeot Citroën de Vélizy. Plusieurs journées d'enregistrement ont été nécessaires pour acquérir une base de sons représentative de la diversité des systèmes de soufflage d'air conditionné du marché automobile. Nous disposons de véhicules du groupe PSA et de véhicules d'autres marques prêtés par le service Etude de la concurrence. Les véhicules étaient emmenés dans un parking sous terrain du Centre Technique de Vélizy pour limiter les bruits parasites environnant.

#### 3.1. Système d'acquisition des sons

##### 3.1.1. Prise de son avec une tête instrumentée

L'idée des premières prises de son avec tête instrumentée remonte aux années 50. Déjà des preneurs de son astucieux avaient eu l'idée de placer un coussin entre deux microphones omnidirectionnels écartés d'une vingtaine de centimètre, afin de simuler la présence de la tête d'un auditeur. Le but recherché étant de reproduire les effets d'absorption, de réflexion et de diffraction sur la tête, lors de la propagation d'une onde acoustique depuis une source vers les récepteurs auditifs un auditeur. L'idée d'une prise de son réaliste n'a cessé d'évoluer depuis, jusqu'aux têtes (on devrait même parler de « tête-épaules » !) instrumentées actuelles qui intègrent micros de mesure de pression, convertisseur analogique/numérique et filtres numériques multiples. A l'enregistrement, le son est capté par le micro placé à l'entrée du canal auditif du mannequin. Pour une réécoute au casque, un filtrage numérique appliqué au signal, permet d'annuler les effets de propagation au résonateur que constitue l'oreille artificielle du mannequin. Deux choix sont possible, propagation en champ diffus et en champ libre. Pour nos enregistrements dans l'habitacle des véhicules nous choisissons la propagation en champ diffus.

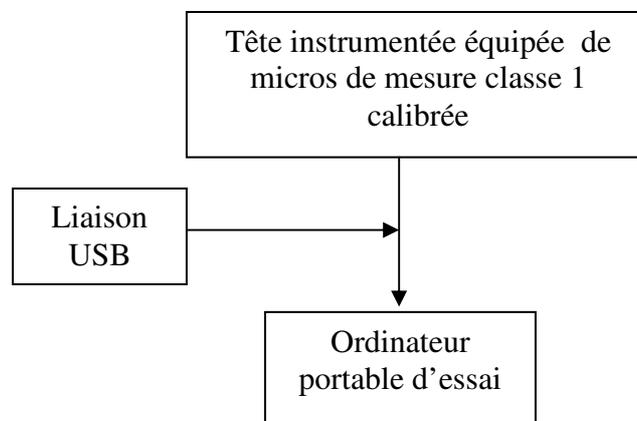
### 3.1.2. Détails du système

Le système d'acquisition était composé d'une tête instrumentée Head Acoustics équipée de deux micros de mesure de classe 1. Les échantillons sonores étaient numérisés au cours de l'enregistrement, puis transférés via une connexion USB au logiciel d'acquisition Artémis installé sur un ordinateur portable dédié aux essais acoustiques. La calibration des micros de mesure à 94dB SPL à 1000Hz, soit une pression efficace de 1 pa, avait été réalisée au préalable par le fournisseur du matériel. La tête instrumentée était positionnée à la place du conducteur comme le montrent les photos ci-dessous :



Figure 1 Prises de sons

En résumé :



### 3.2. Contexte des prises de sons

Les prises de sons ont été réalisées dans plusieurs configurations de fonctionnement du système d'air conditionné définies au préalable. En effet, pour un même véhicule, beaucoup de paramètres tels que l'orientation des orifices de soufflage, la direction du soufflage en pied, dégivrage, de face etc.. influent sur la qualité du son dans l'habitacle. Pour limiter ces variations, nous avons fixé des paramètres pour tous les véhicules. Les bouches d'aération de soufflage externes au tableau de bord du véhicule, généralement au nombre de quatre, restent en position initiale droite et sont complètement ouvertes. Les températures et débits d'air sont toujours réglés de manière identique entre le passager avant et le conducteur dans les véhicules où la climatisation est séparée.

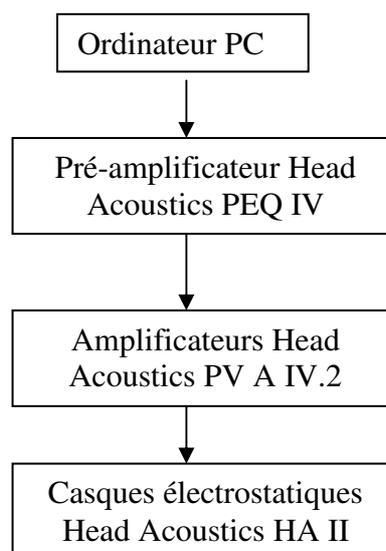
Les enregistrements ont été réalisés dans deux contextes thermiques différents pour maximiser la diversité des sons produits dans l'habitacle des automobiles choisies. Ces contextes correspondent au cas d'utilisation du système d'air conditionné les plus fréquemment rencontrés, lorsque le système est générateur des sons d'intensité moyenne à forte dans l'habitacle des véhicules. On appelle « contexte thermique stationnaire » l'utilisation qui est faite du système lorsque l'on souhaite conserver une température déjà atteinte dans l'habitacle. Dans ce cas, l'appareil délivre un flux thermique chaud ou froid suivant un débit faible à moyen. On parle de « contexte thermique instationnaire » lorsque le débit de soufflage d'air chaud ou froid est élevé, ce qui permet de réchauffer ou de refroidir rapidement l'habitacle. Pour chaque véhicule, les débits de soufflage d'air chaud ou froid qui permettent de satisfaire la condition thermique stationnaire ou instationnaire ont été déterminé in situ, au cas par cas. En effet, il n'y a pas de correspondance véritable possible, entre les débits d'air effectifs et les indicateurs de débit de soufflage entre deux véhicules de gammes ou de marques différentes. Pour les enregistrements dans le contexte thermique stationnaire, le positionnement du débit de soufflage était généralement ajusté aux alentours de la moyenne de ce que pouvaient fournir les appareils. Dans le cas instationnaire, le débit de soufflage était réglé au maximum de ce que pouvait délivrer l'appareil. En résumé, pour chaque véhicule, on dispose de 4 échantillons sonores enregistrés dans les conditions suivantes :

Contexte	Température	Type de soufflage	Débit de soufflage	Indice de prise de son
Stationnaire	T° min	Facial	Vmoy	Nomduvéhicule_01
Stationnaire	T° max	Facial	Vmoy	Nomduvéhicule_03
Instationnaire	T° min	Pied/Dégivrage	Vmax	Nomduvéhicule_02
Instationnaire	T° max	Pied/Dégivrage	Vmax	Nomduvéhicule_04

**Tableau 3 Configurations retenues pour les prises de son**

### 3.3. Réduction du corpus sonore

Initialement, le corpus était donc constitué de 116 sons enregistrés dans 29 véhicules de marques, tailles, type de motorisation (essence ou diesel) différentes, dans 4 configurations. Une écoute préliminaire a permis de sélectionner les sons les plus différents entre eux, puis lors d'une réunion, nous avons effectué une seconde sélection. L'écoute des sons a lieu au laboratoire d'acoustique du CTV (Centre Technique de Vélizy). Le système de restitution est composé de :



Les sons ont été écoutés à leur niveau réel simultanément sur les postes d'écoute individuels. Leur durée a été fixée à trois secondes, avec fade in et fade out. Lors de ces écoutes les sons ont été classés en catégories d'intensité, grave/aigu, présence de souffle plus ou moins forte etc...

Aussi, il apparaît que la différence perceptive essentielle entre deux sons enregistrés dans le même véhicule, lorsque le débit de soufflage est  $V_{moy}$  et  $V_{max}$ , est liée à l'intensité subjective des sons. Cette impression est vérifiée par les écarts de sonie calculée observés sur les sons en contexte thermique stationnaire et instationnaire. Il est décidé de ne conserver que les sons enregistrés en contexte thermique stationnaire pour la suite de l'étude.

Lors d'une dernière étape de réduction du corpus, 14 sons ont été finalement conservés, enregistrés dans 7 véhicules sur les 29 initiaux, lorsque le système de soufflage d'air conditionné délivre du chaud ou du froid en contexte thermique stationnaire. Ces sons sont d'abord choisis pour la diversité de leur timbre, puis pour la diversité des prises de son dans les véhicules du marché automobile en termes de marque, de gabarit et de motorisation.

Les indicateurs physiques acoustiques et psychoacoustiques calculés sur les sons [13] sont en annexe 2. On les présente seulement pour la voie 1 du fichier son au format \*.wav. L'espace acoustique intérieur de l'habitacle automobile est largement diffusant, et les différences entre indicateurs calculés sur les voies gauche et droite du signal sont très faibles. Elles sont inférieures aux incertitudes liées à la précision de la prise de son, et des outils de mesure. Elles ne sont pas exploitées par la suite.

Les graphiques des densités spectrales de puissance en  $dB_A/Hz$  à résolution 6HZ des sons retenus pour le corpus, de leur part harmonique et de leur part bruitée sont regroupées en annexe 1.

#### **4. Tests perceptifs sur les sons du corpus réel**

Trois objectifs motivent ces tests :

- Etablir quel est l'espace des timbres relatif aux sons de soufflage et déterminer les indicateurs physiques disponibles les mieux corrélés à ces dimensions perceptives.
- Etudier les jugements de préférence sur les sons et déterminer quels sont les indicateurs physiques liés à ces choix.
- Déterminer s'il existe des sons plus adaptés à un certain type de contexte thermique, réchauffement ou rafraîchissement.

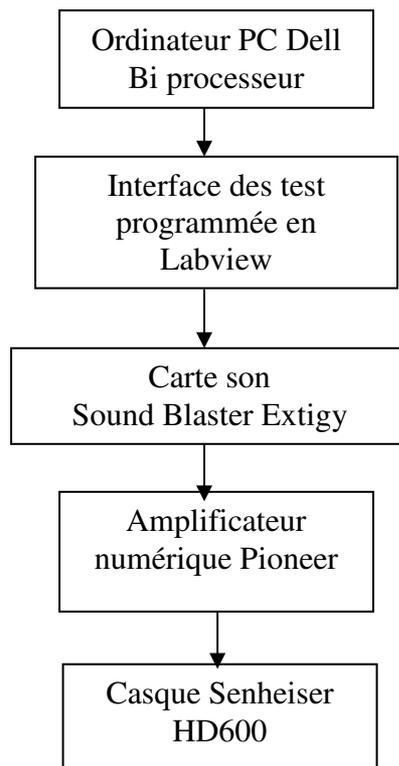
##### **4.1. Mise en place pratique des tests**

Les premiers tests acoustiques sur les sons réels se sont déroulés dans la salle d'écoute d'EDF, située au sous sol du bâtiment I Bis. Nouvellement aménagée, cette salle de 15m<sup>2</sup> est chauffée et traitée acoustiquement. Elle offre la possibilité d'écoute individuelle au casque ou sur haut parleurs.

###### **4.1.1. Chaîne de restitution**

###### **4.1.1.1. Composition de la chaîne de restitution**

La chaîne de restitution est composée de :



#### 4.1.1.2. Calibration de la chaîne de restitution

Pour une restitution des sons enregistrés aussi fidèle que possible à l'enregistrement, nous nous sommes intéressés à la réponse de la chaîne de restitution. Il s'agissait de vérifier la réponse en fréquence de la chaîne et le niveau de calibration, ou gain, à fournir à l'amplificateur pour restituer au casque le niveau réel enregistré. Cette calibration de la chaîne a été effectuée avec Mickaël Sauvage, technicien DRIA/PEFH et les moyens d'essais DRIA/PEFH : tête instrumentée Head Acoustics, logiciel Artémis. La chaîne d'acquisition composée des micros de mesures de la tête instrumentée et du logiciel Artémis Head Acoustics était elle même déjà calibrée.

Un patch Max/MSP a été réalisé pour diffuser un bruit blanc et générer un signal sinusoïdal de fréquence glissante, signal sweep.

##### 4.1.1.2.1. Réponse en fréquence

L'objectif est de vérifier la réponse en fréquence de la chaîne de restitution. Pour un niveau d'amplification donnée, on compare le signal de sortie de la chaîne avec celui en entrée de la chaîne. Le signal en entrée de la chaîne est un bruit blanc de synthèse produit sous Max/MSP, on enregistre un signal en sortie du casque avec le logiciel Artémis via les micros de mesure de la tête instrumentée. La réponse en fréquence de la chaîne de restitution semble correcte dans la bande audible, il n'est donc pas besoin de la modifier pour la diffusion des sons.

##### 4.1.1.2.2. Gain de à la diffusion

Pour un gain donné à l'amplificateur, on souhaite déterminer le coefficient multiplicateur à appliquer aux échantillons du signal audio, pour obtenir un niveau de pression de 94dB SPL

et de 104dB SPL mesuré par les micros de la tête instrumentée. Dans le patch Max/MSP, le gain du signal est variable avant passage dans l'objet dac~ ( Digital to Analogical Converter ). Ce gain est celui que l'on applique ensuite aux sons au format \*.wav par multiplication de chaque échantillon sous MATLAB lors de la création des sons avant diffusion. Pour l'amplificateur fixé à -30dB, on mesure :

Niveau de sortie recherché	94dB SPL	104dB SPL
Coefficient multiplicateur pour la diffusion	0,13	0,41

Aussi, on remarque que  $10 \cdot \log((0,41/0,13)^2) = 10\text{dB}$ , et que l'amplificateur est quasi linéaire sur cette gamme de niveaux. Le passage d'un signal calibré à l'enregistrement à 94dB à un signal calibré à 104dB peut se faire par multiplication par un facteur 3,2.

Dans tous les cas, à partir de sons enregistrés calibrés à 94dB ou 104dB, le calcul des niveaux réels sous MATLAB et sous le logiciel 01dB dBFA [13] à partir d'un fichier \*.wav importé, nécessite la multiplication des échantillons du fichier audio par 2,8, ce qui correspond à  $10 \cdot \log(2,8^2) = 9\text{dB}$ . En résumé :

Signal calibré à	94dB	104dB
Coefficient multiplicateur pour calcul de niveaux réels	2,8	$2,8 \cdot 3,2 = 8,96$

#### 4.1.2. Interface et sujets des tests

L'interface des test est réalisée sous LABVIEW. Le test est en 3 étapes : comparaison par paires sur la préférence, comparaison par paires sur la dissemblance, questions à caractère évocatif. Il est prévu pour durer une heure. Les 60 sujets du test, autant d'hommes que de femmes sont recrutés par la société EUROSYN DVT. Cette société recrute par ailleurs des sujets pour des études consommateurs commandées par des entreprises de l'industrie agro-alimentaire, ou cosmétiques par exemple. En ce qui nous concerne, les contraintes imposées pour le recrutement des sujets étaient de ne pas avoir de troubles auditifs majeurs, et de posséder une automobile récente équipée de la climatisation. Le groupe de sujets est composé d'autant d'hommes que de femmes.

Au début des tests le sujet est mis en contexte et on lui explique le fonctionnement de l'interface en détaillant avec lui chaque étape du test par une interface exemple. A chaque étape, on rappelle au sujet le contexte dans lequel il se trouve. « *Vous êtes dans une automobile arrêtée. Le moteur tourne. Le système d'air conditionné fonctionne. Vous n'avez ni trop chaud, ni trop froid* ». Les captures d'écrans de l'interface des tests figurent en annexe 3.

#### 4.2. Test de comparaison par paires sur la préférence

L'objectif de ce test est d'obtenir des jugements de préférence sur les sons. Les 14 sons sont présentés sous 91 paires fixes qui réalisent toutes les combinaisons possibles des sons entre eux. La présentation des 91 paires est aléatoires entre les 60 sujets. Cette condition est respectées par utilisation d'un plan d'expérience qui prend la forme d'un carré latin ( format : 91paires \* 60sujets ). Le sujet écoute les sons d'une paire autant de fois qu'il le souhaite, avant de faire son choix de préférence en cochant la case correspondant au son A s'il a préféré le son A, ou en cochant la case correspondant au son B, s'il a préféré le son B. Cette première étape du test dure entre 20mn et 30 mn. Ci-dessous se trouve l'interface du test telle qu'elle apparaît au sujet.



**Figure 2 Interface du test de comparaison par paires sur la préférence**

#### 4.2.1. Traitement des résultats

On dispose de 60 matrices à 14 lignes et 14 colonnes qui contiennent la préférence des sujets pour les 91 paires de sons présentées. L'objectif de l'analyse des matrices de comparaison par paires sur la préférence est d'obtenir un indicateur fiable de la préférence des sujets pour les 14 sons du corpus. Plusieurs possibilités pour l'analyse des résultats bruts s'offrent à nous : calcul de notes de préférence sur les occurrences de préférence, calcul de scores de préférence avec l'algorithme de Bradley et Terry [15]. Ensuite on calcule des corrélations entre cet indicateur de la préférence et les indicateurs acoustiques calculés.

##### 4.2.1.1. Calcul de notes sur les occurrences de préférence

Le premier calcul réalisé sur les matrices de préférence est de comptabiliser les occurrences de préférence d'un son devant les autres pour tous les sujets. Cette étape est réalisée sous MATLAB, on obtient alors le tableau ci-dessous.

	Son1	Son2	Son3	Son4	Son5	Son6	Son7	Son8	Son9	Son10	Son11	Son12	Son13	Son14
Son 1	0	54	16	35	52	3	8	58	52	58	0	4	53	0
Son 2	6	0	7	14	31	2	6	45	28	39	0	2	36	1
Son 3	44	53	0	49	56	4	8	57	56	57	2	8	57	0
Son 4	25	46	11	0	54	10	9	56	52	56	0	8	57	1
Son 5	8	29	4	6	0	4	8	58	28	48	0	2	44	0
Son 6	57	58	56	50	56	0	32	59	60	59	21	38	60	15
Son 7	52	54	52	51	52	28	0	59	54	57	8	25	57	9
Son 8	2	15	3	4	2	1	1	0	9	21	0	1	35	0
Son 9	8	32	4	8	32	0	6	51	0	58	1	1	47	0
Son 10	2	21	3	4	12	1	3	39	2	0	1	0	41	0
Son 11	60	60	58	60	60	39	52	60	59	59	0	42	60	26
Son 12	56	58	52	52	58	22	35	59	59	60	18	0	60	10
Son 13	7	24	3	3	16	0	3	25	13	19	0	0	0	1
Son 14	60	59	60	59	60	45	51	60	60	60	34	50	59	0

**Tableau 4 Occurrences de préférence pour tous les sons et tous les sujets**

Il faut lire ce tableau suivant les lignes de la gauche vers la droite. Par exemple, on lit « le son 1 a été préféré 54 fois au son 2 » alors que « le son 2 n'a été préféré que 6 fois par rapport au son 1 ». Chaque son a donc été présenté sous 13 paires aux 60 sujets. A partir de ce tableau on peut calculer une note de préférence d'un son, en sommant les occurrences de préférence et en divisant par  $13 \times 60 = 827$ . On obtient :

Son 1	0,50385
Son 2	0,27821
Son 3	0,57821
Son 4	0,49359
Son 5	0,30641
Son 6	0,79615
Son 7	0,71538
Son 8	0,12051
Son 9	0,31795
Son 10	0,16538
Son 11	0,89103
Son 12	0,76795
Son 13	0,14615
Son 14	0,91923

**Tableau 5 Notes calculées sur les occurrences**

#### 4.2.1.2. Calcul des Scores de Bradley et Terry

Notre groupe de sujets est homogène. Cette hypothèse nous permet d'utiliser le modèle de calcul de scores de Bradley et Terry sur les comparaisons de produits présentés par paires [16]. L'algorithme de B&T est actuellement implanté sous MATLAB à la DRIA/PEFH lors d'un stage portant sur l'évaluation de produits suivant un protocole de comparaison par paires. Il utilise les matrices de préférence à 14 lignes et 14 colonnes obtenues pour chaque sujet.

L'algorithme calcule des scores de préférence pour chaque son. Plus le son a été apprécié et plus le score calculé est élevé. Aussi, il renvoie une liste d'intervalles de confiance pour l'évaluation de chacune des 91 paires de sons. Ces intervalles permettent de déterminer si pour le groupe de sujets la préférence pour un son d'une paire donnée a été significative ou non. Si un zéro figure dans l'intervalle d'une paire, cela indique que la préférence n'a pas été significative. En d'autres termes, cela veut dire qu'on ne peut pas conclure sur la préférence d'un des deux sons pour la paire concernée. Ci-dessous figurent les scores obtenus pour les 14 sons.

	Score de B&T
Son 1	0,0104
Son 2	0,0019
Son 3	0,0181
Son 4	0,0097
Son 5	0,0024
Son 6	0,1156
Son 7	0,0547
Son 8	0,0005
Son 9	0,0025
Son 10	0,0008
Son 11	0,2979
Son 12	0,0868
Son 13	0,0007
Son 14	0,3979

**Tableau 6 Sons et scores de B&T**

#### 4.2.1.3. Comparaison entre les scores de B&T et les notes sur les occurrences

Avant d'utiliser les notes sur les occurrences ou les scores de B&T, on vérifie que les données obtenues sont en accord. On effectue la comparaison entre la probabilité de Bradley Terry, et la probabilité obtenues sur les occurrences.

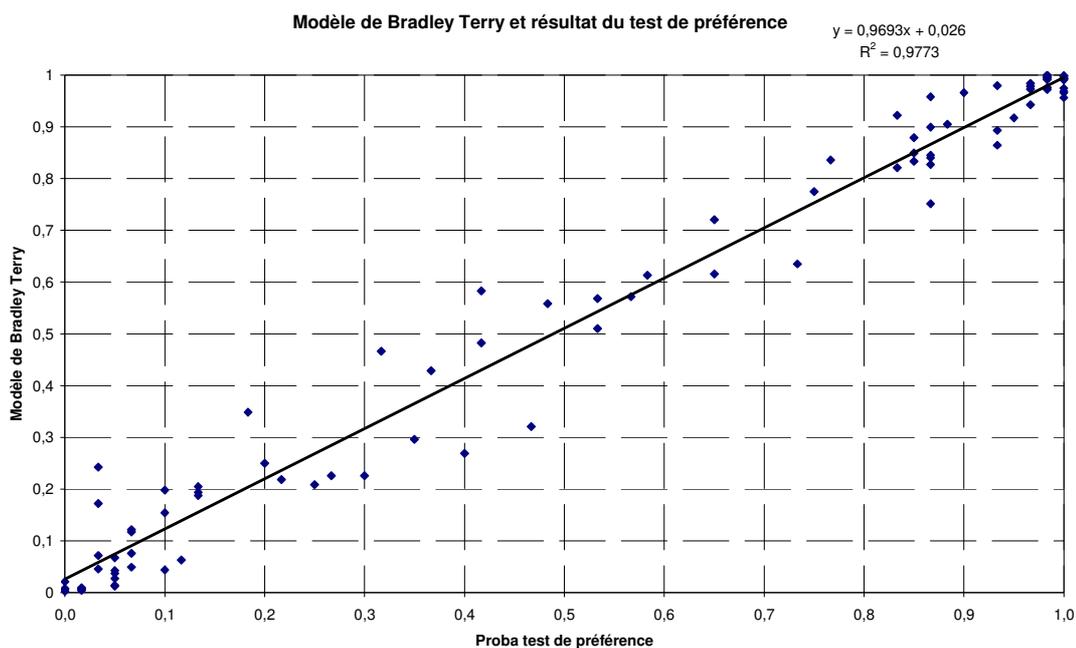
D'une part la probabilité de B&T  $P_{i,j}$  est la probabilité que le son i soit préféré au son j, calculée par :

$$P_{i,j} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j}$$

Avec  $\pi_i$  le score obtenu par le son i et  $\pi_j$  le score obtenu par le son j.

D'autre part on calcule la probabilité de préférer le son i au son j sur les occurrences en divisant le nombre d'occurrences de préférence du son i devant le son j par 60.

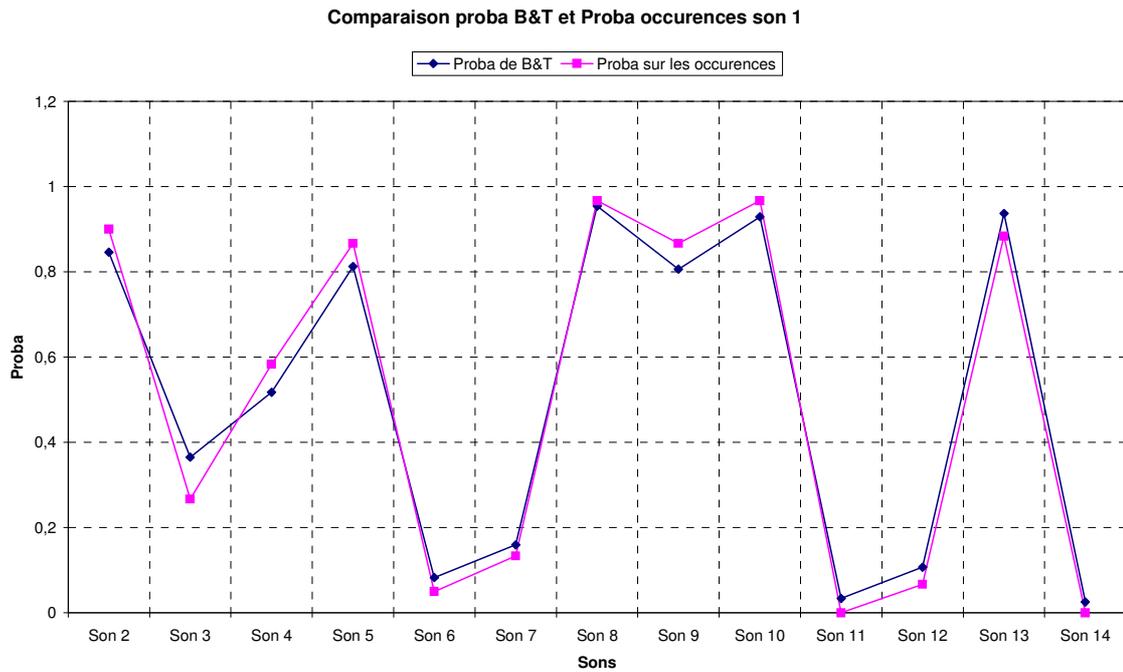
On compare les probabilités pour les paires de sons, en traçant le nuage de points entre la probabilité de B&T et la probabilité de préférence calculée sur les occurrences. La validité du modèle de B&T est vérifiée en calculant la régression linéaire sur le nuage de points.



Graphique 2 Ajustement du modèle de B&T

Le coefficient de corrélation sur la droite de régression linéaire entre les points issus des deux ensembles de données de  $R^2=0,97$  valide le score de B&T comme un bon indicateur de la préférence.

Un autre moyen de vérifier le calcul fournit par le modèle est de tracer la probabilité qu'il soit préféré devant les 13 autres, d'après les scores de B&T et à partir des occurrences.



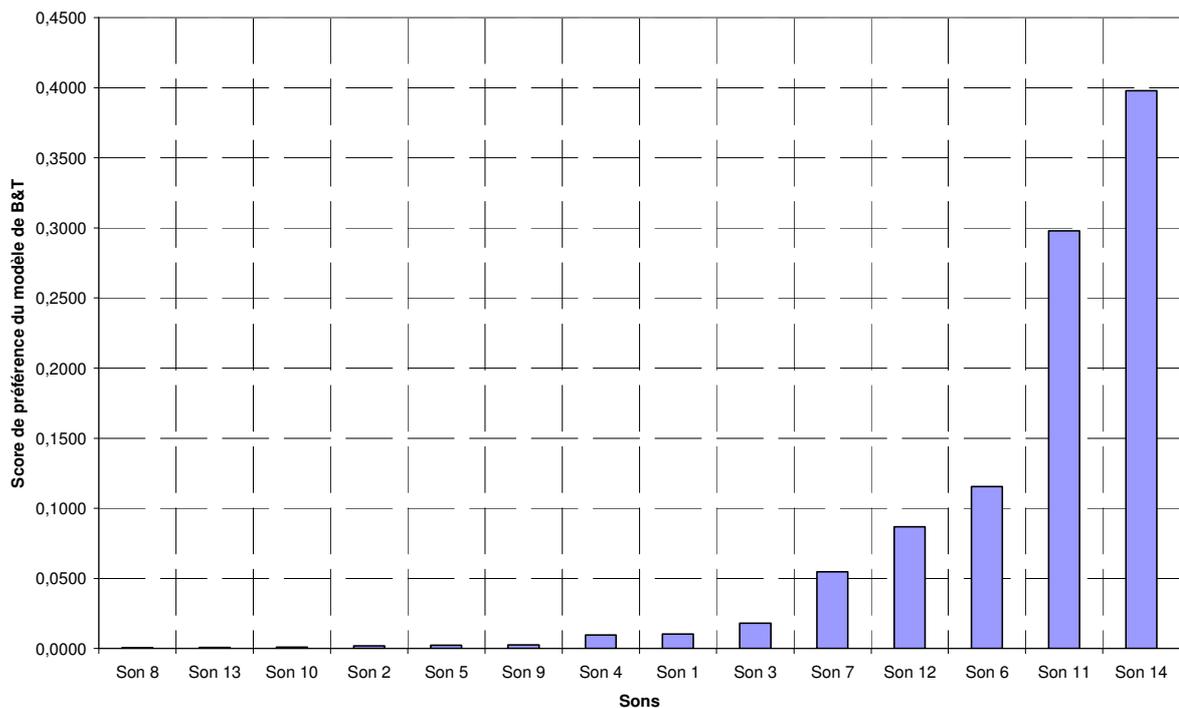
**Graphique 3 Probabilité de B&T et Probabilité sur les occurrences son 1**

L'évolution des probabilités de préférence de B&T et celles sur les occurrences pour tous les sons du corpus sont similaires.

#### 4.2.2. Analyse des résultats

##### 4.2.2.1. Discussion sur les scores de B&T

Par la suite on ne conserve que les scores de B&T. Le graphique ci-dessous représente les scores de B&T par ordre croissant en fonction des sons.



**Graphique 4 Scores de préférence du modèle de B&T en fonction des sons par ordre croissant**

Lorsque l'intervalle de confiance ne contient pas de zéro, le son préféré dans une paire, l'a été de manière significative. Pour les autres paires on ne peut pas conclure. Le tableau suivant contient les paires de sons jugées significativement différentes.

Paire N°	Sons		Intervalle de confiance		Son préféré
5	1	6	-0,152	-0,059	6
11	1	12	-0,115	-0,038	12
13	1	14	-0,652	-0,123	14
33	3	11	-0,516	-0,044	11
36	3	14	-0,549	-0,211	14
38	4	6	-0,182	-0,03	6
44	4	12	-0,148	-0,006	12
46	4	14	-0,668	-0,108	14
60	6	11	-0,253	-0,112	11
63	6	14	-0,328	-0,237	14
67	7	11	-0,361	-0,125	11
70	7	14	-0,418	-0,268	14
86	11	12	0,124	0,298	11
90	12	14	-0,366	-0,256	14

**Tableau 7 Paires de sons où la préférence a été significative**

Aucune paire de sons enregistrés dans le même véhicule figure parmi les paires qui ont été significativement discriminées en terme de préférence. Pour un véhicule donné, dans le contexte d'écoute du laboratoire, il n'y aurait donc pas de différence notable entre la préférence pour un son enregistré en contexte thermique chaud ou froid. On remarque que les sons significativement préférés sont les sons 11 et 14 groupe A, viennent ensuite les sons 6, 12, 3 et 7 groupe B, enfin les sons autres sons groupe C.

Les sons qui apparaissent le plus souvent dans les paires où la préférence est significative sont les sons qui obtiennent les scores de B&T les plus élevés. Cela montre que le groupe de 60 sujets est consensuel pour les sons qui ont été les plus appréciés, alors qu'il est divisé pour les sons qui n'ont pas été préférés. L'intervalle de confiance le plus grand est obtenu pour la paire 46 composée des sons n° 4 et n° 14. C'est pour cette paire que les sujets ont été le plus consensuels.

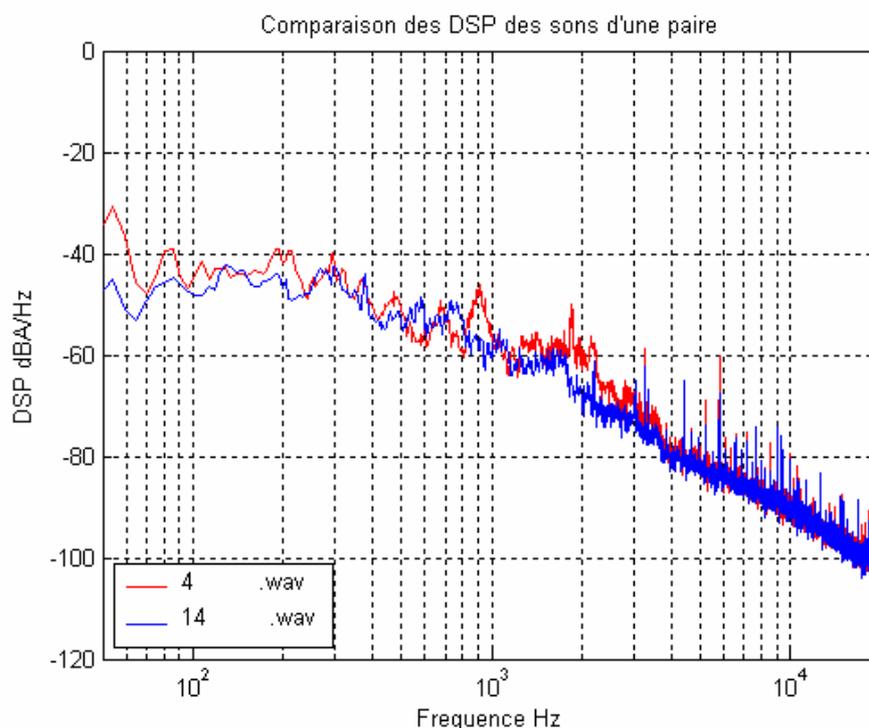
#### 4.2.2.2. Mise en relation avec les indicateurs physiques

On assimile les scores de B&T à un indicateur de la préférence, et on calcule les corrélations avec les indicateurs acoustiques. Les indicateurs physiques calculés sur les 14 sons du corpus et les scores de B&T sont les suivants : N est la sonie, calculée sous 01dB ou artémis, S est le centre de gravité spectral, SCH est le centre de gravité spectral de la composante harmonique, SCN le centre de gravité spectral de la composante bruitée, SCH/N est le rapport des CGS harmonique et bruit.

Son	Leq(A) artemis dBA	N 01dB sones	N artemis sones	Sharp 01dB acum	Sharp artemis acum	Tonalité tu	Rugosité asper	NHR(A) dBA	S Hz	SCH Hz	SCN Hz	SCH/N	Score de B&T
1	44	4,56	4,46	0,89	1,15	0,13	2,90	-17	13	1067	9	119	0,0104
2	45	4,89	4,70	0,85	1,11	0,27	2,76	-16	17	601	15	40	0,0019
3	42	4,11	3,95	0,88	1,17	0,16	3,10	-17	14	899	12	75	0,0181
4	42	4,11	4,35	0,97	1,54	0,18	2,83	-16	13	766	12	64	0,0097
5	48	5,54	5,37	0,71	0,96	0,14	3,16	-18	20	1702	14	122	0,0024
6	38	3,13	2,94	1,01	1,31	0,10	3,01	-15	9	1004	10	100	0,1156
7	39	3,32	3,24	0,98	1,28	0,39	3,14	-19	9	1263	7	180	0,0547
8	48	6,28	6,14	0,86	1,14	0,05	3,09	-17	21	803	18	45	0,0005
9	44	4,66	4,53	0,83	1,08	0,16	3,33	-17	13	1309	10	131	0,0025
10	46	5,39	5,21	0,92	1,22	0,06	2,94	-18	12	2695	9	299	0,0008
11	39	3,17	3,08	1,02	1,34	0,21	3,25	-18	7	3051	7	436	0,2979
12	39	3,22	3,06	0,96	1,24	0,14	3,07	-16	9	1342	10	134	0,0868
13	45	3,99	4,37	0,84	1,14	0,39	2,82	-19	13	1475	9	164	0,0007
14	39	3,22	3,10	0,98	1,29	0,19	3,44	-18	8	2467	7	352	0,3979

**Tableau 8 Indicateurs physiques calculés sur les sons du corpus**

Quand on écoute la paire 46 composée des sons 4 et 14, c'est la distinction aigu/grave qui prédomine, mise en évidence par un CGS de 13 Hz pour le son 4, de 8 Hz pour le son 14. Aussi, la sonie calculée pour le son 4 est plus forte : 4,35 sones contre 3,10 sones. Le caractère ronronnant/bourdonnant des sons 4 et 14 est très différent. Le calcul de la rugosité et du centre de gravité spectral de la part harmonique le confirme : pour le son 4, le SCH est à 766Hz, le SCN 12Hz, pour le son 14, le SCH est à 2467Hz, le SCN à 7Hz. On trace les DSP des sons de la paire 46.



**Graphique 5 DSP des sons de la paire 46**

La densité spectrale de puissance du son 4 aux basses fréquences est plus élevée que celle du son 14. Le caractère puissant du son 4 est lié à son intensité sonore subjective ajoutée à ses caractéristiques spectrales, rugosité faible et centre de gravité du contenu harmonique faible.

Le tableau ci-dessous résume les corrélations entre les scores de préférence du modèle de B&T et les indicateurs acoustiques calculés par les logiciels dBFA 01dB et/ou Artémis Head Acoustics. N est la sonie, S le centre de gravité spectral, SCH le centre de gravité spectral harmonique, SCN le centre de gravité spectral de la composante bruitée, SCH/N le rapport des centres de gravité spectral et harmonique.

Indicateur physique	Leq(A) artemis dBA	N 01dB sones	N artemis sones	Sharp 01dB acum	Sharp artemis acum	Tonalité tu	Rugosité asper	NHR(A) dBA	S Hz	SCH Hz	SCN Hz	SCH/N
modèle de pref de B&T	-0,67*	-0,61*	-0,65*	0,59*	0,39	0,04	0,64*	-0,14	-0,65*	0,63*	-0,54*	0,76*

**Tableau 9** Corrélations entre les scores de B&T et les indicateurs acoustiques \*  $p < 0,05$

Les corrélations les plus fortes se situent pour les indicateurs de niveaux acoustique Leq(A), sonie et rugosité.

Il apparaît que les sons 12, 6, 11 et 14, qui ont été les plus appréciés, sont aussi les sons où la sonie calculée a été la plus faible. La sonie moyenne calculée sur les sons du corpus est de 4,26 avec un écart type de 0,97 sones, ce qui équivaut pour un son pur à environ une dizaine de décibels. La sonie la plus faible est de 2,94 sones calculée sur le son 6, la plus élevée 6,14 sones pour le son 8. On note ici que le son 8 est bien celui qui obtient le plus petit score de B&T, mais que le son 6 n'arrive qu'en troisième derrière les sons 11 et 14 avec des sonies très proches de 3,08 et 3,10.

#### 4.2.3. Synthèse

Le traitement des jugements de préférence par le modèle de B&T est validé par la mise en relation avec les notes calculées sur les occurrences. Notre modèle est bien ajusté, et les scores obtenus sont un bon indicateur de la préférence. Les intervalles de confiance de préférence calculés pour chaque paire de sons sont une information supplémentaire utile pour déterminer dans quelle mesure les sujets ont été consensuels ou non. Finalement, il apparaît qu'une sonie élevée est un élément décisif sur le rejet d'un son, alors qu'à sonie égale ou plus faible, d'autres facteurs acoustiques d'origine spectrale comme la rugosité prennent de l'importance pour le choix de préférence. Cependant, les calculs de corrélations simples entre les scores de B&T et les indicateurs physiques dont nous disposons ne sont pas en mesure d'expliquer complètement les jugements de préférence. Seulement les indicateurs d'intensité, de rugosité et de centre de gravité spectral sont une piste à explorer.

### 4.3. Test de comparaison par paires sur la dissemblance

Ce test doit nous permettre d'établir quel est l'espace perceptif sous-jacent associé aux 14 sons choisis dans le contexte thermique stationnaire après réduction du corpus sonore. Plusieurs tests sont possibles pour déterminer un espace perceptif. Cela peut se faire par catégorisation libre des sons puis verbalisation sur les catégories. On obtient alors une liste de descripteurs sémantiques liés à chaque propriété spécifique des «groupes» de sons. Cela peut également se faire par mise en place d'un test de comparaison par paires sur la dissemblance entre deux sons suivi d'une analyse de proximité [14]. On obtient alors une métrique du degré de dissemblance entre nos sons qu'il sera ensuite possible de mettre en relation avec des indicateurs acoustiques. Nous avons sélectionné cette méthode pour notre étude.

L'ordre de présentation des paires est aléatoire entre les sujet. Cette condition est assurée par l'utilisation d'un plan d'expérience qui prend la forme d'un carré latin. En pratique, chaque sujet écoute les deux sons de chaque paire autant de fois qu'il le souhaite. Ensuite, il lui est demandé de déplacer un curseur entre « identiques » à gauche et « très différents » à droite suivant le degré de dissemblance perçue entre les sons. La position du curseur pour une paire de sons est traduite en une valeur de dissemblance de 0 à 10. Cette étape durera environ 20mn à 30mn. Ci-dessous figure l'interface du test de comparaison telle qu'elle apparaît pour le sujet. La figure ci-dessous est l'interface du test de comparaison par paires sur la dissemblance telle qu'elle apparaît aux sujets.

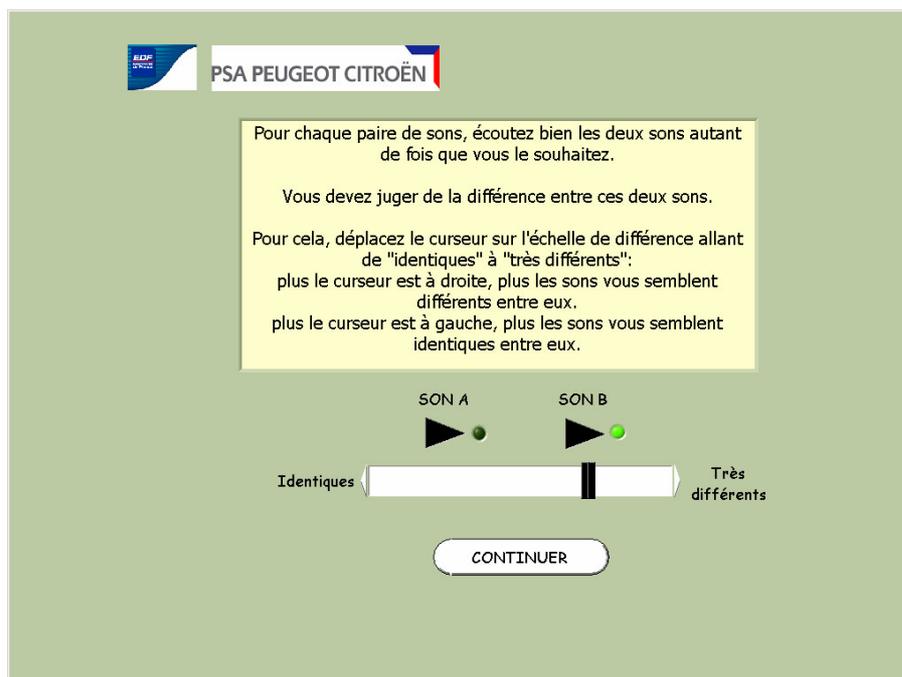


Figure 3 Interface du test de comparaison par paires

#### 4.3.1. Traitement des résultats

##### 4.3.1.1. Eléments de théorie

En 1972, Weslin et Goude s'intéressent à la perception de son musicaux réels. Neuf instrumentistes jouent un La de concert sur la même nuance, et la même durée. D'abord, la tâche est demandée à 36 sujets de noter le degré de similitude des neuf sons avec attaque et décroissance du son. Ensuite, 34 sujets notent le degré de similitude de neuf sons stationnaires

créés à partir des sons initiaux enregistrés dont on a enlevé l'attaque et la décroissance. L'analyse multidimensionnelle a montré que les intensités relatives des partiels étaient corrélées aux jugements de dissemblance entre les sons. Aussi, une expérience d'identification sur les mêmes dix huit sons a montré qu'enlever l'attaque et la décroissance du son avait un effet variable sur le degré de reconnaissance d'un son suivant le type d'instrument émetteur.

L'analyse multidimensionnelle est un procédé de réduction itératif au cours duquel des objets sont placés dans un espace de plusieurs dimensions ajusté aux mesures de similarité ou de dissimilitude entre objets [17]. Dans cet espace, les objets similaires sont placés proches les uns des autres, et les objets non similaires sont éloignés. L'analyse multidimensionnelle permet de trouver les dimensions porteuses d'information, communes à un ensemble de variables. Lors d'un test de comparaison d'objets présentés par paires, les notes de dissemblance fournies par les sujets sont traduites en distances.

#### 4.3.1.1.1. Calcul des distances

Plusieurs algorithmes permettent de construire une distance à partir de notes de dissemblances. Une mesure de distance ALSCAL est la norme euclidienne :

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{r=1}^R (x_{ir} - x_{jr})^2}$$

Dans le cas ci-dessus,  $x_{ir}$  est la position de l'objet  $i$  sur la dimension  $r$  dans un espace à  $R$  dimensions.

Lors de l'attribution d'une note de dissemblance, des sujets sont plus sensibles que d'autres à certaines propriétés des objets étudiés. On applique donc un poids sur les dimensions lors de la conversion des notes de dissemblance en distances spatiales. Le calcul de la distance devient :

$$d_{ijk} = \sqrt{\sum_{r=1}^R w_{kr} (x_{ir} - x_{jr})^2}$$

avec  $w_{kr}$  la pondération pour le sujet  $k$  sur la dimension  $r$ .

Cette mesure INDSCAL (Carroll and Chang, 1970) produit des axes variables entre sujets. D'une part cela simplifie l'étape d'identification des propriétés émergentes des objets qui seront par la suite utiles pour la perception, d'autre part l'étude des poids permet d'examiner rapidement quelles ont été les propriétés des objets différemment employées par chaque sujet lors de l'étape de comparaison. Par rapport au modèle calculé avec ALSCAL, le calcul de distances avec le modèle INDSCAL introduit des paramètres supplémentaires qui complexifient fortement le calcul du modèle de proximité.

Il est possible de réduire le nombre de poids individuels lorsque l'on s'attend à ce que les sujets forment des groupes du point de vue de leur perception de certaines propriétés d'objets, ce qui est souvent le cas lors d'études sur les sons musicaux où sont mêlés musiciens et non musiciens [18]. Cette mesure de distance CLASCAL (Winsberg et De Soete, 1993) est :

$$d_{ijt} = \sqrt{\sum_{r=1}^R w_{tr} (x_{ir} - x_{jr})^2}$$

Avec  $w_{tr}$  la pondération pour la classe de sujet  $t$  sur la dimension  $r$ .

Cette mesure de distance est comprise dans l'intervalle formé par la mesure euclidienne ALSCAL et la mesure INDSCAL. La réduction du nombre de poids en passant d'INDSCAL à CLASCAL réduit la quantité d'information à analyser, et la ségrégation en groupes de sujets devient explicite. [19]

Un dernier type de mesure de distance, pour des objets ayant des propriétés propres, a été proposé par Winsberg et Carrol, 1989. Ce calcul de distance avec spécificités permet de tenir compte d'objets particuliers, sans agir sur l'ajustement du modèle à partir de distances entre objets ayant d'autres spécificités. La mesure de distance dans ce cas devient :

$$d_{ijt} = \sqrt{\sum_{r=1}^R w_{tr} (x_{ir} - x_{jr})^2} + S_i + S_j$$

Avec  $S_i$  et  $S_j$  les mesures de spécificité pour les objets  $i$  et  $j$ .

#### 4.3.1.1.2. Construction de l'espace multidimensionnel

Le premier point est placé aléatoirement, à partir de la distance calculée entre les points, tous les autres sont placés sur un ensemble de cercles concentriques centrés sur ce point. Le placement d'un second point sur l'un de ces cercles engendre une série de cercles associés à ce nouveau centre et délimite la position possible pour les éléments restant à placer dans l'espace. Maintenant, prenons un troisième point. Puisque les mesures de dissemblance sont expérimentales, elles ne satisfont pas l'inégalité triangulaire. Un critère de stress permet de quantifier l'ajustement du modèle aux données expérimentales en mesurant la différence entre les distances entre objets dans l'espace et les mesures de dissemblance.

$$\hat{S} = \sqrt{\sum_{r=1}^R (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2}$$

Avec  $d_{ij}$  la mesure de similarité entre les éléments  $i$  et  $j$  et  $\hat{d}_{ij}$  la distance entre les éléments  $i$  et  $j$  calculée par le modèle.

Le nombre d'itérations pour le calcul du modèle est déterminé par l'utilisateur. L'algorithme calcule le stress pour le modèle de proximité obtenu.

La construction de l'espace multidimensionnel peut être métrique ou non métrique, c'est-à-dire ordinaire. Lors de la construction métrique, c'est effectivement les distances calculées entre les objets qui servent pour le calcul de leur proximité dans le modèle. Pour une construction non métrique, une fois les calculs de distances effectués entre les objets, l'ordre de placement entre les objets placés dans le modèle est respectée en premier lieu devant les distances entre objets.

#### 4.3.1.2. Traitement des données brutes

##### 4.3.1.2.1. Réduction des matrices de dissemblance

Les données brutes pour le test de comparaison par paire sur la dissemblance sont des matrices à 14 lignes et 14 colonnes qui contiennent les distances entre les sons 1 à 14. On opère une réduction des matrices individuelles en divisant chaque valeur de la matrice par l'écart type calculé sur toutes les valeurs de la matrice. Ceci permet de limiter la variabilité de l'amplitude d'utilisation du curseur lors de son positionnement pour l'attribution de la note de dissemblance entre les paires de sons présentées au sujet.

Le calcul de distance ALSCAL est effectué sur la matrice somme des matrices individuelles réduites pour tous les sujets. Le calcul de distance INDSCAL est effectué sur une matrice à 840 lignes et 14 colonnes, obtenue par concaténation des matrices individuelles réduites (format d'entrée pour le logiciel SPSS).

Toutes ces manipulations sont réalisées sous MATLAB.

##### 4.3.1.2.2. Calcul pratique d'un espace multidimensionnel

Quelque soit le calcul de distance utilisé, prenons  $n$  objets dont on souhaite déterminer l'espace perceptif sous-jacent. Toute l'information est contenue dans un espace à  $n-1$  dimensions. La réduction d'un espace théorique à  $n-1$  dimensions à un espace calculé à  $n'$  dimensions, implique une perte d'information sur les données initiales, qui est en quelque sorte quantifiée par le facteur de stress. A chacune de nos analyses, aucun a priori n'est fait sur le nombre de dimensions qui permettent de retranscrire l'information contenue dans les notes de dissemblances. Mais en pratique, lors du calcul d'un espace multidimensionnel, le logiciel SPSS offre la possibilité de calculer des distances ALSCAL et INDSCAL, et produit un modèle de proximité allant de 2, à au plus 6 dimensions non orthogonales ainsi qu'un calcul du stress pour chaque modèle multidimensionnel. Globalement, le stress diminue quand le nombre de dimensions du modèle augmente. En fait, l'ajout d'axes supplémentaires au modèle permet de tenir compte d'un plus grand nombre de propriétés d'objets servant à sa construction. Cependant, le calcul de la contribution de chaque objet aux dimensions du modèle, permet de vérifier qu'un objet en particulier ne porte pas toute l'information d'une dimension du modèle. Si c'est le cas, on préférera utiliser un calcul de distance avec spécificité de type INDSCAL.

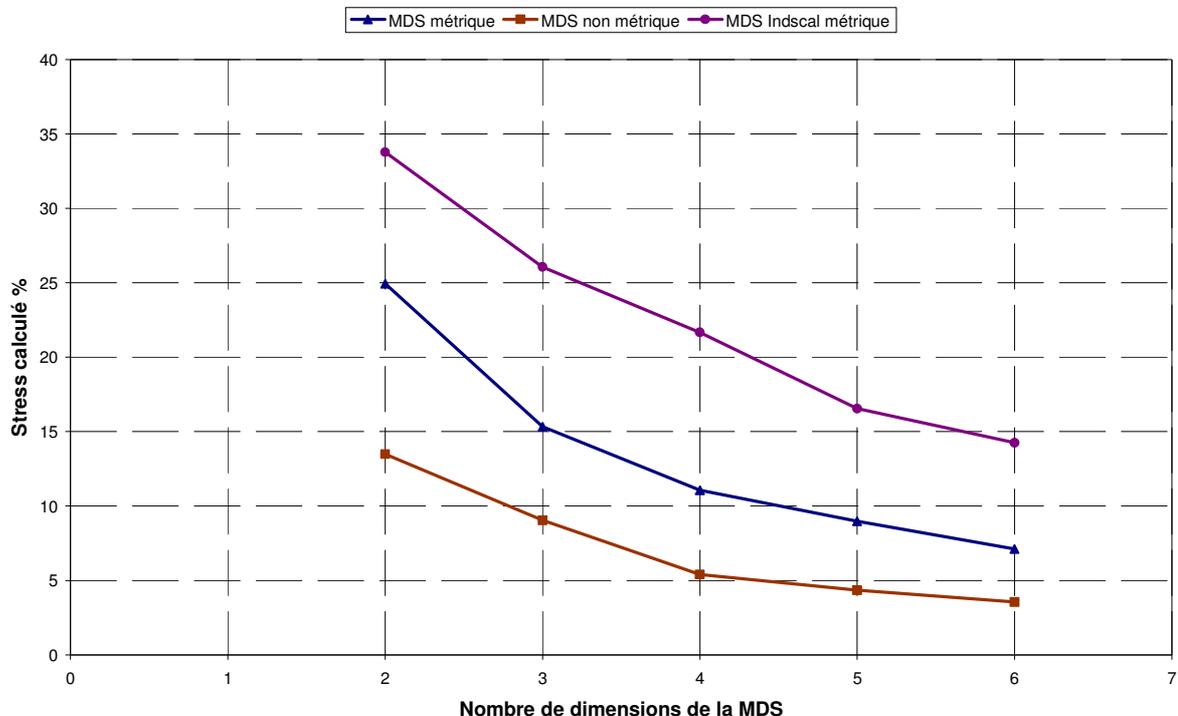
Les analyses multidimensionnelles pratiquées habituellement utilisent des modèles ajustés où le stress calculé est inférieur à 5%. Mais le facteur de stress ne tient pas compte du nombre de degrés du modèle, et il est naturellement meilleur lorsque le nombre de dimensions du modèle de proximité diminue. Un indicateur BIC (Bayesian Information Criterion) du maximum de vraisemblance qui tient compte du nombre de degrés de libertés du modèle existe [6] mais n'a pas été déterminé pour nos modèles de proximité.

Pour nos modèle on choisit, un critère de stress à 5%, il détermine le choix du nombre de dimensions du modèle multidimensionnel. En quelque sorte, cela revient à dire que l'on s'autorise une perte d'information de l'ordre de 5% entre le modèle de distance et les mesures de dissemblance.

#### 4.3.1.2.3. Modèles multidimensionnels calculés

Nous avons effectués plusieurs calculs de distances avec SPSS. Les données ont été traitées avec les algorithmes de calcul de distances ALSCAL métrique et non métrique ainsi et INDSCAL non métrique.

Pour chaque modèle, on trace le coefficient de stress en fonction du nombre de dimensions du modèle.



**Graphique 6 Stress et nombre de dimensions du modèle de proximité**

Le graphique ci dessus nous permet de choisir le modèle multidimensionnel le mieux adapté à nos valeurs de dissemblance. Avec un facteur de stress égal à 14%, même avec 6 dimensions, le modèle multidimensionnel avec pondération obtenu avec INDSCAL n'est pas bien ajusté avec les valeurs de dissemblance. L'affectation de pondérations pour chaque sujet, sur les 6 dimensions ne permet pas d'établir un modèle qui tient compte des différences perceptives inter individuelles. Les modèles calculés avec ALSCAL sont mieux ajustés avec nos valeurs de dissemblance. Quelque soit le nombre de dimensions du modèle, le stress calculé pour le modèle non métrique est inférieur à celui calculé avec un modèle métrique. Notre critère pour le choix du modèle est d'obtenir un stress au environs de 5%. On retient pour la suite le modèle non métrique ALSCAL à 4 dimensions, car au delà, l'ajout d'une cinquième dimension supplémentaire complexifie le modèle, mais n'augmente que peu l'ajustement aux valeurs de dissemblance.

### 4.3.2. Analyse des résultats

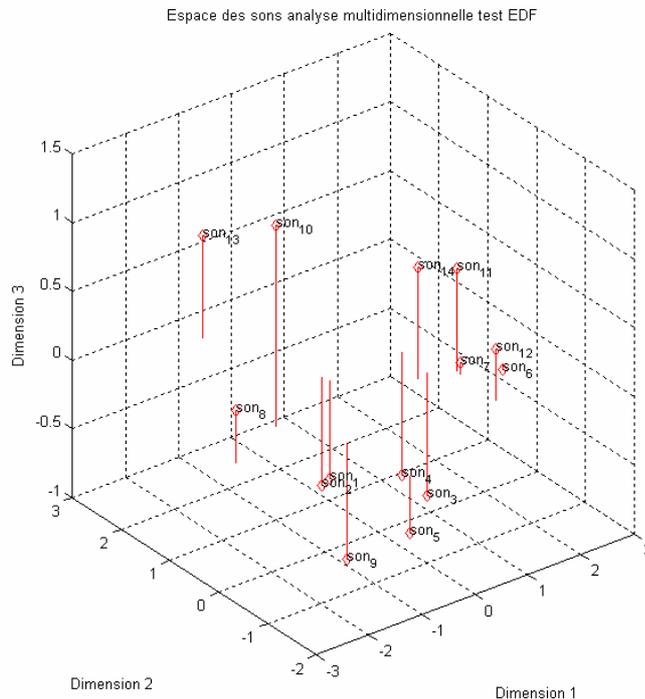
Pour la suite de l'étude, on retient un modèle de proximité non métrique à 4 dimensions.

Les coordonnées des sons dans cet espace sont :

Sons	Dim1	Dim2	Dim3	Dim4
Son1	-0,3216	0,6338	-0,7144	1,1002
Son2	-0,3576	0,7637	-0,7899	-1,7877
Son3	0,9830	0,0504	-0,8917	0,568
Son4	1,0531	0,6472	-0,8951	0,8638
Son5	-1,1341	-1,897	-0,4113	0,3027
Son6	2,0372	-0,3582	-0,041	-0,4333
Son7	1,355	-0,2324	0,082	0,1023
Son8	-2,932	-0,2871	0,3752	0,1391
Son9	-1,2671	-0,7489	-0,8468	-0,2566
Son10	-1,805	0,1252	1,4593	0,722
Son11	1,3685	-0,1299	0,7418	-0,5999
Son12	1,3004	-1,016	0,3716	-0,4156
Son13	-1,0383	2,4588	0,7437	-0,3083
Son14	0,7584	-0,0096	0,8166	0,0032

**Tableau 10 Coordonnées des sons dans l'espace de proximité à 4 dimensions**

Ce qui donne en représentation à 3 dimensions sous MATLAB :



**Figure 4 Espace de proximité des sons du premier test**

Le trait représente la projection des points sur le plan dim1/dim2 pour dim3=0. Cet espace est représenté sous d'autres angles en annexe 4. La première observation sur l'espace de proximité des sons permet de voir que certains sons sont groupés par deux : sons 6 et 12, 11 et 14, 4 et 3, 9 et 5. Ils ont été enregistrés dans les mêmes véhicules dans deux contextes thermiques différents, lorsque la température est maximale et lorsqu'elle est minimale.

## 4.4. Mise en relation des résultats des deux tests

### 4.4.1. Traitement

On souhaite déterminer quels sont les indicateurs physiques qui expliquent le mieux les dimensions de l'espace de proximité entre les 14 sons du corpus. La description multidimensionnelle des jugements de proximité est réalisée par une analyse en composantes principales non normée sous le logiciel SPAD. L'ACP n'est pas utilisée ici comme méthode de réduction des variables au sens strict du terme. On l'utilise pour décrire l'espace de proximité obtenu par l'analyse multidimensionnelle. Les projections des sons sur les axes de l'espace de proximité sont choisies comme variables actives de l'ACP, ce sont les axes factoriels de l'ACP et ils sont orthogonaux. Les indicateurs physiques et les scores de Bradley et Terry sont les variables illustratives qui décrivent les axes factoriels. Pour une ACP classique utilisée pour la réduction de variables, le calcul des valeurs propres pour les axes de l'ACP renseigne sur le nombre d'axes à conserver après réduction. Et d'après le critère de Kaiser, seuls les axes factoriels pour lesquels la valeur propre est supérieure à 1 sont significatifs et peuvent être conservés. Dans notre cas d'utilisation de l'ACP, les axes factoriels (projections de sons dans l'espace MDS) sont conservés même lorsque le critère de Kaiser n'est pas vérifié. En quelque sorte, l'étape de réduction des variables a déjà été opérée lors du calcul de l'espace de proximité et du choix du nombre de dimensions suivant le critère de stress.

La valeur de l'inertie des axes factoriels nous renseigne sur la quantité d'information portée par chaque axe de l'ACP. On observe que la majorité de l'information est portée par l'axe 1, environ un quart est porté par l'axe 2 et le reste est réparti également sur les axes 3 et 4.

Axe	Inertie
1	51,26 %
2	23,43 %
3	13,42 %
4	11,89 %

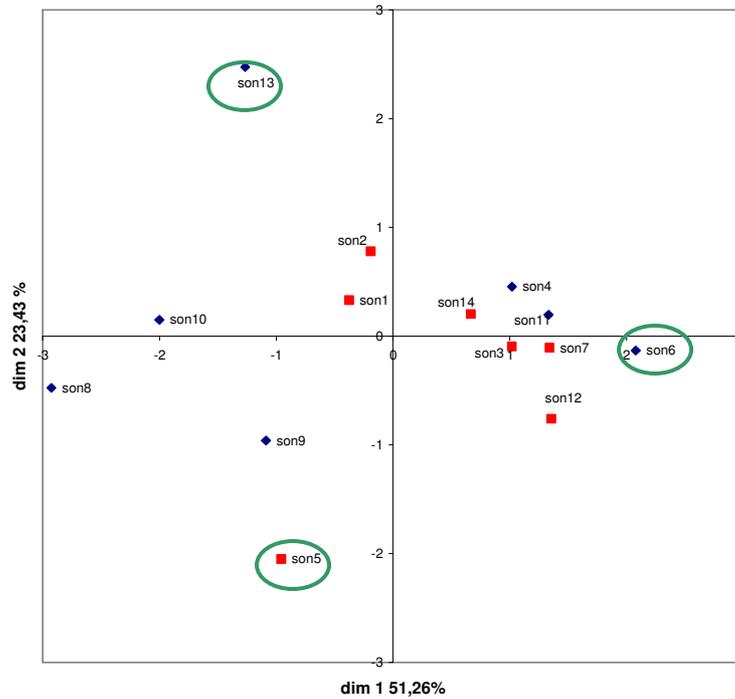
**Tableau 11 Axes de l'ACP et inertie**

L'interprétation des résultats se fait par observation conjointe du placement des sons dans les plans factoriels et des cercles de corrélations entre les axes factoriels et les indicateurs acoustiques, annexe 5.

### 4.4.2. Analyse

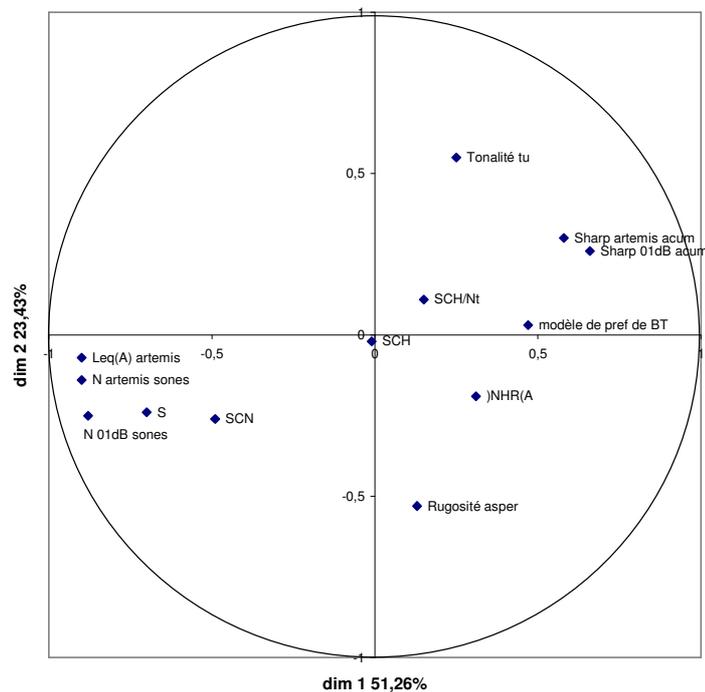
#### 4.4.2.1. Plan factoriel 1/2

L'observation du placement des sons dans les plans factoriels de l'ACP nous renseigne sur la répartition des sons dans l'espace de proximité. Nous avons 14 sons enregistrés dans 7 véhicules dans deux contextes thermiques différents, ce qui donne lieu à des sons chauds repérés par des carrés et sons froids repérés par des losanges.



**Figure 5 Sons dans le plan factoriel 1/2**

La description des axes factoriels est obtenue par les calculs de corrélations entre les axes et les indicateurs physiques.



**Figure 6 Cercle des corrélations entre indicateurs physiques et axes factoriels 1 et 2**

La première observation est que plusieurs sons enregistrés dans le même véhicule sont groupés par deux, ils ont été jugés très ressemblants: sons 3 et 4, sons 11 et 14 et sons 6 et 12. Les sons 11, 14 et 6, 12 obtiennent les meilleurs scores de B&T, et pour le groupe de sujets testés, ces sons là n'ont pas été différenciés en terme de préférence, la significativité du résultat de préférence est obtenue par le calcul de l'intervalle de confiance pour chaque paire

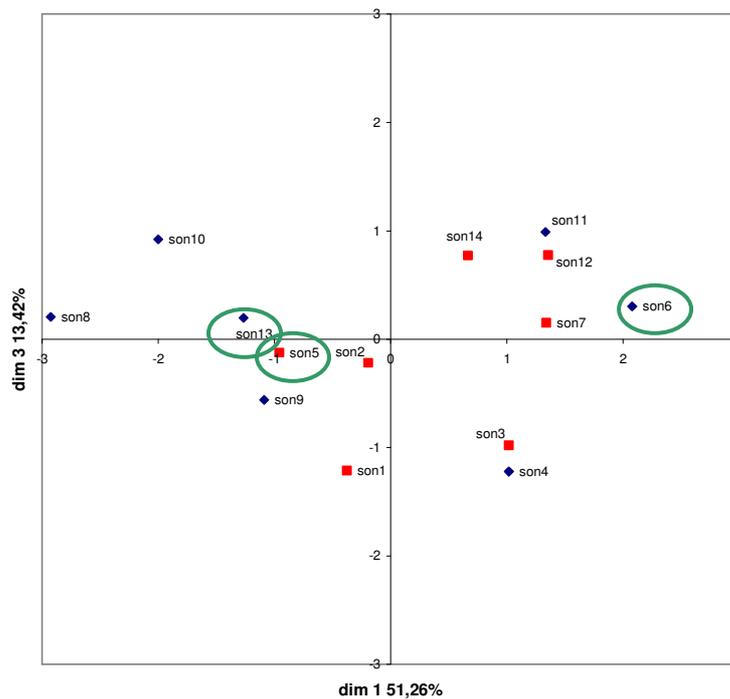
de sons au paragraphe 4.2.2.1 . Les sons 11,14 et 6,12 possèdent une identité acoustique qui leur est forte. On observe aussi que quelques sons sont assez éloignés des autres, ce sont les sons 13, 5 et 6. Par rapport à l'ensemble des sons du corpus, ces sons ont été jugés les plus dissemblant, qu'ils aient obtenus de bons scores de B&T son 6 ou non, sons 13 et 5.

L'inertie pour le premier axe factoriel de l'ACP est de 51,26%, et la moitié de l'information contenue dans l'espace multidimensionnel est portée par l'axe 1. Les indicateurs qui expliquent le mieux la dimension 1 de l'espace multidimensionnel sont la sonie, et le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A,  $Leq(A)$ . La sonie est corrélée négativement avec les scores de B&T: l'intensité subjective est liée au désagrément. L'indicateur qui est ensuite le mieux corrélé avec l'axe 1 de l'ACP et un peu avec l'axe 2 est l'acuité. Aussi, dans ce plan factoriel, l'acuité est dirigée dans le sens des scores de B&T sur la préférence.

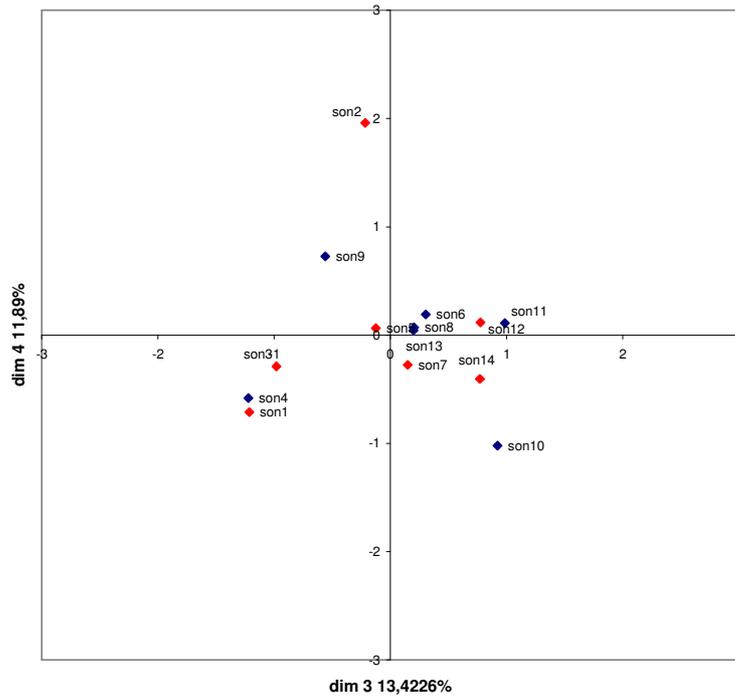
#### 4.4.2.2. Plan factoriel 1/3 et 3/4

L'inertie des axes factoriels 3 et 4 est plus faible que celle des axes 1 et 2. 30% de l'information de l'espace de proximité est révélée par ces plans d'observation. Ces plans factoriels sont importants puisqu'ils nous renseignent sur à ce qui a conduit les sujets aux jugements de dissemblance au-delà de la perception du sujet au-delà de l'intensité subjective entre les sons, ou de l'acuité des indicateurs physiques

On observe le placement des sons dans les plans factoriels 1/3 et 3/4 ci-dessous.

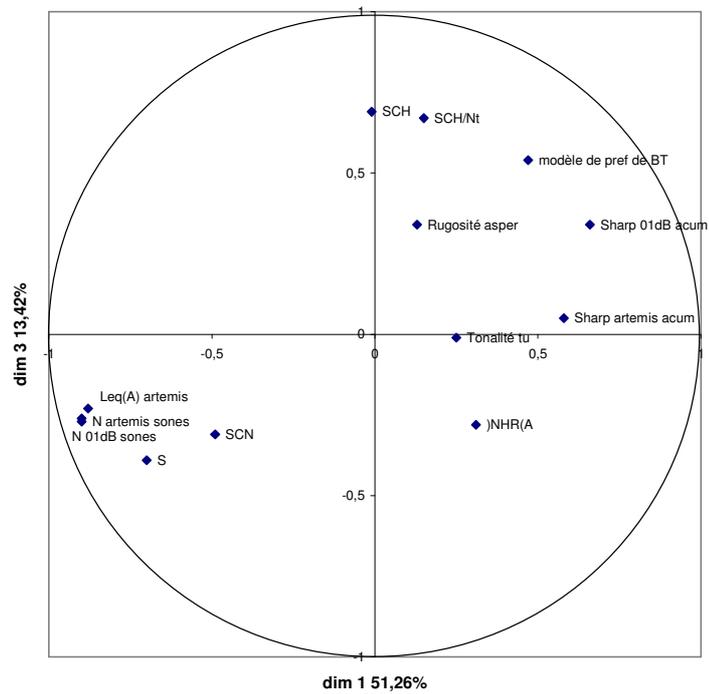


**Figure 7 S sons dans le plan factoriel 1/3**

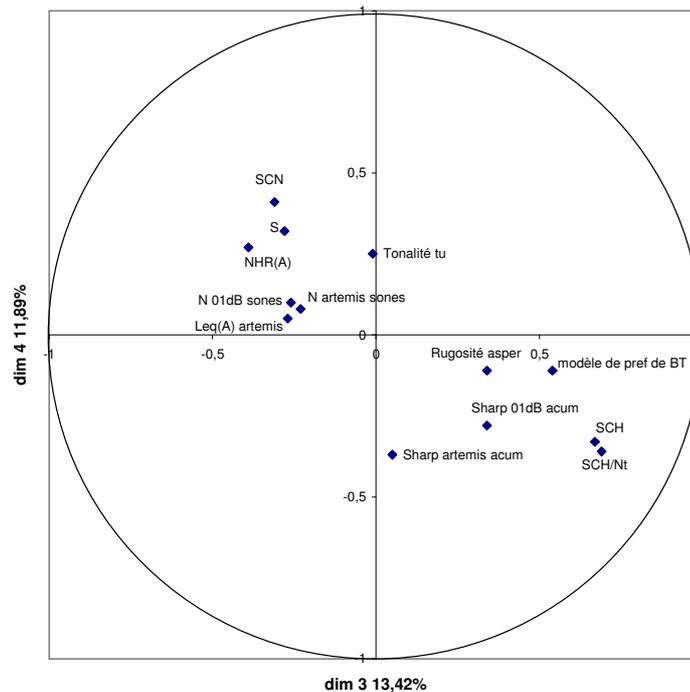


**Figure 8 Sons dans le plan factoriel 3/4**

Et les cercles de corrélations entre indicateurs physiques et axes factoriels.



**Figure 9 Cercle des corrélations entre indicateurs physiques et axes factoriels 1 et 3**



**Figure 10 Cercle des corrélations entre indicateurs physiques et axes factoriels 3 et 4**

Dans le plan factoriel 1/3, on observe que les sons 13, 5 et 6 ont les mêmes coordonnées sur la dimension 3. Or, c'est le centre de gravité harmonique SCH (Spectral Centre Gravity of Harmonics) qui est l'indicateur physique le mieux corrélé à la dimension 3 de l'espace de proximité et il est dirigé dans le sens des scores de B&T. On a calculé cet indicateur sur la partie harmonique du son de soufflage resynthétisé avec les 100 premiers harmoniques extraits, essentiellement les harmoniques moteur. Lors de la mise en contexte, les sujets étaient informés de la situation de la prise de son. Pour les sons de soufflage enregistrés dans notre contexte, il faut donc considérer l'influence de la motorisation. Les sujets préfèrent les sons au contenu harmonique riche. Les sons 11 et 14 ont le centre de gravité de la part harmonique la plus élevée, et obtiennent les meilleurs scores de B&T.

Aucune variable illustrative est clairement corrélée avec la dimension 4 du modèle de proximité dont l'inertie n'est que de 12%. Seulement, de tous les indicateurs physiques calculés, le centre de gravité spectral du résidu bruité SCN (Spectral Centre Gravity of Noise) après extraction des harmoniques du signal est l'indicateur qui est le mieux corrélé avec la dimension 4. Même si les corrélations de SCN avec les axes de l'ACP ne sont pas très fortes pour un axe en particulier, on observe, à la différence d'autres indicateurs, qu'elle existe pour tous les axes avec une proportion variable. La répartition spectrale de la composante bruitée du son n'est donc pas un élément déterminant pour le jugement de dissemblance entre les sons, à la différence de l'intensité subjective, mais elle y contribue de façon plus transversale, conjuguée à d'autres paramètres.

#### 4.4.3. Synthèse

Finalement, l'intensité subjective du son été le facteur le plus utilisé pour juger de la dissemblance entre deux sons du corpus, viennent ensuite l'acuité puis la rugosité. A la lumière des corrélations simples calculées entre les scores de préférence et ces indicateurs, on peut penser que l'espace perceptif de proximité est fortement lié aux jugements de préférence. L'influence de la motorisation est mise en évidence par le calcul du centre de gravité spectral

de la part harmonique du son. Il semble qu'au-delà de l'intensité subjective, les différences de motorisations entre véhicules où ont été enregistrés les sons soient un élément décisif pour le choix de préférence. En outre, les sujets préfèrent les sons au contenu spectral riche, et les sons pour lesquels l'acuité est la plus élevée.

On remarque que les sons 5, 6 et 13 ont été jugé le plus semblable sur la base de leur contenu spectral harmonique, figure 7, mais le plus différent sur la base de leur intensité subjective et de leur rugosité, qui expliquent les axes 1 et 2 de l'ACP. On décide d'utiliser les sons 13, 5 et 6 pour la construction d'un corpus de sons de synthèse au paragraphe 5.

#### 4.5. Questions à caractère évocateur

L'objectif de ce test est de savoir si un son enregistré en contexte thermique chaud ou froid a un effet sur les évocations produites par le son. Le sujet écoute autant de fois qu'il le souhaite un son du corpus. L'ordre de présentation des 14 sons entre les sujets est aléatoire, suivant un plan d'expérience sous la forme d'un carré latin (14\*60). La tâche demandée au sujet est de donner son avis sur six questions à caractère évocatif :

Question n°	Intitulé
1	Ce son est caractéristique d'un système de ventilation
2	Ce système est efficace
3	Ce système est de bonne qualité
4	Ce système permet de se réchauffer
5	Ce système permet de se rafraîchir
6	Ce système évocateur d'un véhicule de petite taille

**Tableau 12 Intitulés des questions à caractère évocatif**

Les échelles classiques de LIKERT [20] utilisées généralement pour répondre à ce type de questionnaire comportent 5 modalités. Pour notre test nous avons volontairement choisi 4 modalités en ne donnant pas la possibilité au sujet de choisir la modalité sans avis, ce qui l'incite à se positionner. L'échelle ne permet pas de contrôler les intervalles séparant deux échelons successifs. Dans ce sens, elles ne permet que d'ordonner les réponses [21]. Le sujet donne son avis en choisissant une réponse à chaque question sur une échelle ordinaire à 4 modalités composée de :

Modalités	Intitulé
1	Tout à fait d'accord
2	Plutôt d'accord
3	Plutôt contre
4	Tout à fait contre

**Tableau 13 Intitulés des modalités de l'échelle de réponse**

Ci-dessous figure l'interface du test telle qu'elle apparaît aux sujets. Cette étape du test dure environ 6mn à 8mn.

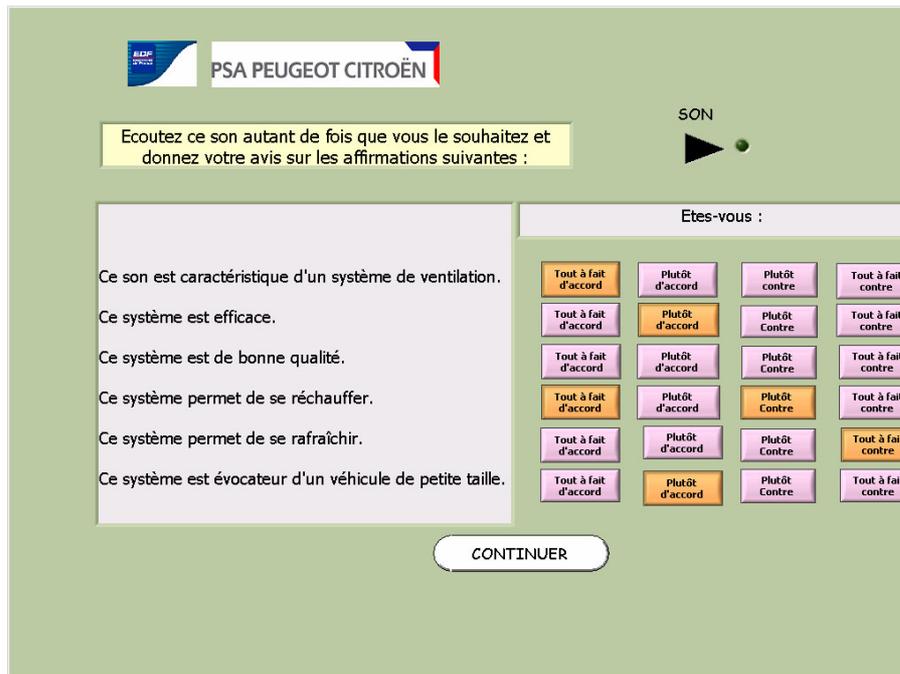


Figure 11 Interface du test de questions à caractère évocateur

#### 4.5.1. Traitement des résultats

L'analyse est produite sur 60 matrices de résultat. Chaque matrice comprend 6 colonnes pour chaque question posée et 14 lignes pour les 14 sons. Une routine MATLAB permet de calculer les occurrences de réponse à chaque modalité pour chaque question. Les calculs réalisés sur ce test figurent en annexe 6.

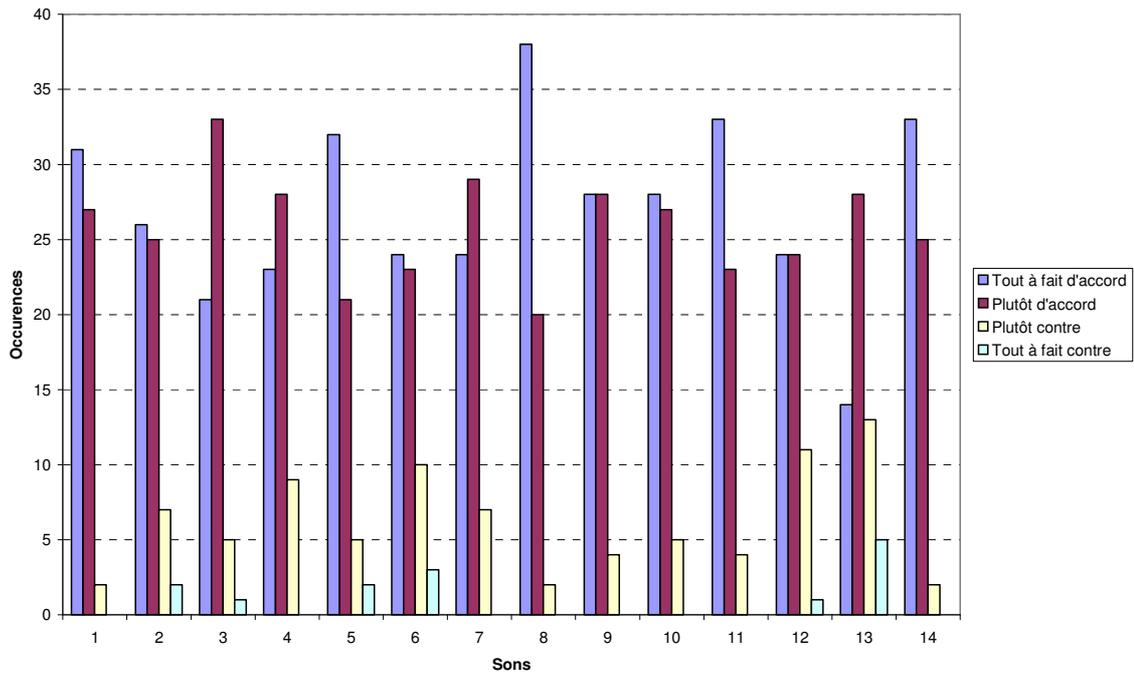
On fait le test du  $\text{Khi}^2$  pour savoir si l'effet « le son a été enregistré dans un contexte thermique chaud » ou « le son a été enregistré dans un contexte thermique froid » influe sur la réponse à la question évocative. Pour cela, les occurrences de réponse aux 4 modalités sont comptabilisées séparément pour les sons enregistrés en contexte thermique chaud ou froid. Si le  $\text{Khi}^2$  est inférieur à 0.05, l'enregistrement dans un des deux contextes a un effet sur la réponse à la question évocative.

Puisque notre échelle de réponse est symétrique, on regroupe entre elles les modalités tout à fait d'accord et d'accord ainsi que les modalités tout à fait contre, et plutôt contre. On discute sur les occurrences de modalités d'accord ou contre la question évocative pour tous les sons et tous les sujets.

#### 4.5.2. Analyse des résultats

Question 1 « Ce son est caractéristique d'un système de ventilation »

Pour cette question le test du  $\text{Khi}^2=0,7555$ . Il n'y a pas d'effet du contexte d'enregistrement sur la réponse à la question.



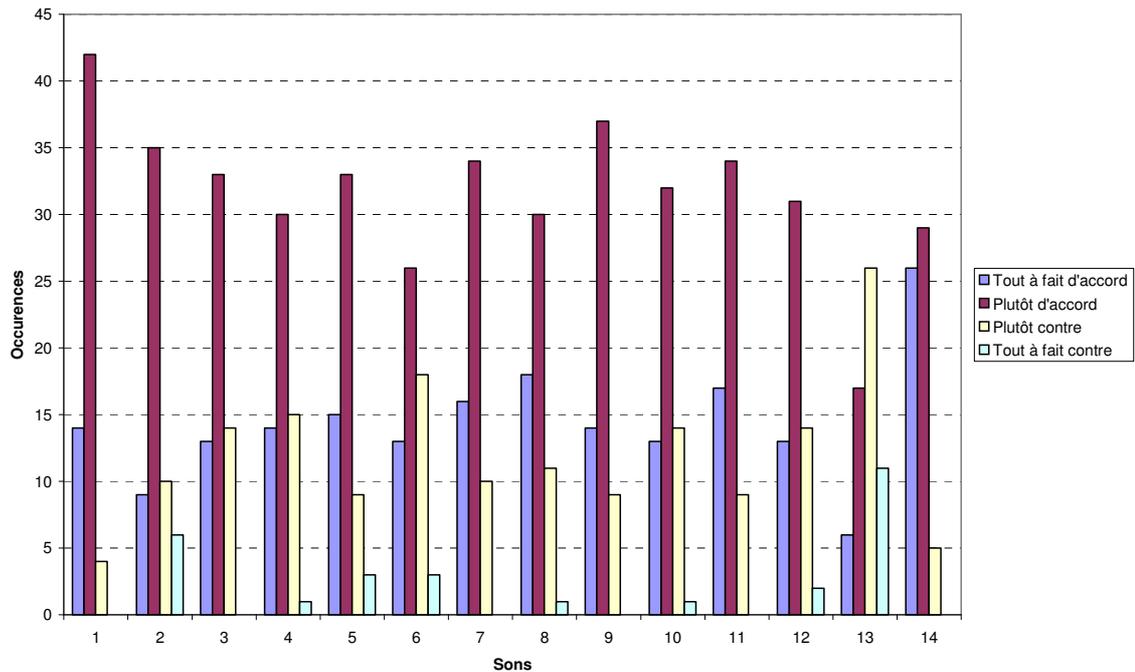
**Graphique 7 Occurrences de réponses à la question 1**

Les réponses à la question 1 nous permettent de dire que globalement, le groupe de sujets s'accorde à répondre que tous les sons qui leur sont présentés sont caractéristiques d'un système de ventilation avec 740 occurrences contre 100. Cependant, on remarque qu'un plus grand nombre de sujets ne sont pas d'accord, voire tout à fait pas contre avec la question 1 sur les sons 6, 12 et 13. Or, ces sons appartiennent aux groupes A et B, et obtiennent respectivement les 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 13<sup>ème</sup> scores de Bradley Terry.

Plusieurs explications sont possibles. Soit, les sons 6 et 12 qui figurent parmi les sons les plus appréciés n'évoquent pas des sons de soufflage pour certains sujets, soit pour ces sons là la réponse à la question est guidée par un choix de préférence.

Question 2 « Ce système est efficace »

Pour cette question le test du  $\chi^2=0,0082$ . Il semble que les sons enregistrés en contexte thermique chaud sont plus évocateurs de systèmes efficaces que les sons enregistrés en contexte thermique froid.

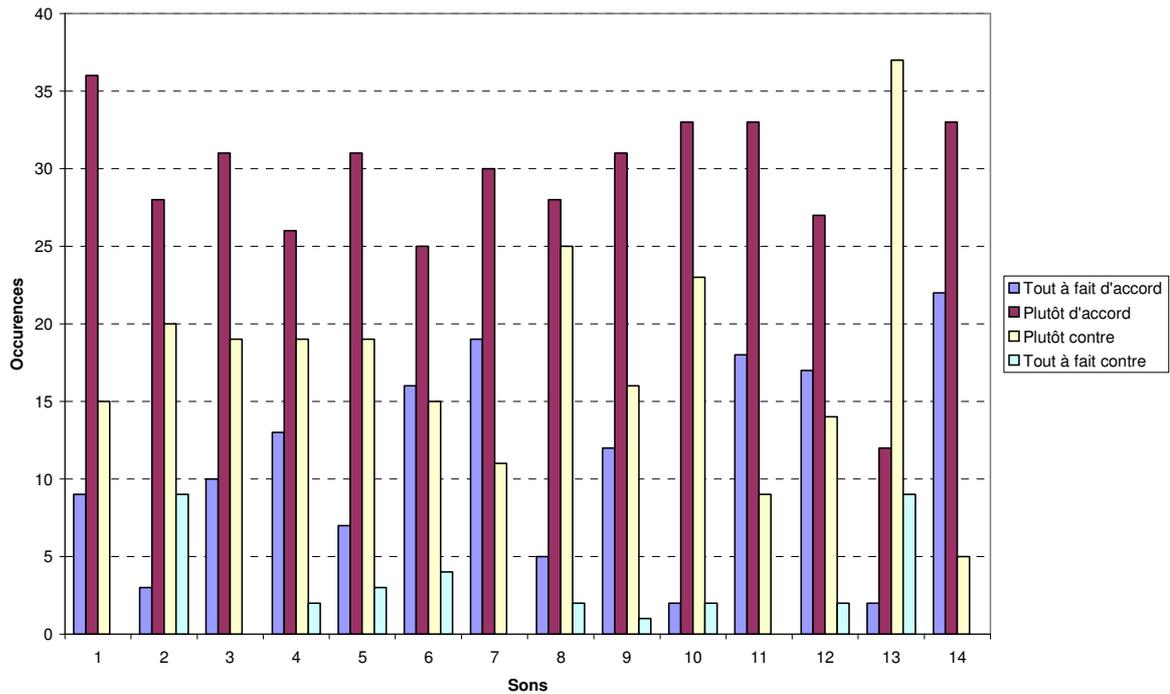


**Graphique 8 Occurrences de réponse à la question 2**

Pour cette question, globalement les sujets sont d'accord pour tous les sons avec 644 occurrences contre 196 mise à part quelques réponses marginales. Pourtant, ils se positionnent plus souvent de manière « plutôt d'accord » que « tout à fait d'accord ». Les sujets expriment des avis plus incertains. On regarde de plus près les occurrences de réponses à chaque modalité pour des sons particulier. Personne n'a été « tout à fait contre » avec la question 2 sur le son 14 qui est aussi celui qui recueille le meilleur score de B&T. En revanche, 11 sujets soit un sixième du groupe a répondu « tout à contre» à la question pour le son 13 qui recueille le 13<sup>ème</sup> score de B&T. Finalement, les sons qui ont été préférés sont ceux qui évoquent les systèmes les plus efficaces.

### Question 3 « Ce système est de bonne qualité »

Pour cette question, le test du  $\chi^2=0,0033$ . Il semble qu'il y ait une effet du contexte d'enregistrement des sons sur les occurrences de réponse aux questions. Les sons enregistrés dans le contexte thermique chaud sont plus évocateurs de système de bonne qualité que les sons enregistrés dans un contexte acoustique froid.

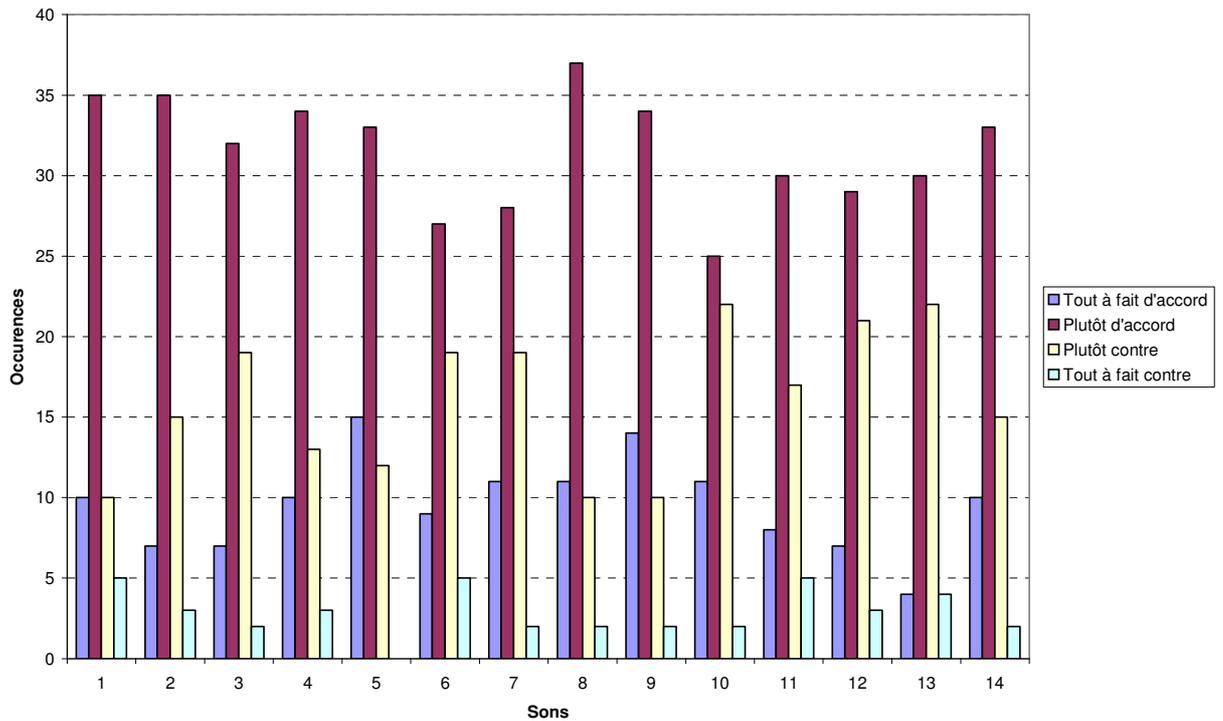


**Graphique 9 Occurrences de réponses à la question 3**

Les sujets sont majoritairement en accord avec la question posée, 559 occurrences contre 281 pour tous les sons, sauf pour le son 13 qui recueille 46 occurrences en désaccord et 14 en accord. Pour cette question, il existe aussi un lien entre les scores de préférence et l'évocation de bonne qualité produite par le son.

Question 4 « Ce système permet de se réchauffer »

Pour cette question le test du  $\text{Khi}^2=0,7860$ . Il n'y a pas d'effet du contexte thermique sur l'évocation du réchauffement possible procuré à l'écoute du son.

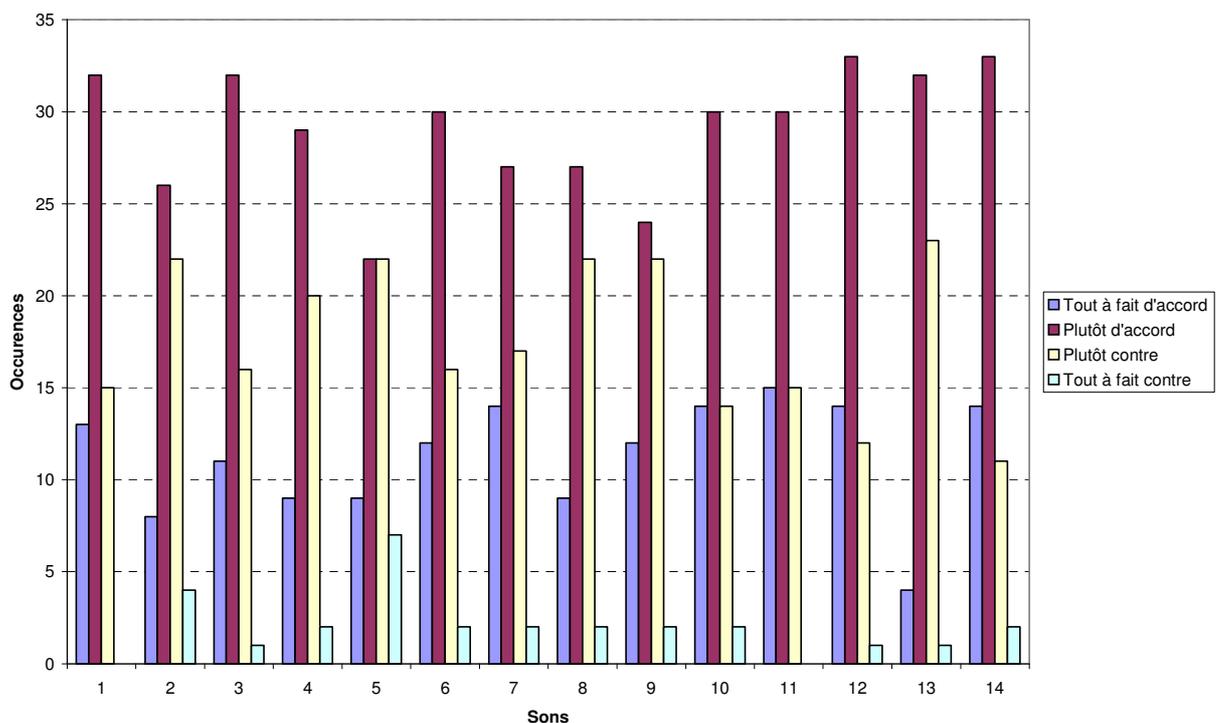


**Graphique 10 Occurrences de réponse à la question 4**

Les sujets sont majoritairement d'accord avec la question posée avec 677 occurrences contre 264. Il n'y a pas de nette différence sur les occurrences de réponses aux questions entre les sons.

Question 5 « Ce système permet de se rafraîchir »

Pour cette question, le test du  $\text{Khi}^2=0,4100$ . Il n'y a pas d'effet du contexte d'enregistrement du son sur la réponse à cette question.

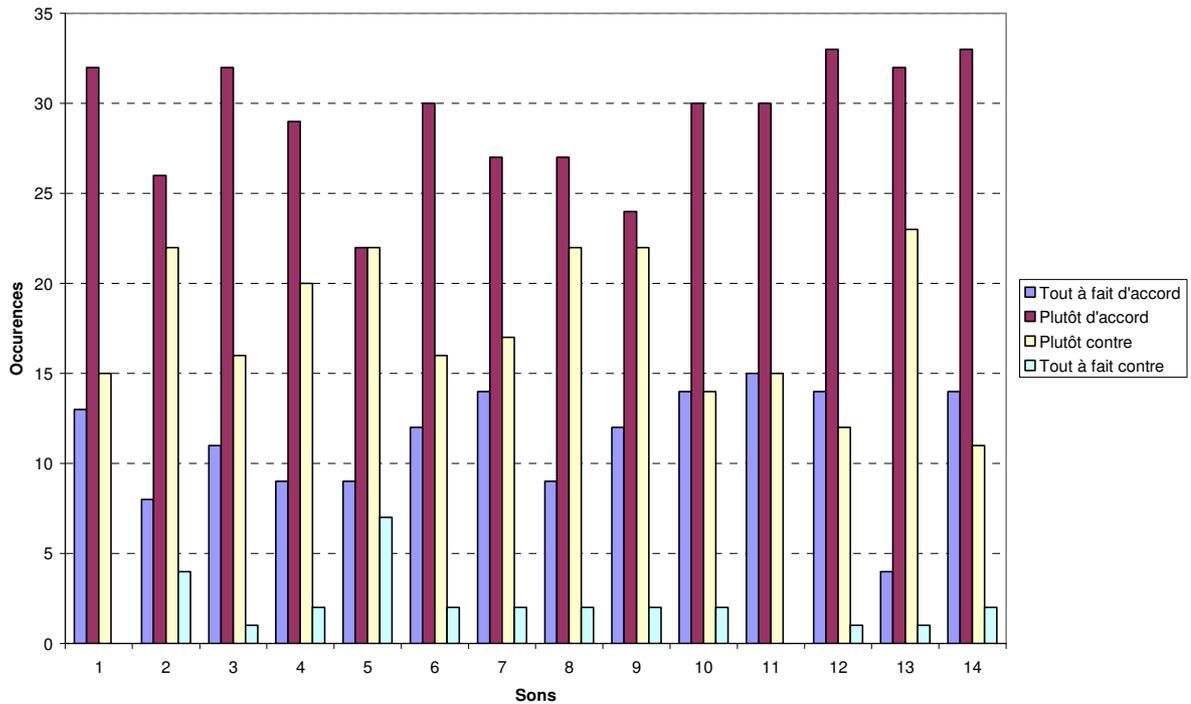


**Graphique 11 Occurrences de réponse à la question 5**

Les sujets sont en accord avec la question pour tous les sons, et on comptabilise 665 occurrences de sujets en accord contre 175 en désaccord. Le son 14 recueille 47 réponses en accord avec la question, et le son 5 n'en a que 31. Or, le son 5 figure parmi ceux qui obtiennent les plus faibles scores de B&T.

Question 5 « Ce système est évocateur d'un véhicule de petite taille »

Pour cette question le test du  $\text{Khi}^2=0,005428$ . Il n'existe pas d'effet du contexte d'enregistrement sur l'évocation d'un véhicule de petite taille.



A cette question, pour tous les sons, on relève 357 occurrences de sujets en accord, contre 503 en désaccord. Les sons 14 et 5 qui ont obtenu des réponses « tout à fait contre » à la question sont enregistrés dans les véhicules les plus petits du corpus. Il n'y a pas de cohérence entre les occurrences de réponse à la question et les dimensions des véhicules choisis initialement.

#### 4.5.3. Synthèse

Il semble que les sons enregistrés dans le contexte thermique chaud sont les plus évocateurs de systèmes efficaces et de bonne qualité. Par contre, le test de  $\text{Khi}^2 > 0,05$  aux questions 4 et 5, montre que le contexte thermique n'a pas d'effet sur la réponse aux questions « Ce son permet de se réchauffer », « Ce son permet de se rafraîchir ». Les sujets n'ont pas perçu de différence entre les sons chaud et froid. En fait, il semble qu'il y ait plus de différence perçue entre les sons enregistrés dans deux véhicules différents, qu'entre les sons enregistrés en contexte thermique chaud ou froid. Les sons chauds et froids ne sont pas perçus différemment sur le seul critère d'évocation du chaud ou du froid. Le lien entre les évocations à l'écoute de sons dans une salle à température ambiante constante, et les conditions thermiques de l'enregistrement n'a pas été démontré.

Pour conclure, on observe que les sons les mieux appréciés sont ceux qui évoquent le plus des systèmes de ventilation, de qualité et efficaces et qu'ils sont indifféremment les mieux adaptés pour se rafraîchir ou se réchauffer.

Cependant plusieurs questions restent ouvertes. Notre échelle de réponse au questionnaire suivant 4 modalités n'a pas été validée. Les termes employés pour répondre aux questions « tout à fait d'accord », « plutôt d'accord » etc.. sont ils bien adaptés répondre aux questions posées ? Le vocabulaire utilisé pour les six questions fait appel aux représentations individuelles des sujets, a t il été bien compris ? Qu'est ce qu'un son efficace ? Est il possible d'évaluer le degré d'efficacité d'un système de soufflage à l'écoute du son qu'il produit ?

## **5. Création d'un corpus de sons de synthèse**

### **5.1. Objectifs**

Lors de l'étude IRCAM/EDF sur les sons de soufflage, des sons de synthèse avaient été créés par interpolation pour combler certains trous laissés dans l'espace perceptif obtenu par jugement de dissemblance entre sons réels jugés par paires par un panel d'experts. Notre démarche est quelque peu différente. Les sons de synthèse sont créés dans le but de constituer un corpus de sons à partir de sons réels dont on connaît bien les caractéristiques physiques et perceptives, par le calcul d'indicateurs psychoacoustiques d'une part, et les jugements de dissemblance d'autre part. Les sons réels utilisés pour la synthèse, sont choisis à partir des résultats des analyses acoustiques et perceptives des premiers tests.

### **5.2. Choix des sons réels pour la synthèse**

Les sons sont choisis après analyse des premiers tests perceptifs. Au cours de cette analyse, on a vu que la préférence était liée à l'intensité des sons, au centre de gravité spectral de la composante harmonique du son et à la rugosité. On a aussi remarqué que le centre de gravité spectral de la composante bruitée du son était un indicateur lié à toutes les dimensions de l'espace de proximité entre les sons.

Les sons qui servent de base à la synthèse sont les 5,6,13 entourés dans les plans factoriels 1/2 et 1/3 de l'ACP. Ils constituent les limites de l'étalon servant à la création de l'espace des sons de synthèse pour plusieurs raisons.

Premièrement, ces 3 sons obtiennent des scores de préférence de Bradley Terry représentatifs de notre corpus en terme de préférence. Les sons 13 et 5 obtiennent des notes faibles et moyenne, le son 6 fait partie des 4 sons les mieux notés. Ensuite, pour ces sons la rugosité calculée est faible, moyenne et forte par rapport à l'ensemble des autres sons avec 2,82 asper, 3,01 asper et 3,16 asper, et ils sont éloignés dans trois régions espacées des plans 1 et 2 de l'ACP. Enfin, les sons sont proches sur l'axe factoriel 3 de l'ACP et les centres de gravité spectraux de la part harmonique des sons 5, 6 et 13 sont relativement dans une même gamme de fréquence

On se fixe comme objectif 12 sons de synthèse, et on garde les sons réels 3 et 4 du corpus initial enregistrés dans le même véhicule. Pour ces sons la rugosité calculée est de 2,83 asper et de 3,10 asper. Ils se situent dans les limites inférieures et supérieures de notre étalon de rugosité et leur sonie est égale à 4,11 sones.

### 5.3. Création des sons des synthèse

La rugosité est un indicateur psychoacoustique qui varie essentiellement sur la base du contenu harmonique basse fréquence des sons. On décide de fixer l'indicateur de rugosité et le centre de gravité spectral de la part harmonique de nos sons de synthèse en utilisant les parts harmoniques des sons 5, 6, 13. On rajoute ensuite une composante bruitée de synthèse. Puis l'intensité subjective des sons sera fixée une fois les sons synthétisés, par égalisation en sonie « à l'oreille » sur un groupe de sujets.

#### 5.3.1. Ajout de la composante bruitée

Un patch de synthèse sonore en temps réel, est réalisé sous Max/MSP. Le patch permet de créer des sons de synthèse en ajoutant une part harmonique, celle des sons 5, 6 et 13, et une composante bruitée obtenue par filtrage d'un bruit blanc ou rose. La création du son de synthèse, se fait à l'écoute de sons réels, et de la part harmonique du son de synthèse en cours de construction auquel on ajoute une composante bruitée.

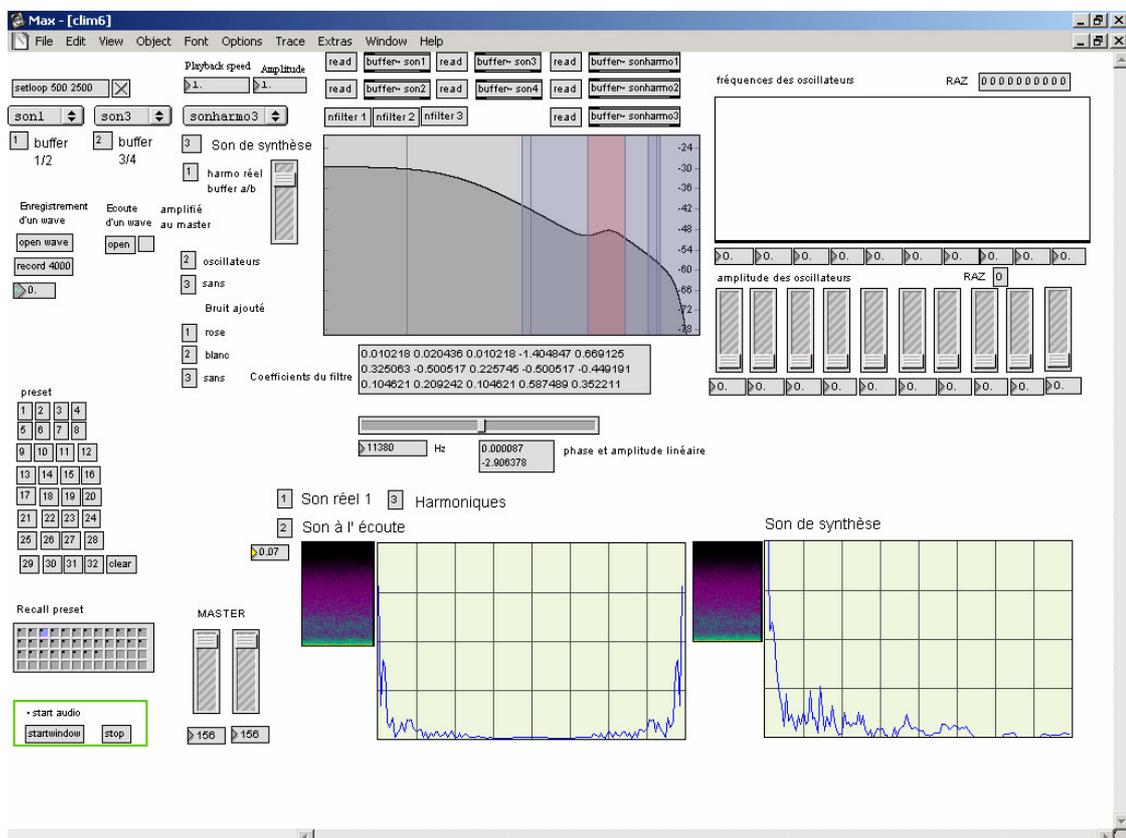


Figure 12 Patch de synthèse Max/MSP

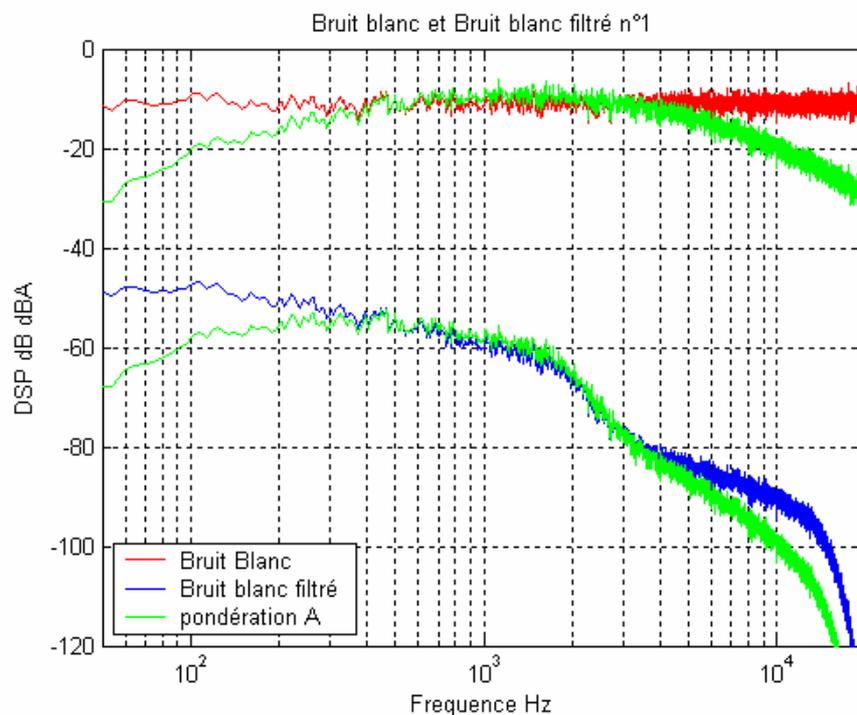
La fonction de filtrage temps réel MSP filtergraph~, affiche des gabarits de filtres numériques à deux pôles et deux zéros modifiables en temps réel et renvoie les coefficients de chaque filtre à deux pôles et deux zéros. La fonction cascade~ implémente le filtre numérique global à partir des quatre coefficients de chaque filtre unitaire. Plusieurs combinaisons de 1 à 5 filtres divers : passe-bas, passe-bande, coupe bande, notch sont essayées. En basculant entre des sons réels et le son de synthèse en cours de construction, on observe que trois filtres placés en cascade : deux passe-bas, et un notch sont suffisants pour construire un son de synthèse dans

la même veine qu'un son réel. On retient quatre bruits que l'on ajoute sur les 3 parts harmoniques des sons 5, 6 et 13, ce qui nous fait 12 sons de synthèse.

Son de synthèse n°	Partie harmonique du son réel n°	Bruit filtré n°
1	5	1
2	6	1
3	13	1
4	5	2
5	6	2
6	13	2
7	5	3
8	6	3
9	13	3
10	5	4
11	6	4
12	13	4

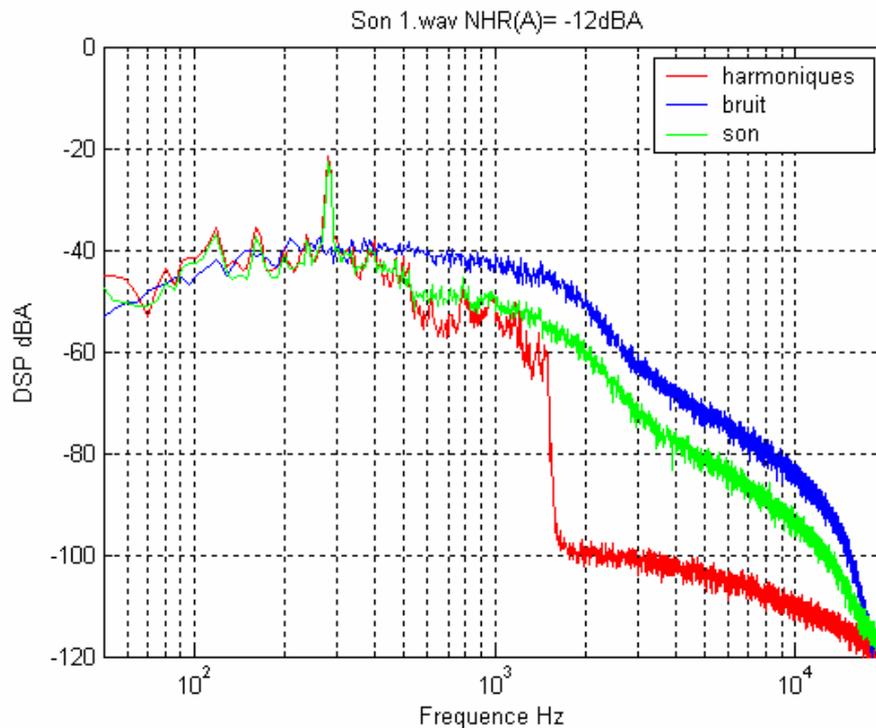
**Tableau 14 Composition des sons de synthèse**

Les coefficients des quatre filtres deux zéros, deux pôles paramètres MSP, sont en annexe 13. Les sons durent 3 secondes avec fade in et out. Ci-dessous, figure la densité spectrale du bruit de synthèse résolution 6Hz obtenue par filtrage et tracée sous MATLAB.



**Graphique 12 DSP du bruit n°1**

Les densités spectrales de puissance à résolution 6Hz des sons de synthèse, de leur part harmonique et de leur part bruitée sont en annexe 9. Ci-dessous, pour le son 1 créé à partir du bruit 1 et de la part harmonique du son 13 ( du premier test ).

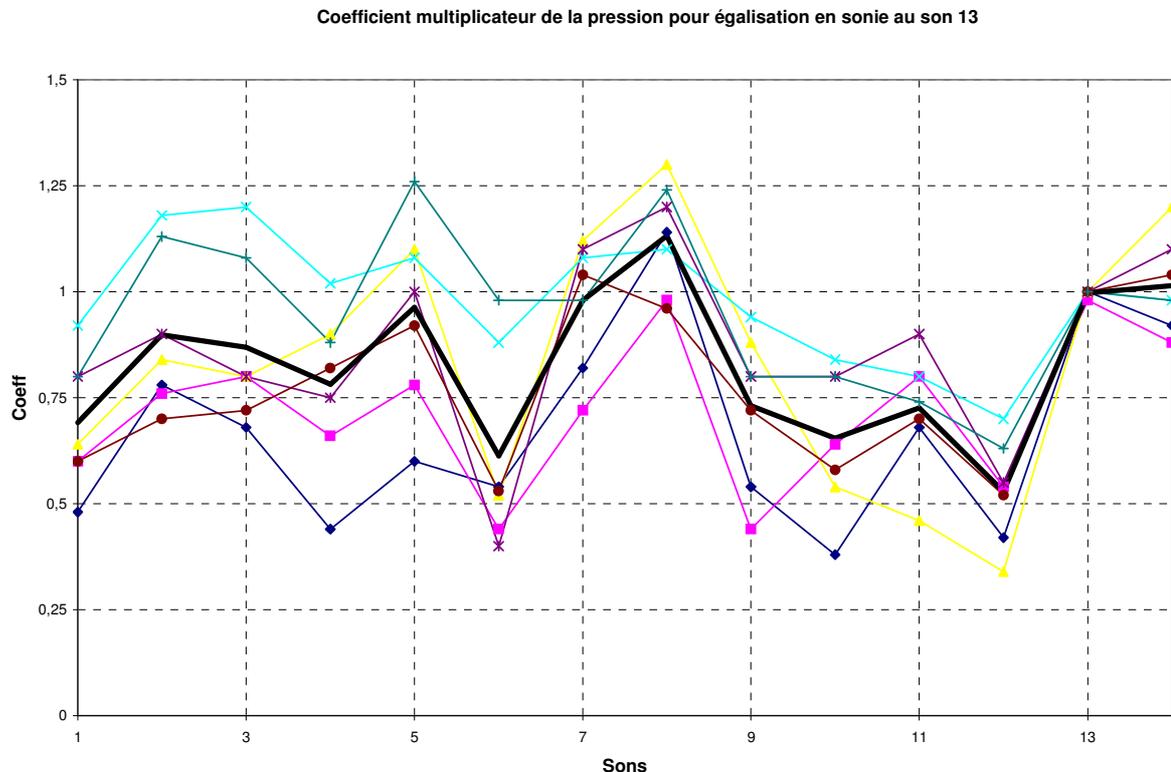


**Graphique 13 DSP du son 1**

### 5.3.2. Egalisation en sonie

L'égalisation de l'intensité subjective des sons de synthèse est réalisée à l'oreille lors d'un test acoustique sur 7 sujets. L'interface du patch Max/MSP d'égalisation est en annexe 7. Le sujet ne sait pas que les sons à égaliser sont des sons de synthèse, la tâche qui lui est demandée est de modifier le niveau du son par déplacement d'un fader pour qu'il ait la même force sonore qu'un son de référence. La tâche d'égalisation en intensité subjective est difficile puisque les sons à égaliser présentent des timbres tous différents, et le choix du son de référence pour l'égalisation s'avère capital. Le son réel 4 est choisi comme son de référence pour son timbre représentatif et sa sonie moyenne égale à celle du son 3. Pour la suite, ajoutés aux sons de synthèse, les sons 3 et 4 deviennent les sons 13 et 14.

On observe ci-dessous les coefficients multiplicateurs en pression à appliquer aux échantillons du fichier audio de chaque sujet. Le trait en gras représente la valeur moyenne des coefficients pour tous les sujets :



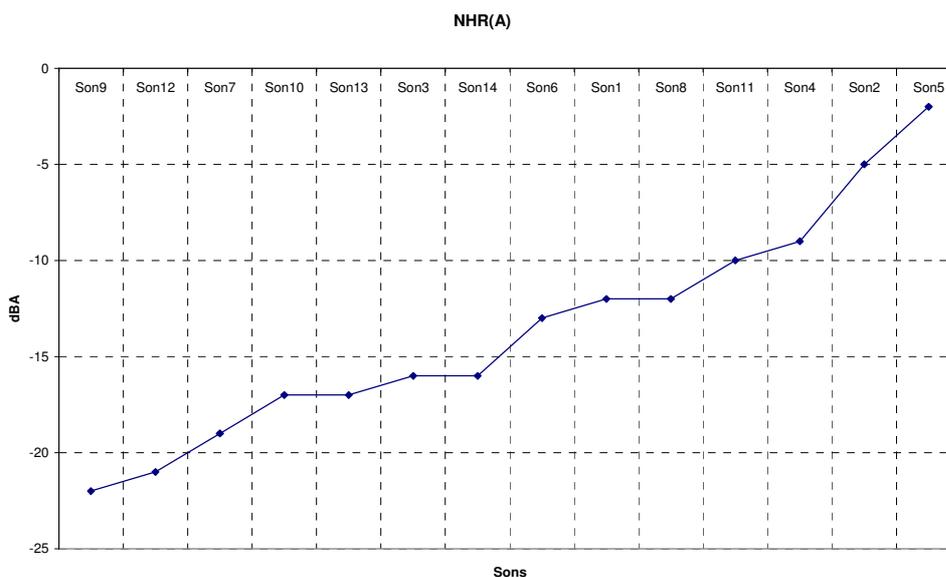
**Graphique 14 Coefficients d'égalisation en sonie des sons de synthèse pour les 7 sujets et moyenne**

Globalement les sons de synthèse sont perçus légèrement plus forts que le son de référence, puisque les coefficients moyens sont généralement inférieurs à 1. Le son perçu le plus fort a été le son 12. Pour ce son, le coefficient le plus à appliquer est de 0,53 ce qui équivaut à  $10 \cdot \log_{10}(0,5^2) = -6\text{dB SPL}$ . L'écart type sur les coefficients à appliquer aux sons est variables entre 0,12 et 0,22 pour les sons de synthèse, et il est de 0,13 pour le son réel 14. Les sujets sont plus consensuels pour le son réel 14 que pour les sons de synthèse 1 à 12. Il ne faut pas oublier qu'il est enregistré dans le même véhicule que le son de référence et leurs timbres sont proches. Un écart type de 0,22 ne semble pas anormal pour les sons de synthèse 5 ou 9. On applique ensuite les coefficients multiplicateurs sous MATLAB, et les sons sont modifiés physiquement.

### 5.3.3. Indicateurs calculés pour les sons de synthèse

Les indicateurs psychoacoustiques calculés pour les sons de synthèse égalisés en sonie sont en annexe 10. La sonie est calculée par le logiciel 01dB dBFA. Après égalisation, les valeurs de sonie ne sont pas identiques entre elles ce qui est certainement dû au mode de calcul de la sonie, d'autres raisons d'ordre expérimentales complexes liées à la méthode d'égalisation en sonie. Simplement, les valeurs sont comprises entre 3,93 sones pour le son le moins intense et 5,24 pour le son le plus intense.

L'importance du critère NHR(A) est montrée par Susini et al [6]. Pour nos sons de synthèse égalisés en sonie, les valeurs de cet indicateur s'échelonnent dans une gamme allant de -22dBA à -2dBA, comme le montre le graphique ci-dessous.



Graphique 15 Critère NHRA sur les sons de synthèse

## 6. Tests perceptifs sur les sons de synthèse

L'objectif est d'observer dans quelle proportion est modifié l'espace des timbres pour les sons de synthèse par rapport aux sons réels, en relation avec les critères acoustiques que l'on a choisi de faire évoluer. On pourra aussi déterminer quels sons ont été choisis en terme de préférence, et quels sont les indicateurs liés à ces choix. Pour cela, on propose aux sujets un test de comparaison par paires sur la préférence, puis un test de comparaison par paires sur la dissemblance avec les 14 sons du corpus de sons de synthèse. Pour les deux tests, les paires de sons sont présentées en ordre aléatoire sur les sujets par l'utilisation de plans d'expériences sous la forme de carrés latins de taille 60\*91.

### 6.1. Mise en place

Les tests se déroulent au Centre Technique de Vélizy. 60 sujets qui n'ont pas participé aux premiers tests sont recrutés par la société EUROSYN. Ils possèdent tous une automobile avec climatisation. Le déroulement du second test est identique à celui du premier test, sans la partie consacrée aux questions. Cette fois ci, les sujets passent les tests par groupes de trois sur les postes de restitution équipés de matériel Head Acoustics du laboratoire acoustique de la DRIA/PEFH dont la constitution est détaillée au paragraphe 3.3. L'interface est identique à celle des premiers tests.

## 6.2. Test de comparaison par paires sur la préférence

### 6.2.1. Traitement des résultats

Le traitement des résultats est en tout point similaire au traitement des résultats du test sur les sons réels.

#### 6.2.1.1. Calcul des notes sur les occurrences de préférence

On calcule les occurrences de préférence d'un son pour tous les sujets. Le tableau ci-dessous se lit de la gauche vers la droite. Par exemple, le son 1 a été préféré au son 2 par 28 sujets, le son 2 a été préféré au son 1 par 32 sujets. Aussi on calcule une note pour chaque son en sommant les occurrences et en divisant par le nombre de présentation du son,  $13 \times 60$ , soit 13 fois par sujets 60.

	Son1	Son2	Son3	Son4	Son5	Son6	Son7	Son8	Son9	Son10	Son11	Son12	Son13	Son 14	note
Son 1	0	28	15	11	9	14	30	48	17	46	52	34	28	20	0,451
Son 2	32	0	14	4	10	10	24	51	26	41	48	34	23	25	0,438
Son 3	45	46	0	17	16	18	35	46	49	47	53	53	24	30	0,614
Son 4	49	56	43	0	26	32	46	53	37	52	52	43	37	40	0,726
Son 5	51	50	44	34	0	18	32	51	31	49	54	44	33	36	0,676
Son 6	46	50	42	28	42	0	34	52	52	48	55	54	33	38	0,736
Son 7	30	36	25	14	28	26	0	45	27	43	46	38	28	33	0,537
Son 8	12	9	14	7	9	8	15	0	18	25	42	25	18	19	0,283
Son 9	43	34	11	23	29	8	33	42	0	34	50	37	26	21	0,501
Son 10	14	19	13	8	11	12	17	35	26	0	47	28	18	20	0,344
Son 11	8	12	7	8	6	5	14	18	10	13	0	8	7	10	0,162
Son 12	26	26	7	17	16	6	22	35	23	32	52	0	21	22	0,391
Son 13	32	37	36	23	27	27	32	42	34	42	53	39	0	33	0,586
Son 14	40	35	30	20	24	22	27	41	39	40	50	38	27	0	0,555

**Tableau 15 Occurrences de préférence et note moyenne**

#### 6.2.1.2. Modèle de Bradley Terry sur la préférence

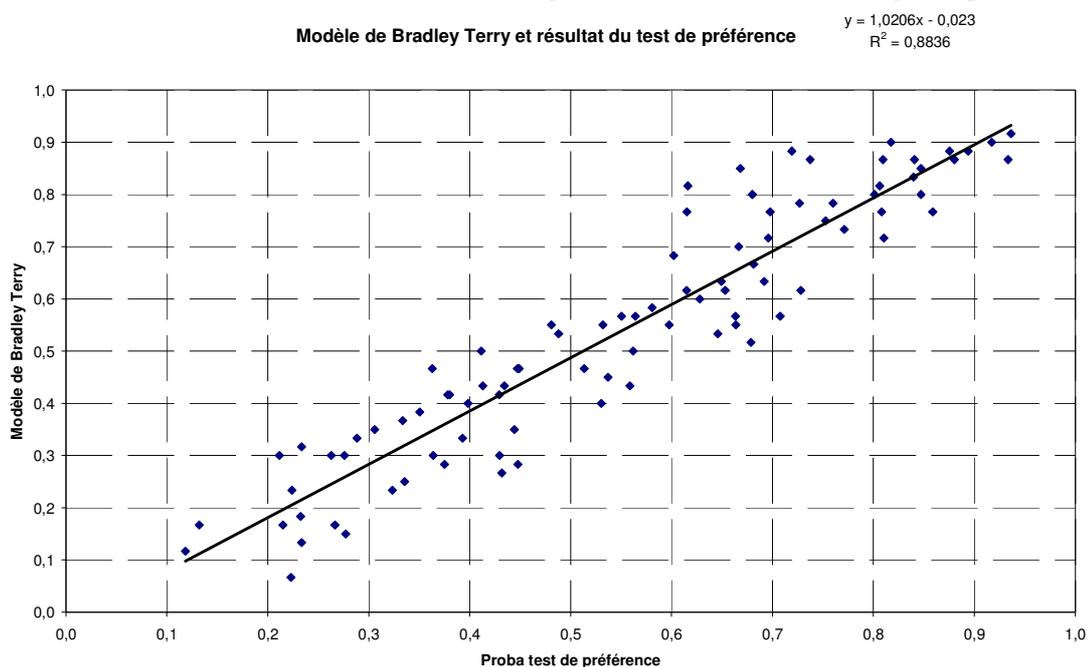
L'hypothèse forte qui nous permet de calculer les scores de B&T est d'avoir un groupe de sujets homogène. Les scores sont :

Sons	Score de B&T
Son 1	0,064
Son 2	0,068
Son 3	0,033
Son 4	0,02
Son 5	0,025
Son 6	0,019
Son 7	0,045
Son 8	0,137
Son 9	0,052
Son 10	0,103
Son 11	0,274
Son 12	0,083
Son 13	0,037
Son 14	0,042

**Tableau 16 Scores de préférence du modèle de B&T pour les 14 sons**

### 6.2.1.3. Comparaison entre les scores de B&T et les notes sur les occurrences

On compare les probabilités pour les paires de sons, en traçant le nuage de points entre la probabilité de B&T et la probabilité de préférence calculée sur les occurrences. La validité du modèle de B&T est vérifiée en calculant une régression linéaire sur le nuage de points.

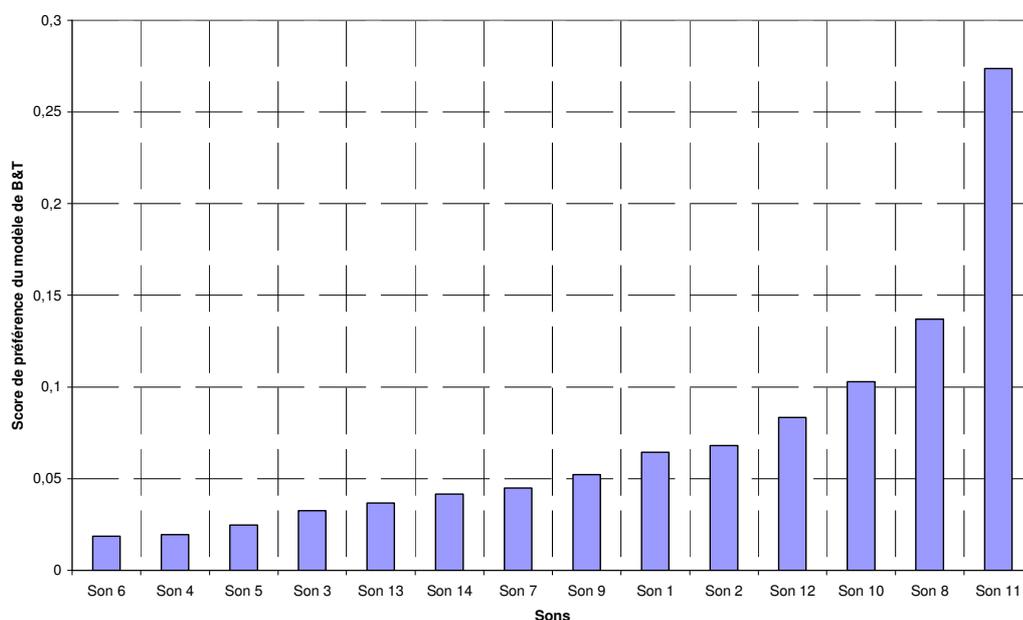


**Graphique 16 Ajustement du modèle de préférence de B&T**

Le coefficient de corrélation sur la droite de régression linéaire entre les points issus des deux ensembles de données est de  $R^2=0,88$ . Ce résultat nous permet d'utiliser le score de B&T comme un bon indicateur de la préférence des sujets.

### 6.2.2. Analyse des résultats

Le graphique ci-dessous, regroupe les scores de B&T en fonction des sons classés par ordre croissant.



**Graphique 17 Score de B&T par ordre croissant**

A titre de comparaison avec le premier test, sur la base de la préférence, ici 85 paires ont été jugées significativement différentes contre 14 lors du premier test, voir paragraphe 4.31.4. Les 14 sons de l'espace sonore de synthèse ont donc été perçus beaucoup plus différents entre eux que les sons du corpus réel. Cela tient au fait que les sons réels étaient enregistrés dans des 7 véhicules dans 2 contextes thermiques. Par comparaison avec les scores obtenus pour les sons du premier test, les scores pour les sons du second test sont beaucoup plus échelonnés. Il ne se dégage pas clairement plusieurs catégories de sons. Seul le son 11, qui obtient le meilleur score se détache singulièrement des autres sons. On remarque que les sons de synthèse 10, 11, 12 et 4, 5, 6 obtiennent d'un côté les scores les plus élevés, de l'autre les scores les plus faibles, alors que ces triplets de sons de synthèse ont été créés à partir de la même base harmonique. On observe d'autre part que les sons 13 et 14 enregistrés dans le même véhicule obtiennent des scores assez proches. Ci-dessous se trouvent les intervalles de confiance pour les paires. Pour ces paires, la différence de préférence n'a pas été significative et on ne peut pas conclure sur le son qui a été préféré par les sujets du groupe.

Paire N°	Sons		intervalle de confiance	
	1	1	2	-0,017
23	2	12	-0,031	0,000
37	4	5	-0,010	0,000
38	4	6	-0,003	0,005
70	7	14	-0,006	0,012
91	13	14	-0,013	0,003

**Tableau 17 Paires de sons non discriminées en préférence**

On remarque que la paire constituée des sons 13 et 14 n'a pas été discriminée. Pour cette paire de sons, la sonie calculée est quasi identique. Ce sont deux sons enregistrés dans le même véhicule quand le système délivre du chaud ou du froid. Les paires 1, 37 et 38 sont trois paires, où les composantes harmoniques sont les mêmes pour les sons de la paire. Par exemple, les sons 4 et 5 et 6 dans les paires 37 et 38 possèdent la même composante harmonique. Pour ces paires, l'indétermination de la préférence est peut être due au rôle de la motorisation, dont le son est perçu de manière prépondérante devant le bruit produit par le système de soufflage.

Les corrélations entre les indicateurs physiques et les scores obtenus par le modèle de préférence de Bradley Terry sont données ci-dessous.

Indicateur physique	Leq(A) artemis dBA	N 01dB sones	Sharp 01dB acum	Sharp artemis acum	Rugosité asper	NHR(A) dBA	S Hz	SCH Hz	SCN Hz	SCH/N
modèle de pref de B&T	-0,82*	-0,81*	0,62*	0,63*	0,20	0,07	-0,03	-0,28	0,43	-0,23

**Tableau 18 Corrélations entre les scores de B&T et les indicateurs physiques (\* p < 0,05)**

A la lumière de la corrélation négative entre les scores de B&T et les indicateurs Leq(A) et sonie, il apparaît que le jugement de préférence des sons présentés par paires s'appuie d'abord sur la différence d'intensité subjective entre les sons. Bien que les sons aient été égalisés en sonie, les sujets ont préféré les sons les moins forts.

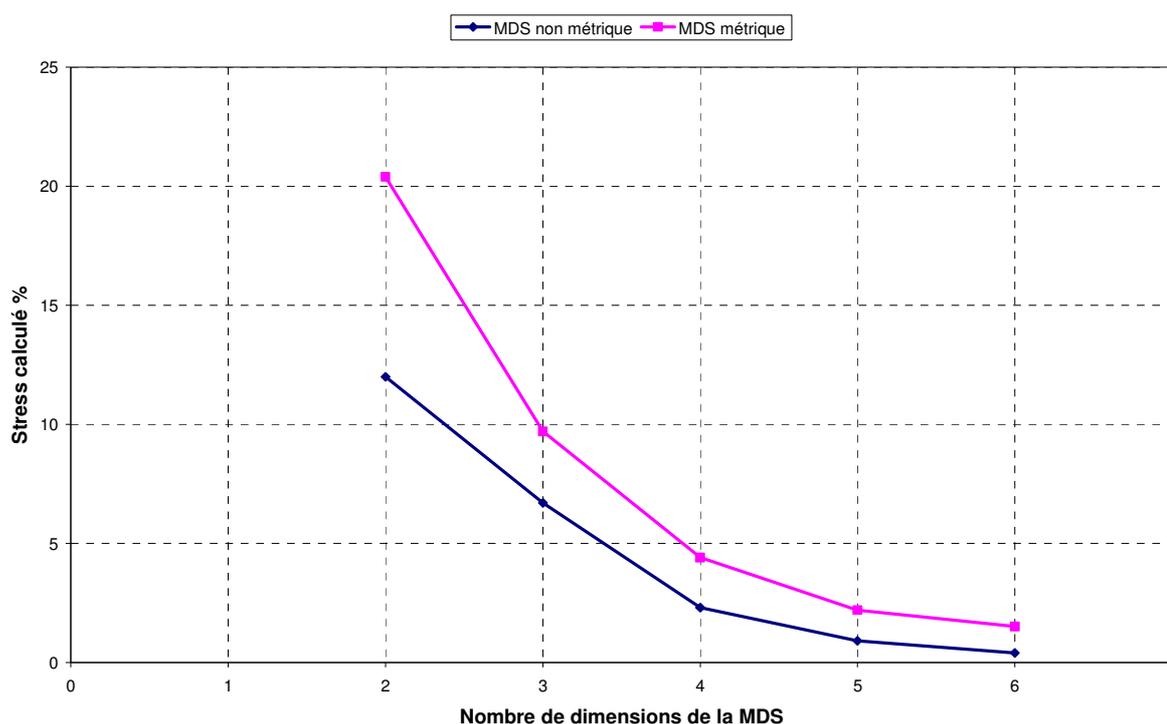
Comme pour les sons réels, l'acuité est corrélée positivement avec les scores de B&T. Par contre, l'indicateur NHR(A) n'est pas du tout corrélé aux scores de préférence.

### 6.3. Test de comparaison par paires en dissemblance

#### 6.3.1. Traitement des résultats

##### 6.3.1.1. Modèles multidimensionnels calculés

Comme pour le premier test, l'analyse des matrices de dissemblance est effectuée sous SPSS à partir de la matrice somme des matrices de dissemblance individuelles réduites de chaque sujet. Les notes de dissemblance sont transformées en distances avec l'algorithme ALSCAL. On calcule un espace de proximité par méthode métrique et non métrique. Le facteur de stress est calculé pour chaque modèle de 1 à 6 dimensions. Ci-dessous, on représente le facteur de stress en fonction du nombre de dimensions du modèle métrique ou non métrique.



Graphique 18 Stress et nombre de dimensions du modèle de proximité

Pour un même nombre de dimensions, le modèle non métrique est mieux ajusté que le modèle métrique avec nos notes de dissemblance. Par comparaison avec le premier test, on remarque qu'avec le même nombre de dimensions, les modèles de proximité métriques ou non métriques sont mieux ajustés avec nos notes de dissemblance. Il semble que cette remarque soit en faveur de l'hypothèse faite sur l'homogénéité entre les sons du corpus. L'élaboration des sons de synthèse, implique qu'aucun son ne présente de spécificités propres, il les partage avec d'autres sons du corpus. Du point de vue des sujets testés, relativement aux autres sons du corpus aucun son n'est jugé très différent pour ses spécificités propres.

##### 6.3.1.2. Modèle multidimensionnel non métrique à 4 dimensions

On choisit de garder pour la suite un modèle multidimensionnel non métrique à 4 dimensions qui est du même type que le modèle de proximité entre les sons du premier test. Pour ce modèle le stress est de 2,3%.

Les coordonnées des 14 sons sur les dimensions sont :

Sons	Dim1	Dim2	Dim3	Dim4
Son1	1,65	-0,25	0,30	0,19
Son2	0,52	0,46	-1,47	0,28
Son3	-1,83	-0,37	0,09	0,21
Son4	0,98	-0,84	0,23	-1,25
Son5	0,15	-0,36	-1,30	-1,23
Son6	-1,88	-0,81	0,09	-0,53
Son7	1,53	-0,67	1,67	0,04
Son8	0,32	-0,24	-1,36	0,51
Son9	-1,94	-0,73	0,60	0,26
Son10	1,83	-0,59	0,87	0,52
Son11	0,93	0,20	-1,14	0,84
Son12	-1,64	-0,40	0,33	0,66
Son13	-0,12	2,65	0,56	-0,54
Son14	-0,51	1,96	0,53	0,06

**Tableau 19** Coordonnées des sons dans l'espace de proximité

Les espaces de proximité des sons de synthèse sont représentés en annexe 11.

## 6.4. Mise en relation des résultats des deux tests

### 6.4.1. Traitement

On souhaite déterminer quel sont les indicateurs physiques qui expliquent le mieux les dimensions de l'espace de proximité entre les 14 sons du corpus. On réalise une analyse en composantes principales de nos données sous le logiciel SPAD. Comme pour le traitement du test sur les sons réels, l'ACP est utilisée pour observer l'espace de proximité obtenu par l'analyse multidimensionnelle ( voir au 4.4.1). Les variables actives de l'ACP sont les projections des sons sur les axes de l'espace de proximité et elle est non normée puisque l'on souhaite expliquer l'inertie associée à chaque dimensions de l'espace de proximité. Les variables illustratives sont les valeurs des indicateurs physiques et les scores de Bradley et Terry, annexe 12.

L'inertie pour chaque axe de l'ACP est :

Axe	Inertie
1	43,36 %
2	25,69 %
3	21,03 %
4	9,92 %

**Tableau 20** Axes de l'ACP et inertie

L'axe 1 de l'ACP porte 43,36% de l'information du modèle de proximité. A titre de comparaison, la dimension 1 de l'espace perceptif à 4 dimensions qui avait été établi sur les jugements de dissemblance entre sons du premier test portait 51,26 % d'information. La répartition de l'information sur les 4 dimensions du modèle de proximité entre sons du second test est meilleure, le modèle est mieux équilibré.

## 6.4.2. Analyse

### 6.4.2.1.Plans factoriels 1/2 et 1/3

On observe les coordonnées des sons dans les plans factoriels 1/2 et 1/3 de l'ACP.

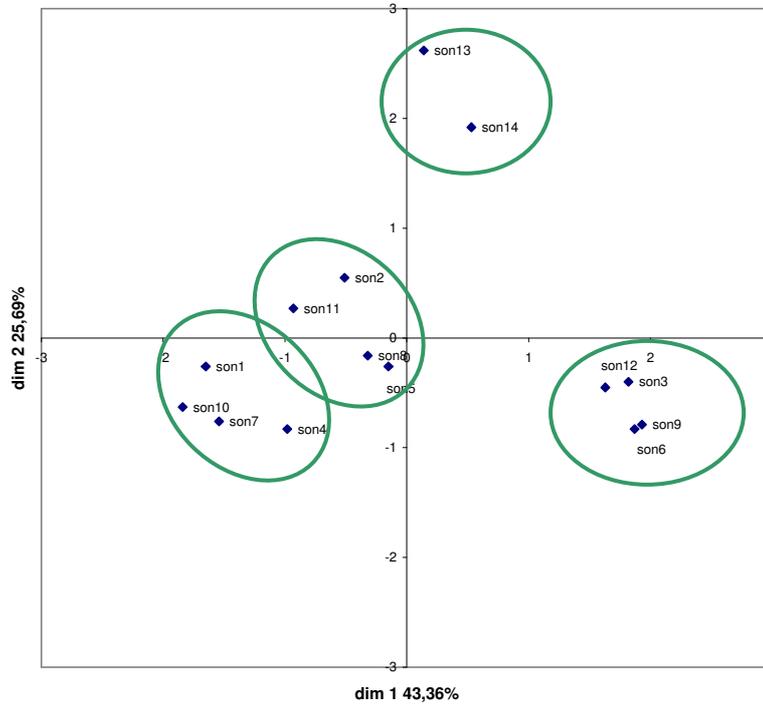


Figure 13 Sons dans le plan 1/2

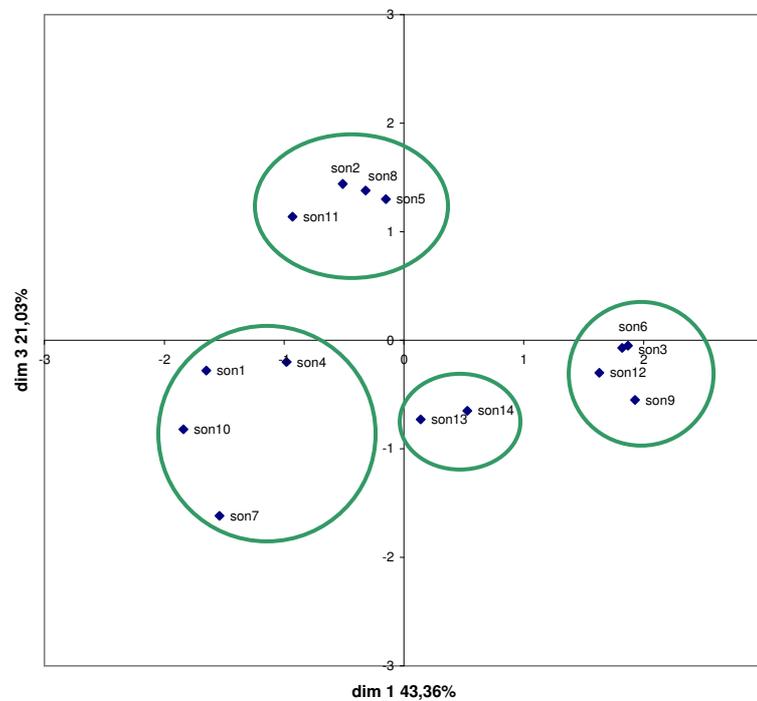
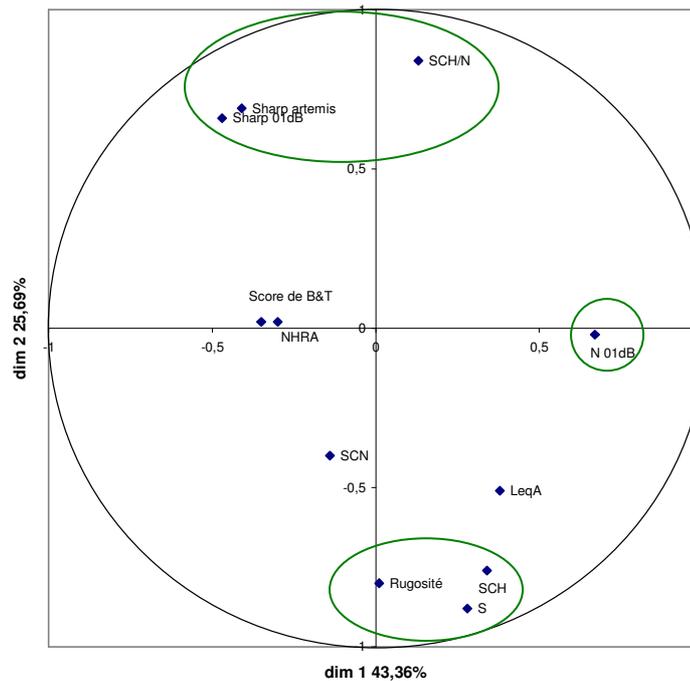


Figure 14 Sons dans le plan 1/3

On observe aussi les cercles de corrélation entre les indicateurs acoustiques et les axes factoriels.



**Figure 15 Cercle de corrélation entre indicateurs physiques et axes factoriels 1 et 2**

Dans le plan formé par les axes factoriels 1 et 2, on distingue 4 groupes de sons. Les sons de chaque groupe ont été élaborés sur la même base harmonique responsable d'une rugosité calculée sur les sons 5, 6 et 13 du premier test faible, moyenne et élevée. Cette rugosité n'a été que légèrement modifiée par l'ajout de la composante bruitée synthétique.

Les cercles de corrélations nous renseignent sur les indicateurs physiques qui expliquent le mieux les jugements de dissemblance entre les sons.

L'indicateur qui explique le mieux la dimension 1 de l'espace de proximité est la sonie. La corrélation est significative avec  $r=0,67^*$  (\* significative à  $p < 0,05$ ). Les sons étaient pourtant égalisés en sonie, à partir de coefficient d'égalisation en pression moyens pour un groupe de 7 sujets. Il semble que pour les sons du corpus, cette méthode ne permette pas d'obtenir une égalisation d'intensité subjective satisfaisante pour tous les sujet pour plusieurs raisons. La première est sans doute que le nombre de sujets pour le test d'égalisation était peut être trop faible. Une autre explication repose sur un constat d'ordre psychoacoustique. Certains sujets focalisent leur attention sur des zones fréquentielles particulières du son au cours du test d'égalisation. Par exemple, certains sujets seront plus attentifs aux aigus ou aux graves. D'autres sujets mêlent intensité subjective et jugement de préférence. Alors on ne peut plus s'appuyer sur l'hypothèse d'égalisation en sonie à partir d'un son de référence dont le timbre est représentatif de tous les sons du corpus. Les écarts types sont en effet variables suivant les sons du corpus, et un écart type faible montre le consensus des sujets sur l'intensité subjective du son. On peut penser que les sons « mieux égalisés » sont ceux dont le timbre est le plus proche du timbre du son de référence.

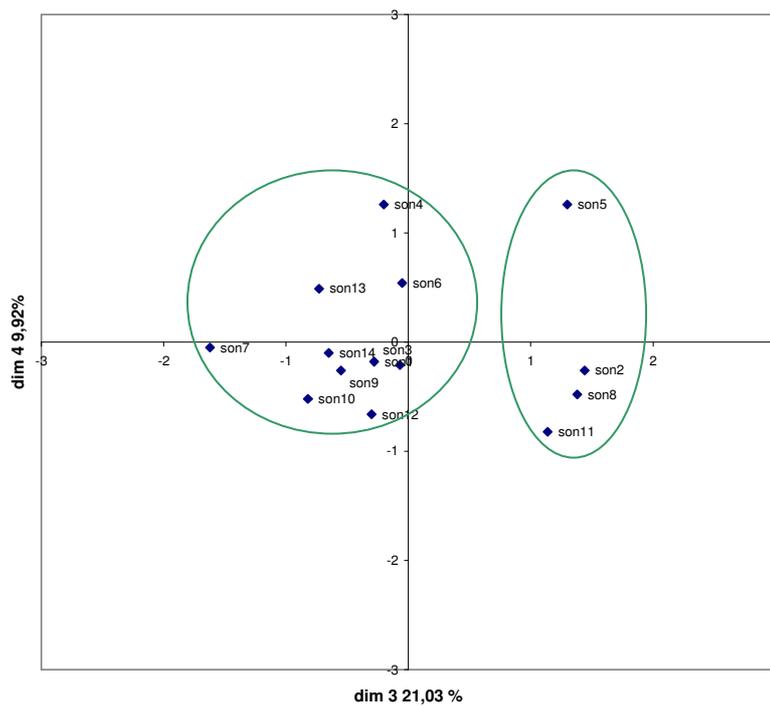
Par comparaison avec les résultats des premiers tests, la corrélation entre la dimension 1 de l'ACP et la sonie est cette fois moins forte. Cela montre que l'égalisation en sonie des sons de synthèse a quand même permis l'émergence d'autres stratégies d'écoute pour le jugement de la dissemblance entre les paires de sons. Le score de préférence de B&T est lui aussi sur la

dimension 1, il est corrélé négativement avec la sonie. On retrouve le résultat discuté plus haut, les sons préférés ont aussi été les moins forts.

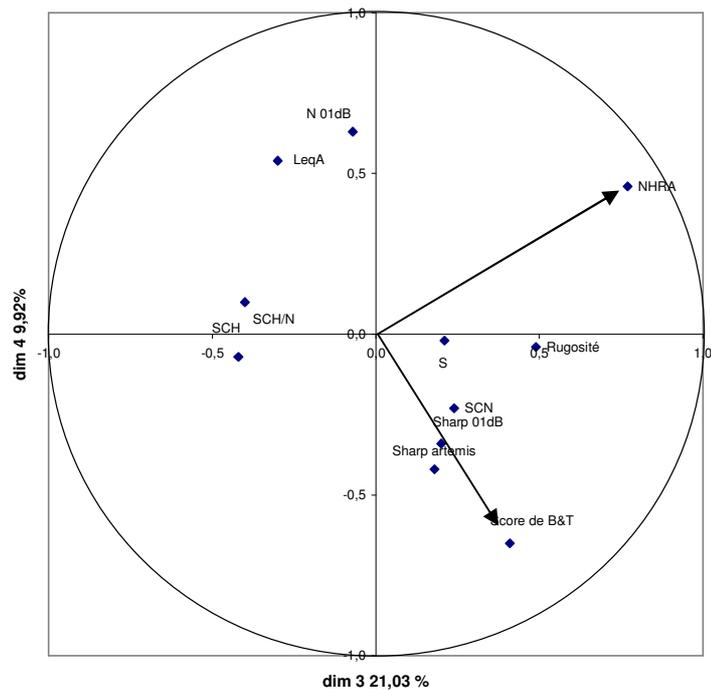
L'axe 2 est corrélé négativement avec le centre de gravité spectral  $r=-0,88^*$  et avec le centre de gravité spectral harmonique  $r=-0,77^*$ . La rugosité et le centre de gravité spectral harmonique ne sont pas corrélés avec les scores de B&T, à la différence des résultats du premier test.

#### 6.4.2.2. Plan factoriel 3/4

On observe ci-dessous les sons dans le plan formé par les axes 3 et 4 de l'ACP.



**Figure 16 Sons dans le plan 3/4**



**Figure 17 Cercle de corrélations entre indicateurs physiques et axes factoriels de l'ACP 3 et 4**

Dans le plan 3 /4, les sons se scindent en deux groupes suivant l'axe 3. Les sons 5, 2, 8 et 11 obtiennent les valeurs de NHR(A) les plus élevées et d'après les jugements de dissemblance, ces deux groupes de sons sont perçus différents. Or, l'indicateur NHR(A) explique assez bien la dimension 3 de l'espace perceptif. On observe qu'après la sonie, le centre de gravité spectral de la composante harmonique et le critère NHR(A) expliquent bien les jugements de dissemblance entre paires de sons, et ce résultat concorde avec les résultats d'études précédentes [6]. Au-delà de l'intensité subjective, les sujets sont sensibles à la composante harmonique du son pour l'attribution de la note de dissemblance. Pourtant, cet élément n'est pas un facteur décisif lors du jugement de préférence puisque dans le plan 3/4, le NHR(A) est orienté quasi orthogonalement aux scores de B&T.

On observe que les scores de B&T sont dirigés dans le sens négatif de la dimension 3 et dans le sens positif de la dimension 4, au même titre que les indicateurs d'acuité et de centre de gravité spectral de bruit. Les sons dont la composante bruitée est la plus aigüe sont en majorité les sons qui ont été préférés.

#### 6.4.3. Synthèse

Le choix de faire des sons de synthèse à partir des parties harmoniques des sons 5,6 et 13 a permis de mettre en avant la relation importante qui existe entre d'une part les indicateurs physiques de rugosité, de centre de gravité spectral de la part harmonique des sons, et d'autre part les distances entre sons de synthèse dans l'espace de proximité. Ce sont les indicateurs physiques de sonie et d'acuité qui expliquent le mieux les jugements de préférence pour les sons de synthèse.

# Conclusion

---

L'étude des sons de soufflage a mis à profit des compétences pluridisciplinaires en acoustique, prise de son, traitement du signal et analyses statistiques. Ces éléments ont permis la mise en place de tests perceptifs acoustiques et leur analyse sur des sons enregistrés et synthétiques, de manière réaliste dans un contexte acoustique et thermique maîtrisé.

Le protocole d'étude des sons de soufflage est validé sur plusieurs points, d'autres restent à préciser. L'enregistrement, puis la réduction après écoute à plusieurs du corpus de sons pour une configuration de soufflage donnée, permet d'obtenir précisément des sons dans un contexte acoustique et thermique déterminé. L'exploitation des résultats des tests de comparaison par paires sur la préférence par utilisation du modèle de préférence de B&T, est validée par le calcul des notes sur les occurrences. Le choix de la méthode, c'est-à-dire l'algorithme de calcul utilisé pour le calcul de distances à partir des notes de dissemblances entre les sons est déterminé. La mise en relation des résultats du test de comparaison par paires sur la préférence conjugaison et du test de comparaison par paires sur la dissemblance, par analyse en composante principale, a permis un début d'explication physique de l'espace perceptif des sons de soufflage par le calcul des corrélations entre les indicateurs physiques adaptés aux sons et les scores de préférence. Les calculs de  $Khi^2$  sur les questions à caractère évocateur montrent qu'il existe un lien entre les évocations de systèmes efficaces, les évocations de systèmes de bonne qualité et le contexte thermique d'enregistrement des sons. Cependant, l'échelle ordinale de réponse aux questions que nous avons choisie demande à être validée. Les réponses aux questions posées sur l'évocation du fonctionnement d'un système de soufflage doivent être prises avec précaution. Plutôt que de répondre à la question posée, la difficulté de la question a peut être conduit les sujets à exprimer un avis de préférence.

Les résultats montrent l'intérêt des indicateurs psychoacoustiques classiques comme la sonie, la rugosité et d'autres indicateurs spécifiques aux sons de soufflage, rugosité,  $NHR(A)$ , centre de gravité de la composante harmonique pour l'étude des sons. D'après les résultats des tests, le premier facteur acoustique lié à la dissemblance entre deux sons est la sonie, elle-même corrélée avec les jugements de préférence. Viennent ensuite des indicateurs liés à la composante harmonique, qui sont utilisés ou développés de manière adaptée aux sons étudiés: rugosité, centre de gravité spectral de la composante harmonique et  $NHR(A)$ , lié à 30% de l'information contenue dans l'espace des timbres des sons de synthèse. Il apparaît que la perception des sons de soufflage ne peut se limiter à l'étude de la composante bruitée du son, et que la composante harmonique est de grande importance dans le contexte acoustique automobile.

L'influence du contexte thermique d'enregistrement des sons sur la perception de la différence entre sons n'est pas clairement révélée puisque les différences perçues entre les sons enregistrés dans des véhicules de modèle ou de marque différents sont plus grandes que les différences entre les sons enregistrés dans les contextes thermiques chaud et froid. Cependant, il semble que les sons dits « chauds » sont évocateurs de systèmes de soufflage air/conditionné efficaces et de bonne qualité. Pour nos sons, les différences perçues sont fortement liées à la contribution au son du bruit du moteur. Pour la suite, les corpus de sons de soufflage réels ou de synthèse pourront être utilisés au cours de tests où l'apport de chaleur réel sera maîtrisé. Il s'agira alors de voir pour une sensation thermique donnée, quel est le chaud ou le froid perçu à l'écoute de sons dont on connaît les caractéristiques acoustiques, l'espace des timbres et les jugements de préférence.

# Bibliographie

---

- [1] M. SCHAFFER  
*The Tuning of the World*, A.Knopf, Inc. New York *Le Paysage Sonore* Fondation de France, 1979
- [2] S.VIOLLON  
Thèse de l'Université de Cergy Pontoise *Influence des informations visuelles sur la caractérisation de la qualité acoustique de l'environnement sonore urbain* 2000
- [3] W. E. BLAZIER Jr  
*Sound quality considerations in rating noise from heating, ventilating and air-conditioning*, in *Noise Control Eng. J.* 43 mai~juin 1995
- [4] U.AYR, E., F.MARTELOT  
*An experimental study on noise indices in air conditioned office* Elsevier 2001
- [5] U.AYR, E., F.MARTELOT  
*Further investigations of a new parameter to assess noise annoyance in air-conditioned buildings*, Elsevier 2002.
- [6] P.SUSINI, S.McADAMS, S.WINSBERG, I.PERRY, S.VIEILLARD, X.RODET  
*Characterizing the sound of air conditioning noise* IRCAM 2004
- [7] E.ZWICKER, H.FASTL  
*Psychoacoustics Facts and Models*, Springer, Berlin 1990.
- [8] P.SUSINI, S.MCADAMS  
*L'approche psychoacoustique de la qualité sonore*, Etude bibliographique réalisée dans le cadre du programme PREDIT
- [9] H.FLETCHER, W.A.MUNSON  
*Relation between loudness and masking*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol 9, 1937
- [10] H.FLETCHER  
*Auditory patterns*, *Rev. Mod. Phys.*, vol.12, pp47-65 1940.
- [11] B.R.GLASBERG, B.C.J.MOORE  
*A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness, and Partial Loudness* *J. Audio Eng. Soc.*, vol.45, No.4, 1997
- [12] MC BEZAT  
*Qualification acoustique du typage sonore : application au typage sport*, Rapport de stage de DEA ATIAM 2003
- [13] 01dB-STELL  
*Modèle Psychoacoustique Indice Articulaire Note\_Application\_Psy\_V03\_2001.doc* mise à jour 28/05/2001
- [14] P.SUSINI  
Cours : Approches de la qualité sonore
- [15] S.MEUNIER  
*Critères psychoacoustiques des nuisances sonores : évaluation perceptive de bruits de circulation routière et ferroviaire* *Acoustique et techniques* n°26

[16] Ph. COURCOUX, M. SEMENOUX

*Preference data analysis using a paired comparison model*, Food quality and preference, 8 (5/6), 1997

[17] R.POPPER, H.HEYMANN

*Analyzing differences among products and panellists by multidimensional scaling* , Multivariate analysis of data in sensory science, Elsevier, 1996

[18] S.Mc ADAMS, S. WINSBERG, S.DONNADIEU, G.D.SOETE, J.KRIMPHOFF

*Perceptual scaling of synthesized musical timbres: common dimensions, specificities, and latent subject classes* , Psychological research, 58, 177-192 (1995)

[19] J.D. CAROLL, J.J. CHANG

*How to use INDSCAL, a computer program for canonical decomposition of N-way tables and individual differences in Multidimensional scaling* , Bell Telephone Laboratories

[20] <http://www.socialresearchmethods.net>

[21] D.DELIGNIERES

*La mesure en psychologie* , Université de Montpellier 1