



**HAL**  
open science

# Caractérisation physique et perceptive des sources de bruit industriel

Mathieu Martinez

► **To cite this version:**

Mathieu Martinez. Caractérisation physique et perceptive des sources de bruit industriel. Acoustique [physics.class-ph]. 2013. dumas-01220623

**HAL Id: dumas-01220623**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01220623>**

Submitted on 26 Oct 2015

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

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

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS  
PARIS**

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME d'INGENIEUR C.N.A.M.**

**SPECIALITE : Mécanique**

**OPTION : Acoustique**

**par**

**MARTINEZ, Mathieu**

---

**Caractérisation physique et perceptive des sources de  
bruit industriel**

**Soutenu le 16 septembre 2013**

---

**JURY**

**PRESIDENT : Alexandre GARCIA**

**MEMBRES : Antoine CHAIGNE  
Stéphanie VIOLLON  
Etienne PARIZET  
Manuel MELON  
Eric BAVU**

## RESUME

Dans le cadre de l'engagement d'EDF pour le développement durable, la R&D d'EDF travaille depuis plusieurs années sur l'impact acoustique de ses installations industrielles.

Le but de l'étude dans lequel ce stage s'inscrit est d'obtenir une méthode permettant la caractérisation de bruits industriels du point de vue de leur impact environnemental en termes de nuisance sonore. Pour ce faire, un corpus de bruits industriels, issus d'enregistrements de sources existantes, a été analysé physiquement et perceptivement. La méthodologie retenue a consisté dans un premier temps à créer une typologie perceptive des bruits industriels afin de gérer leur diversité. Ensuite, pour chacune des familles de la typologie, un choix des meilleurs indicateurs de gêne a été réalisé.

Ce stage avait deux objectifs : tester la robustesse de la typologie précédemment obtenue par une expérience perceptive ; établir une méthode permettant la classification automatique d'un son industriel dans la typologie perceptive.

Si la typologie s'est montrée très robuste pour certaines familles correspondant à certains sons très caractéristiques, elle échoue à différencier nettement un certain nombre de sons complexes. De ce fait, il est difficile de trouver une méthode permettant de classer automatiquement de nouveaux sons de manière satisfaisante.

**Mots clés :** acoustique environnementale, bruit industriel, expérience perceptive, classification automatique, traitement du signal, indicateurs psycho-acoustiques

---

## SUMMARY

Interested in sustainable development, EDF R&D has been dealing with the acoustical impact of their industrial plants for many years.

In this context, a study aimed at a noise index representative of the annoyance due to numerous and various noise sources of an industrial site. First some industrial noises were recorded and analyzed (physically and perceptually). Then, in order to deal with the variety of industrial sources, a new protocol was set up: best annoyance indicators were determined for each family of a perceptual typology.

The two goals of this internship were: determining whether or not this typology is robust enough; constructing a method for automatically classifying industrial sounds according to this typology.

We found that the typology works fine only for some specific sounds. Thus, it proved to be difficult to establish an effective method for classifying industrial noises.

**Keywords:** environmental acoustics, industrial noises, perceptual experiment, automatic classification, signal processing, psycho-acoustic indicators

## TABLE DES MATIERES

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>6</b>
1.1.	CONTEXTE.....	6
1.2.	OBJECTIFS DU STAGE.....	7
<b>2.</b>	<b>DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE</b> .....	<b>9</b>
2.1.	PROTOCOLE EXPERIMENTALE, METHODOLOGIE.....	9
2.2.	STIMULI SONORES.....	10
2.2.1.	<i>Description</i> .....	10
2.2.2.	<i>Choix des sons représentatifs</i> .....	11
2.2.3.	<i>Sélection des stimuli</i> .....	11
2.2.4.	<i>Convention de notation des sons</i> .....	11
2.2.5.	<i>Sons représentatifs et sons à classer</i> .....	11
2.3.	LES SUJETS .....	13
2.4.	DIFFUSION DES SONS EN SALLE D'ECOUTE .....	13
2.5.	ENREGISTREMENTS DES SONS EN SALLE D'ECOUTE .....	14
<b>3.</b>	<b>RESULTATS DE L'EXPERIENCE</b> .....	<b>15</b>
3.1.	SELECTION DES SUJETS .....	15
3.2.	RESULTATS GLOBAUX .....	16
3.2.1.	<i>Appartenance des sons aux familles</i> .....	16
3.2.2.	<i>Définition/Identité des familles</i> .....	19
3.3.	COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX DE L'ETUDE EUROSYN.....	20
<b>4.</b>	<b>CONSTRUCTION DE LA DEMARCHE DE CLASSIFICATION AUTOMATIQUE</b> .....	<b>23</b>
4.1.	PISTES (FACTEURS DISCRIMINANTS) .....	23
4.1.1.	<i>Fonctionnel</i> .....	23
4.1.2.	<i>Physique</i> .....	23
4.2.	METHODE ADOPTEE : ARBRE DE DECISION.....	25
4.3.	INDICATEURS TESTES .....	26
4.3.1.	<i>Aspect fonctionnel</i> .....	26
4.3.2.	<i>Aspect physique</i> .....	26
4.4.	INDICATEURS DANS L'ARBRE DE DECISION .....	28
4.5.	LIMITES DE VALIDITE DES CONCLUSIONS SUR LES INDICATEURS .....	30
4.6.	OUTIL D'ANALYSE ET DE VISUALISATION DES RESULTATS .....	30
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>31</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>32</b>
<b>7.</b>	<b>TABLES</b> .....	<b>33</b>
7.1.	TABLE DES FIGURES.....	33
7.2.	TABLE DES TABLEAUX .....	33
	<b>Annexe A – Instructions pour l'expérience perceptive</b> .....	<b>34</b>
	<b>Annexe B – Fin de l'expérience : questionnaire et débriefing</b> .....	<b>35</b>
	<b>Annexe C – Choix des sons représentatifs</b> .....	<b>37</b>
	<b>Annexe D – Questionnaire de recrutement (extrait)</b> .....	<b>41</b>
	<b>Annexe E – Paramètres de diffusion et d'enregistrement des sons en salle d'écoute</b> .....	<b>43</b>
	<b>Annexe F – Tableau des niveaux mesurés en salle d'écoute</b> .....	<b>45</b>
	<b>Annexe G – Analyses physiques des sons diffusés</b> .....	<b>46</b>
	<b>Annexe H – Résultats bruts pour les 60 sujets</b> .....	<b>54</b>
	<b>Annexe I – Définition/identité des familles</b> .....	<b>57</b>
	<b>Annexe J – Indicateurs</b> .....	<b>59</b>
	<b>Annexe K – Synthèse des résultats de M. Alayrac, exposition « mono-source »</b> .....	<b>60</b>

## **Remerciements**

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadrants Stéphanie Viollon à EDF, Etienne Parizet au Laboratoire Vibrations Acoustiques (LVA) et Alexandre Garcia au CNAM.

Je tiens également à remercier mes collègues du groupe « T63 » du département d'Analyses Mécaniques et Acoustiques d'EDF R&D de Clamart qui m'ont aidé et soutenu lors de la réalisation de mes six mois de stage, et avec lesquels les échanges ont été très constructifs.

Ce mémoire concluant mes études au CNAM Paris, je remercie également l'ensemble de mes professeurs.

**ABBREVIATIONS ET SYMBOLES**

$L_{Aeq}$	niveau de pression acoustique continu équivalent, pondéré A
$L_{Ceq}$	niveau de pression acoustique continu équivalent, pondéré C
N	sonie totale selon le modèle de Zwicker (norme ISO532B)
ES	équilibre spectral
TA	<i>tonal audibility</i> , indicateur de tonalité [Pedersen 2000]
NR	nombre de raies du spectre bandes fines détectées par la méthode de Pedersen [Pedersen 2000]
L	longueur
h	hauteur
p	profondeur
SDM	salle des machines

**UNITES**

dB	décibel
dB(A)	décibel pondéré A
dB(C)	décibel pondéré C
Hz	hertz
m	mètre
s	seconde
soneGF	sonne selon le modèle de Zwicker (norme ISO532B), en conditions « champs libre » ( <i>free field</i> )

# 1. Introduction

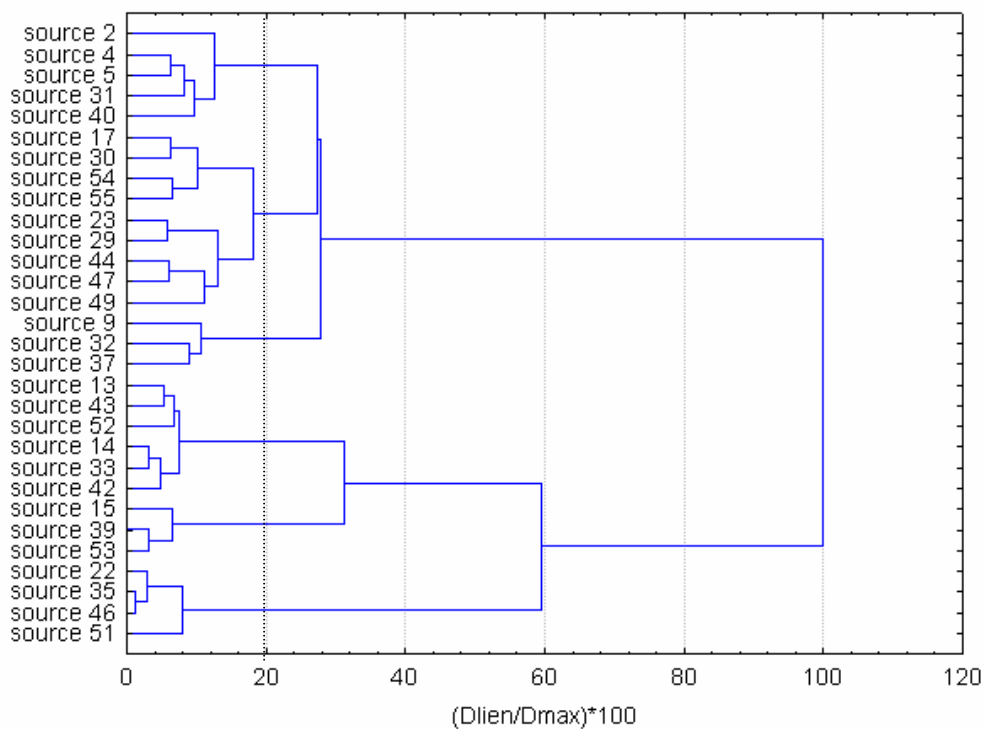
## 1.1. Contexte

Ce stage s'inscrit dans la prolongation d'un projet AFSSET (2004-2009) qui avait pour objectif de déterminer un indicateur de bruit rendant compte de l'impact environnemental et sanitaire de la multi-exposition à différentes sources de bruit d'un même site industriel (nuisances sonores).

Dans le cadre de la R&D d'EDF, il semblait intéressant de parvenir à intégrer cet indicateur au logiciel « code tympan » utilisé par l'ingénierie. Ce logiciel étant basé sur la modélisation des sources sonores, le choix a été fait d'essayer de caractériser les différentes sources séparément. Il s'agit donc d'une approche mono-source.

Il faut alors gérer la multiplicité et la diversité des sources (tant sur des points fonctionnels, structurels, physiques, bruits...). Ceci a été réalisé grâce à l'élaboration d'une typologie perceptive des sources.

Cette typologie a été obtenue grâce à une tâche de catégorisation libre de sons issus d'une sonothèque (base de données sonores) créée pour l'occasion [Le NOST 2007]. Cette sonothèque est constituée d'enregistrements de sources industrielles réalisés à proximité des sources – pour concorder avec l'approche « mono-source » -, puis filtrés pour prendre en compte la propagation à 250m, distance à laquelle la gêne est étudiée. Le critère de classement a été la ressemblance sonore des sons. L'analyse statistique des résultats permet de mettre en évidence six familles de sons/sources (Figure 1, Tableau 1).



**Figure 1 – Dendrogramme issu de la catégorisation libre**

**Tableau 1 – Classement des sources en six familles**

Famille 1	Famille 2	Famille 3	Famille 4	Famille 5	Famille 6
Source 22	Source 13	Source 15	Source 17	Source 2	Source 9
Source 35	Source 14	Source 39	Source 23	Source 4	Source 32
Source 46	Source 33	Source 53	Source 29	Source 5	Source 37
Source 51	Source 42		Source 30	Source 31	
	Source 43		Source 44	Source 40	
	Source 52		Source 47		
			Source 49		
			Source 54		
			Source 55		

Il n'est pas évident de donner une description précise de chacune des familles a posteriori. Si les familles 1 et 3 sont bien délimitées (comportant respectivement des sons de chute d'eau et de transformateurs ventilés), il n'en est pas de même pour les autres familles. La famille 5 par exemple se définirait plutôt en termes de gêne (sons dérangement, stressants). La famille 6 quant à elle contient des sons de natures très disparates.

En admettant l'hypothèse selon laquelle des sons ressemblants génèrent un même type de gêne, les indicateurs de gêne les plus pertinents pour chacune des familles perceptives ont été déterminés à la fois dans des cas d'exposition « mono-source » (c'est à dire exposition à une source appartenant à une des six familles perceptives de la typologie) ou « multi-sources » (notamment dans le cas d'une source de bruit industriel associé à un bruit résiduel) [Alayrac 2009, Alayrac 2010, Alayrac 2011] (Annexe K)<sup>1</sup>. Ainsi il serait possible de modéliser la gêne à proximité d'un site industriel en connaissant les différentes sources sonores qu'il abrite, sous réserve de parvenir à déterminer la famille de chacune des sources.

## 1.2. Objectifs du stage

Afin de pouvoir conclure sur la possibilité d'utilisation effective de la typologie perceptive, obtenue lors des précédents travaux, dans des études d'ingénierie, le stage avait comme principaux objectifs :

1. de tester la robustesse de cette typologie perceptive,
2. de trouver des critères permettant de classer un son industriel quelconque relativement à cette typologie, donc d'obtenir une classification automatique.

---

<sup>1</sup> Des tests d'écoute ont été élaborés afin d'évaluer la gêne sonore occasionnée par les sources industrielles suivant leur appartenance à une famille de la typologie perceptive et en considérant leurs caractéristiques spectrales. On remarque que les indicateurs classiques de niveau équivalent pondéré A et de niveau de sonie restent souvent très pertinents.



Le stage s'est appuyé sur deux études précédentes, qui ont été complétées et approfondies grâce à la mise en œuvre d'une expérience perceptive basée sur un protocole expérimental adapté. Les deux études précédentes sont :

- une étude confiée à la société Eurosyn,
- un stage ingénieur (Cheik Djibi Sow).

Après une description de l'expérience, de ses spécificités et enjeux (section 2), je présenterai ses résultats (section 3) sur lesquels pourra se construire la démarche de classification automatique de sons industriels (section 4). Je conclurai finalement sur les atouts et limites de cette approche typologique en vue d'une utilisation en ingénierie (section 5).

## 2. Description de l'expérience

L'expérience perceptive mise en œuvre a pour buts

- d'évaluer la force d'appartenance de sons issus de sources industrielles à une des six familles prédéfinies dans la typologie originale,
- d'évaluer la force de représentation de chaque famille, (robustesse).

Sur cette base, des critères pourront être recherchés pour classer un son quelconque dans une famille.

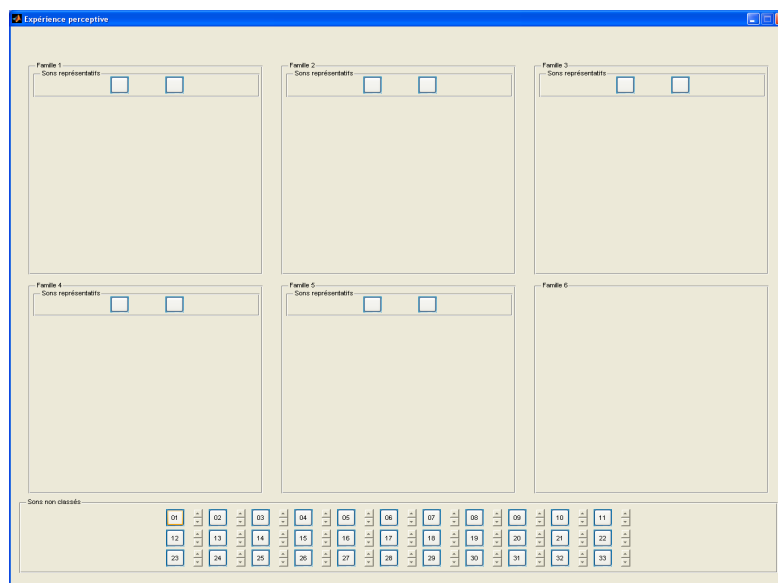
### 2.1. Protocole expérimental, méthodologie

Cette expérience a été conçue comme une tâche de catégorisation forcée. La réalisation de la catégorisation par les sujets nécessite un apprentissage de la typologie perceptive. Cet apprentissage est réalisé simultanément à la tâche de catégorisation, grâce à deux sons représentatifs pour chacune des cinq premières familles de la typologie. Ces sons représentatifs permettent aux sujets un classement :

1. par comparaison avec les sons à classer,
2. par construction d'une représentation de chacune des familles.

Ces deux aspects ont été mis en avant dans les instructions lues et remises au sujet (annexe A). La sixième famille est considérée comme contenant des sons « divers » ne pouvant être classés dans une des cinq autres familles ; aucun représentant sonore n'a donc été choisi pour cette famille.

Le principe de l'expérience est le suivant : le sujet a accès simultanément à l'ensemble des sons à classer et aux sons représentatifs de chaque famille. Il doit classer chacun des sons dans la famille de son choix en déposant le bouton dans le cadre correspondant (Figure 2). Il peut écouter les sons dans l'ordre qu'il veut et aussi souvent qu'il le souhaite. L'expérience lui est présentée comme le classement *d'un échantillon* d'un ensemble de *nouveaux sons* pour ne pas qu'il hésite à ranger autant de sons qu'il le souhaite dans une même famille et à classer des sons dans la famille 6 (annexe A). Il doit en outre préciser pour chaque son un *indice de confiance* fonction de son hésitation à classer ce son. C'est un nombre entier compris entre 1 et 3, 1 signifiant que le son a été difficilement classable (longue hésitation), 3 qu'il a été facilement classable. Cela a pour but de diminuer l'appréhension du sujet de commettre une erreur et permet par ailleurs d'identifier les sons les plus difficilement classables.



**Figure 2 – Interface présentée aux sujets lors de l'expérience perceptive.**

Après avoir effectué la tâche de catégorisation, chaque sujet répond à un questionnaire puis à un débriefing (annexe B). Lors de ces deux étapes on essaye de voir si le sujet a réussi à se faire une représentation claire de chacune des familles.

Avant la tâche de catégorisation, une session de familiarisation avec l'interface et la tâche à réaliser est effectuée en présence de l'expérimentateur. Par la suite, lors de l'expérience proprement dite, l'ordre des sons écoutés ainsi que le temps d'écoute sont stockés pour permettre d'expliquer d'éventuelles réponses « aberrantes ».

## 2.2. Stimuli sonores

### 2.2.1. Description

Nous souhaitons dans un premier temps effectuer l'expérience avec l'ensemble des sons à notre disposition. Cette base de sons (51 au total) est inhomogène puisqu'elle comprend :

- 45 sons enregistrés suffisamment près des sources pour s'assurer du caractère « mono-source », puis filtrés avec le logiciel d'acoustique environnementale développé en interne R&D (Code\_Tympan) pour simuler une propagation à 250 mètres dont 30 ont servi à l'élaboration de la typologie perceptive,
- 6 sons complexes (« multi-sources ») enregistrés autour d'un site industriel réel.

## 2.2.2. Choix des sons représentatifs

Le choix des sons représentatifs est crucial dans cette expérience. Il est réalisé parmi les 30 sons ayant conduit à la typologie perceptive. Une question se pose pour ce choix : comment permettre aux sujets de se faire la « meilleure » représentation possible de chaque famille ? Le choix a été fait de proposer deux sons représentatifs par famille et de les choisir le cas échéant sensiblement différents<sup>2</sup> pour autoriser une représentation plus large et permissive. L'utilisation des résultats de la première tâche de catégorisation libre ayant conduit à la typologie perceptive et ceux de l'étude préliminaire de robustesse confiée à la société Eurosyn a permis une présélection des meilleurs candidats (annexe C). En effet, pour être représentatif, un son doit avoir été souvent associé aux sons appartenant à sa famille et peu aux sons appartenant à une autre famille. Le choix final a été réalisé en salle d'écoute dans les conditions fixées pour l'expérience (section 2.4). Ce choix n'est pas neutre et a des conséquences sur les résultats de l'expérience comme discuté ultérieurement dans le document.

## 2.2.3. Sélection des stimuli

Une fois retirés les sons représentatifs, il aurait idéalement fallu faire classer 41 sons aux sujets. Comme il s'est avéré lors de premiers tests que cela risquait de surcharger le sujet, nous avons conservé uniquement 33 sons correspondant à des enregistrements « mono-source ». Si deux des sons ainsi obtenus ont été éliminés, c'est qu'ils présentaient un caractère relativement moins stationnaire.

## 2.2.4. Convention de notation des sons

Ces sons sont numérotés par un identifiant dans la sonothèque. Nous ajoutons à ce numéro un préfixe rendant compte de la famille à laquelle il a été attribué lors de la première expérience le cas échéant. Sinon le préfixe « M » est utilisé.

Exemples : F1\_22 ou M56.

## 2.2.5. Sons représentatifs et sons à classer

### 2.2.5.1. Sons représentatifs

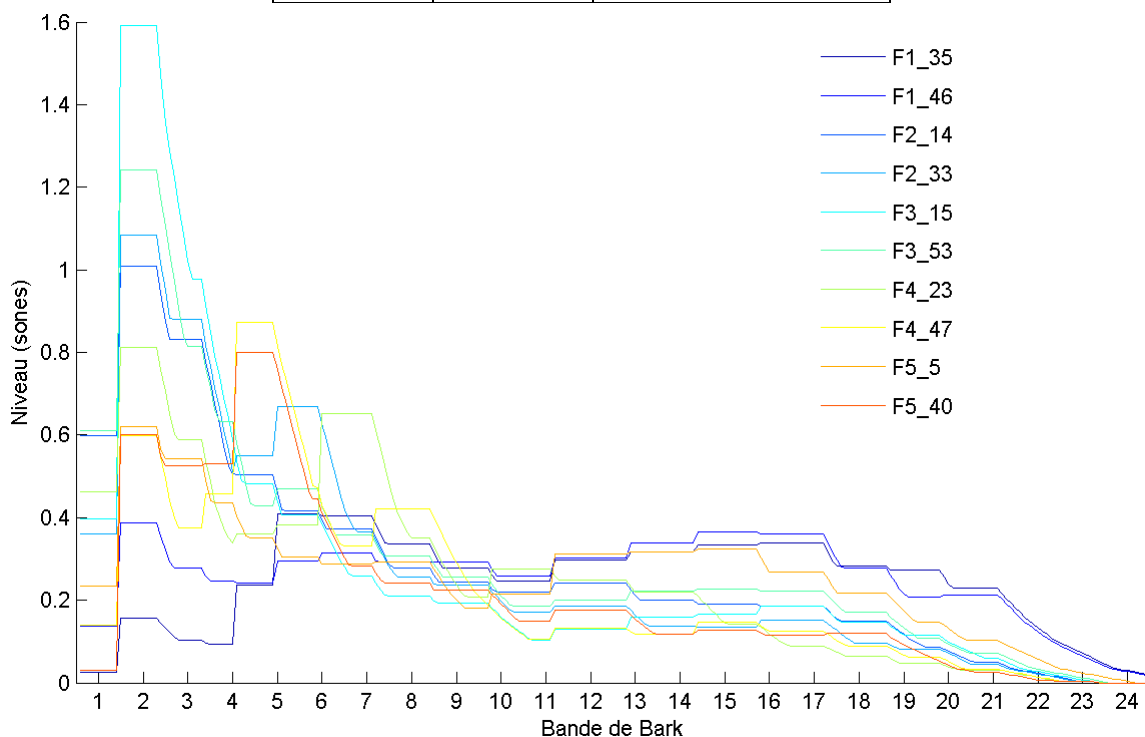
La classification fonctionnelle des sons représentatifs (Tableau 2) ainsi que la représentation de leur sonie (Figure 3) permettent de se faire une première idée des familles.

---

<sup>2</sup> En effet si la famille 1 par exemple est très homogène, c'est nettement moins le cas de la famille 4 – cf. dendrogramme issu de la catégorisation libre (Figure 1), le nœud de regroupement est plus éloigné.

**Tableau 2 – Sons représentatifs**

	Désignation	Catégorie fonctionnelle
Famille 1	F1_35	EAU - chute
	F1_46	EAU - chute
Famille 2	F2_14	SALLE DES MACHINES
	F2_33	GAZ - ventilateur
Famille 3	F3_15	ELEC - transformateur
	F3_53	ELEC - transformateur
Famille 4	F4_23	GAZ - ventilateur
	F4_47	GAZ - soupape/bouche
Famille 5	F5_05	ELEC - transformateur
	F5_40	SALLE DES MACHINES



**Figure 3 – Représentation de la sonie des sons représentatifs d'après le modèle de Zwicker (norme ISO 532B), champs libre (soneGF)**

On remarque notamment (Figure 3) le caractère « large bande » des sons de la famille 1 avec de l'énergie en haute fréquence, le caractère plus « basse fréquence » des familles 2 (ventilation) et 3 (émergence à 100 Hz des transformateurs) ainsi que des profils de sonie plus complexes pour les sons des familles 4 et 5.

### 2.2.5.2. Sons à classer par les sujets

Famille 1 de la typologie d'origine : F1\_22 ; F1\_51.

Famille 2 de la typologie d'origine : F2\_13 ; F2\_42 ; F2\_43 ; F2\_52.

Famille 3 de la typologie d'origine : F3\_39.

Famille 4 de la typologie d'origine : F4\_17 ; F4\_29 ; F4\_30 ; F4\_44 ; F4\_49 ; F4\_54 ; F4\_55.

Famille 5 de la typologie d'origine : F5\_2 ; F5\_4 ; F5\_31.

Famille 6 de la typologie d'origine : F6\_9 ; F6\_32 ; F6\_37.

Nouveaux sons : M56 ; M45 ; M48 ; M3 ; M25 ; M28 ; M24 ; M11 ; M20 ; M18 ; M27 ; M16 ; M26.

## 2.3. Les sujets

Les sujets sont des personnes non expertes, non EDF, recrutées par une société extérieure (annexe D). Elles sont également réparties entre sexe (50% d'hommes, 50% de femmes) et catégorie d'âge (33% entre 25 et 35 ans, 33% entre 35 et 50 ans, et 33% de plus de 50 ans).

## 2.4. Diffusion des sons en salle d'écoute (annexe E)

Les stimuli sonores sont diffusés sur hauts parleurs – deux enceintes Tannoy System 1200 (bande passante à - 3 dB : 40-20000 Hz) – dans une salle d'écoute insonorisée, de dimensions  $L \times h \times p = 5 \times 3,5 \times 3,3$  m. Le niveau de bruit de fond dans la salle est inférieur à 24 dB(A). Pendant le test, le sujet est assis à un emplacement repéré par des marques au sol, à égale distance des haut-parleurs dans une configuration stéréophonique classique.

La durée des sons a été limitée à 5s comme lors du travail de détermination de la typologie d'origine [Le Nost 2007]. La chaîne électroacoustique a été réglée de façon à ce que le niveau en salle d'écoute avoisine 50 dB(A), niveau permettant un bon confort d'écoute. De plus, lors du réglage, la conservation des caractéristiques spectrales fortes (par exemple les principales raies d'un spectre bandes fines) de certains sons a également été vérifiée en temps réel avec Pulse.

Remarque : pour ne pas que le niveau sonore devienne un élément de discrimination des sons lors la tâche de catégorisation, plusieurs précautions ont été prises :

- avant diffusion, les sons ont été égalisés en niveau après application de la pondération A – comme les sons sont stéréophonique, cela a été réalisé par rapport à la moyenne des niveaux des voies gauche et droite ;
- le niveau sonore pondérée A ainsi que la sonie totale (Zwicker en condition « champs libre ») ont été mesurés à la position d'écoute – le niveau sonore varie entre 46,5 et 51,9 dB(A) tandis que la sonie totale varie entre 3,6 et 7,2 soneGF (annexe F) ;

- des tests préliminaires ont été menés avec des sujets de la R&D d'EDF ; ces tests ont révélé que le niveau sonore n'entrait pas en ligne de compte lors de la classification.

## **2.5. Enregistrement des sons en salle d'écoute**

Dans la salle d'écoute, l'ensemble des sons a été enregistré à la position du sujet lors de l'expérimentation (annexe E). Pour déterminer des critères de classification automatique, l'analyse des critères acoustiques a été réalisée sur ces enregistrements sonores, pour être au plus proche de ce qui a été entendu pendant l'expérimentation. L'ensemble des résultats d'analyses physiques (sonie et bandes fines) de ces enregistrements est disponible en annexe (annexe G).

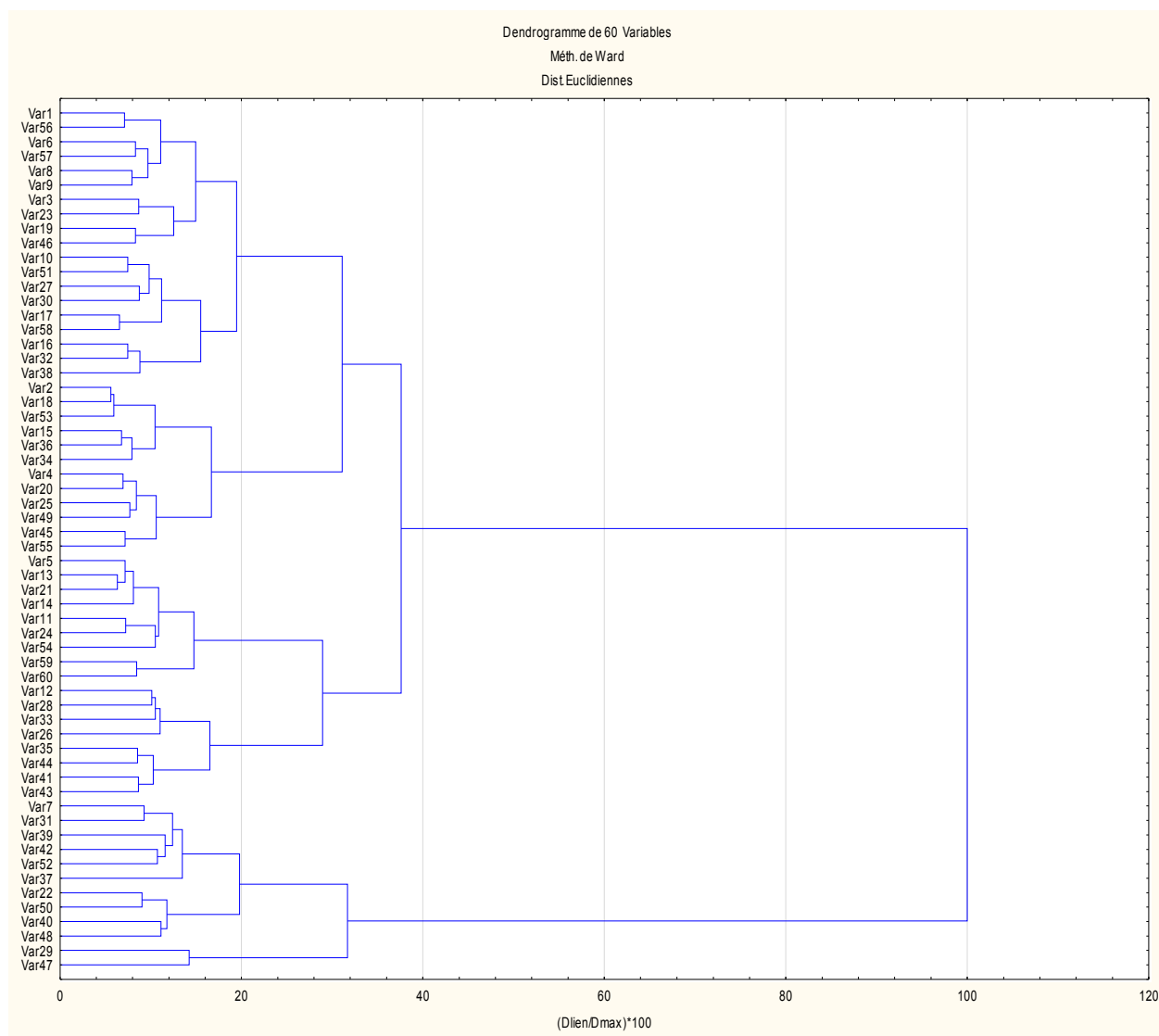
### 3. Résultats de l'expérience

Une représentation graphique des résultats pour les 60 sujets est donnée en annexe (annexe H). Nous présentons ici les résultats pour une sélection de 48 sujets.

#### 3.1. Sélection des sujets

Il est dans un premier temps nécessaire d'éliminer les sujets les moins « fiables ».

Pour cela une matrice de dissimilarité entre sujets a été construite à partir de leur réponse : la dissimilarité d'un sujet par rapport à un autre correspond au nombre de sons pour lesquels ils ne sont pas d'accord quant à leur famille d'appartenance. Une classification hiérarchique ascendante a été effectuée en calculant la matrice de distances euclidiennes sur cette matrice de dissimilarité avec la méthode d'agrégation de Ward.



**Figure 4 – Dendrogramme issu de la classification des sujets par comparaison de leurs réponses**



Ceci conduit à un dendrogramme (Figure 4) qui permet de distinguer 12 sujets : les sujets 7, 22, 29, 31, 37, 39, 40, 42, 47, 48, 50, 52. Un aperçu graphique des disparités de réponses de ces sujets est disponible en annexe (annexe H).

Il est intéressant de fortifier cette étude statistique par d'autres observations pour valider cette sélection. On remarque alors que :

- les sujets 29, 47, 7 et 42 n'ont pas écouté tous les sons,
- les sujets 29, 48, 47, 7, 37, 22, 39, 50 font partie des sujets ayant effectué le moins d'écoutes (moins de 250),
- les sujets 52, 48, 40 et 31 font partie des sujets ayant un indice de confiance moyen faible dans le classement des sons (inférieur à 2,1).

En outre, le faible nombre de sujets dans ce groupe à part et la disparité des réponses de ces sujets ne permettent pas d'en faire un groupe cohérent, comme un groupe ayant choisi une stratégie différente. Les réponses de ces sujets ne seront donc pas conservées.

L'élimination de ces sujets aboutit bien en outre à l'effet recherché, c'est à dire la diminution du « rapport signal/bruit » pour les sons les plus consensuels et s'inscrit tout à fait dans notre démarche consistant à tester la robustesse de la typologie perceptive d'origine.

## **3.2. Résultats globaux**

### **3.2.1. Appartenance des sons aux familles**

La force d'appartenance des sons aux familles est un résultat essentiel pour déterminer une bonne définition des familles afin de classer par la suite un son quelconque. Les résultats de l'expérience perceptive (Tableau 3) conduisent à considérer trois types de sons :

- type A (rouge) : les sons qui sont robustes quant à l'appartenance à une famille ; ils les caractérisent donc bien. Critère : si un son est affecté par plus de 75% des sujets retenus,
- type B (orange) : les sons qui sont moyennement robustes, associables à au plus deux familles,
- type C (vert) : les sons qui ne sont pas robustes, qui peuvent être associés à trois familles, ou souvent identifiés comme non classables (famille 6).

**Tableau 3 – Associations des sons aux familles.****Première colonne : pourcentage du nombre d'associations.****Deuxième colonne : moyenne arithmétique de l'indice de confiance associée.****En rouge : sons de type A ; en orange : sons de type B et en vert : sons de type C.**

	F1_22		F1_51		F2_13		F2_42		F2_43		F2_52		F3_39	
Famille 1	94	3	58	2,3	2	3	0		15	2	25	2,3	0	
Famille 2	4	2,5	21	1,8	92	2,8	96	2,8	65	2,5	63	2,5	17	2,6
Famille 3	0		4	1,5	2	3	4	2,5	2	2	8	2,8	79	2,7
Famille 4	0		6	2,3	4	3	0		4	2,5	0		2	3
Famille 5	2	2	2	3	0		0		6	2	0		2	3
Famille 6	0		8	2	0		0		8	2	4	2	0	

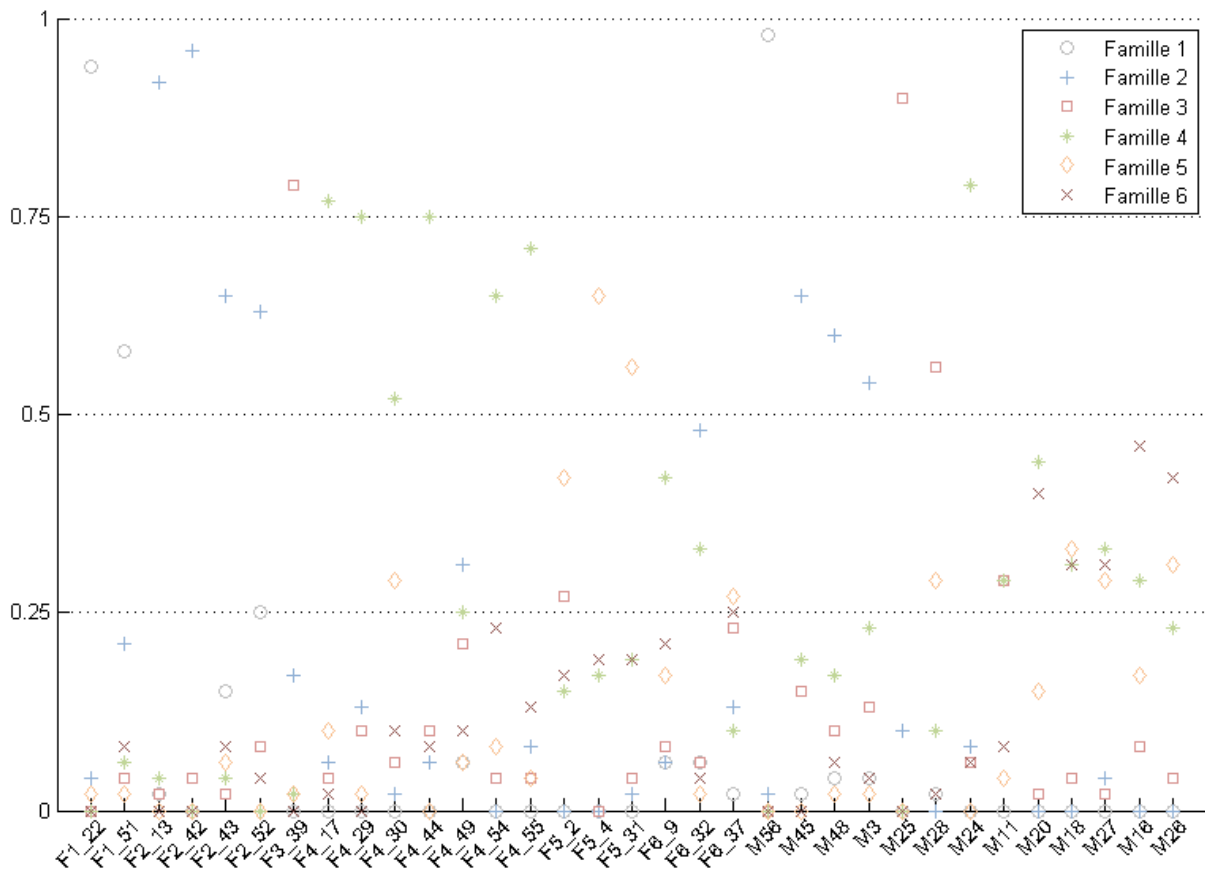
	F4_17		F4_29		F4_30		F4_44		F4_49		F4_54		F4_55	
Famille 1	0		0		0		0		6	2,3	0		0	
Famille 2	6	1,7	13	2,5	2	2	6	2	31	2,2	0		8	2,8
Famille 3	4	1,5	10	2	6	2,7	10	2,2	21	2,2	4	2,5	4	2
Famille 4	77	2,4	75	2,6	52	2,3	75	2,3	25	2,3	65	2,4	71	2,6
Famille 5	10	2	2	2	29	2,1	0		6	1,3	8	2,5	4	2
Famille 6	2	1	0		10	2,2	8	2	10	1,4	23	2,3	13	1,7

	F5_2		F5_4		F5_31		F6_9		F6_32		F6_37	
Famille 1	0		0		0		6	2,3	6	2,7	2	3
Famille 2	0		0		2	2	6	2,7	48	2,5	13	2,2
Famille 3	27	2,4	0		4	2,5	8	2,3	6	2,3	23	1,9
Famille 4	15	2,4	17	2,3	19	2,6	42	2,1	33	1,9	10	1,8
Famille 5	42	2,2	65	2,4	56	2,4	17	1,8	2	2	27	2,2
Famille 6	17	2,1	19	2,4	19	1,9	21	1,8	4	1,5	25	2

	M56		M45		M48		M3		M25		M28		M24	
Famille 1	98	3	2	3	4	2	4	2,5	0		2	3	0	
Famille 2	2	3	65	2,7	60	2,5	54	2,3	10	3	0		8	2
Famille 3	0		15	2,1	10	2,6	13	2,2	90	2,8	56	2,4	6	2,3
Famille 4	0		19	2,6	17	3	23	1,9	0		10	2,4	79	2,7
Famille 5	0		0		2	2	2	2	0		29	2,4	0	
Famille 6	0		0		6	2	4	2,5	0		2	3	6	2

	M11		M20		M18		M27		M16		M26	
Famille 1	0		0		0		0		0		0	
Famille 2	29	2,5	0		0		4	1,5	0		0	
Famille 3	29	2,1	2	2	4	1,5	2	2	8	2,8	4	2,5
Famille 4	29	2,5	44	2,3	31	2,2	33	2,5	29	2,1	23	2
Famille 5	4	3	15	1,6	33	2,7	29	2,4	17	2,1	31	2,3
Famille 6	8	1,8	40	2,5	31	2,2	31	2	46	2,2	42	2,2

Certains résultats apparaissent plus clairement sous forme graphique (Figure 5).



**Figure 5 – Présentation graphique des résultats de l'expérience perceptive (proportion d'attribution des sons aux différentes familles)**

La famille 1, regroupant des sons d'écoulement d'eau, est très robuste et la majorité des sons qui lui sont attribués le sont de manière claire, dont le nouveau son M56. L'exception est le son F1\_51 qui a la particularité d'être un aéro-réfrigérant *ventilé*. C'est donc un son complexe réunissant à la fois le caractère très singulier de chute d'eau (famille 1) et celui d'une ventilation. Ainsi certains sujets ont classé ce son en famille 2.

La famille 3 est elle assez robuste. Deux nouveaux sons (M25 et M28) lui sont assez clairement attribués. Le dilemme est au niveau de sa démarcation avec la famille 5. En effet si elle ne regroupe que des sons de transformateurs – très singuliers du fait d'une tonalité à 100Hz – elle ne les regroupe pas tous. Par exemple le son F5\_5 est un transformateur mais qui présente une forte modulation qui le relie immédiatement à la famille 5. En outre, le choix de ce son comme représentatif de la famille 5 a pu servir de pôle d'attraction pour le son F5\_2, qui contrairement aux autres transformateurs est non ventilé.

Note : les sons F1\_51 et F5\_2 mettent en évidence le fait que l'ajout ou le retrait d'un élément ventilé à la source complique son classement. C'est une problématique de notre approche : les sons bien que « mono-source » n'en sont pas moins complexes.

Les familles 2 et 4 sont quant à elle moins robustes. On remarque que les nouveaux sons M45, M48 et M3 ne sont pas très fortement attribués à la famille 2 tandis que les sons de la famille 4 apportent rarement un consensus franc.

Un grand nombre de nouveaux sons ne trouvent pas leur place dans la typologie initiale : les sons M11, M20, M18, M27, M16 et M26. Cela laisse à penser que la typologie n'est pas utilisable de manière générale. Notons toutefois que les sons M27, M16 et M26 sont très ressemblants entre eux. Ils présentent une tonalité *aiguë* gênante. Ainsi certains sujets m'ont clairement indiqué les avoir « regroupés » en famille 6, d'autres les ont classés en famille 5 (du fait de la gêne) ou en famille 4 (du fait de la tonalité). Cela pose le problème de la ressemblance entre sons tonaux suivant la fréquence de la tonalité, ainsi que celui de la définition de la famille 5 autour du concept « gênant, dérangeant ».

### 3.2.2. Définition/Identité des familles

La question a été posée aux sujets de noter le point particulier de la définition / identité des familles : « pour chacune des familles de sons que vous avez constituées, seriez-vous d'accord pour dire qu'elle est clairement définie, qu'elle a une identité forte ? ». Les réponses (Figure 6) sont des nombres entiers variant de 1 à 5 représentant l'échelle de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord ».

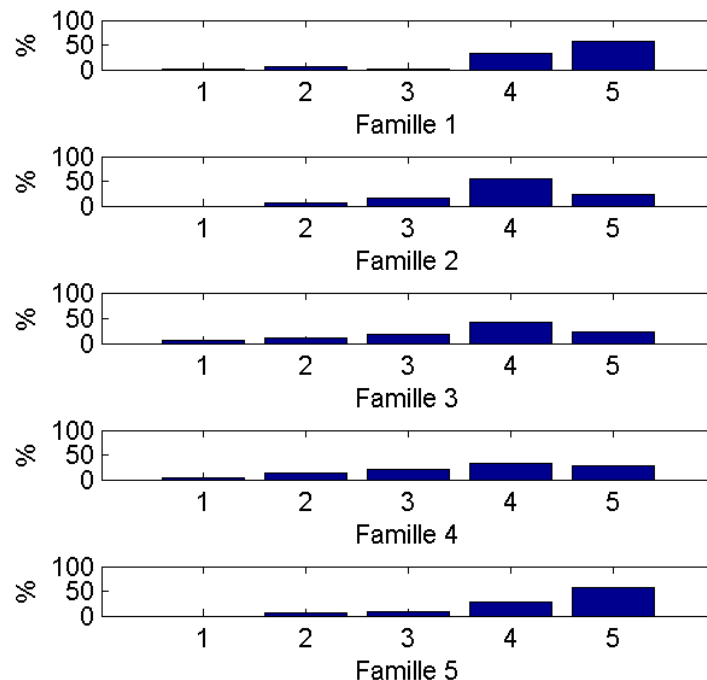


Figure 6 – Réponses des sujets concernant la définition des familles

Il apparaît très clairement que si les familles 1 et 5 sont perçues comme étant clairement définies, cela se complique en ce qui concerne les familles 2, 3 et 4.

L'indice de confiance permet également de se faire qualitativement une idée de la représentation d'une famille. Si les sons sont fortement attribués à une famille avec un indice de confiance élevé, alors la famille a une représentation forte. Cependant l'information apportée n'est pas de même type et des résultats différents apparaissent clairement en comparant la moyenne (par son associé à la famille pour un sujet puis par famille) des indices de confiance à la moyenne de l'indice de définition de la famille (Tableau 4, annexe I).

**Tableau 4 – Comparaison de la notion de définition d'une famille à celle de confiance dans le classement des sons dans cette famille**

	Définition	Confiance
Famille 1	4,4	2,8
Famille 2	3,9	2,5
Famille 3	3,6	2,5
Famille 4	3,6	2,4
Famille 5	4,4	2,2

On se rend alors compte que le classement des sons en famille 5 n'est pas si évident comme discuté antérieurement. Cela peut provenir du choix des sons représentatifs, qui présentaient tous deux une forte modulation, mais étaient parfois jugés comme « peu ressemblants » par les sujets lors d'une première écoute.

### **3.3. Comparaison des résultats à ceux de l'étude Eurosyn**

Il est à noter que les résultats entre études ne sont pas directement comparables. En effet, outre des méthodologies différentes – notamment concernant l'apprentissage de la typologie –, les conditions de diffusion n'ont pas été identiques. Cela influe sur la perception d'appartenance de certains sons à une famille. Il aurait par contre été intéressant d'appliquer la démarche de classification automatique détaillée dans la section suivante aux enregistrements audio effectués lors de l'étude Eurosyn pour la valider en comparant ses résultats à ceux de l'étude perceptive. Cependant les enregistrements semblaient dégradés donc cela n'a pas été possible.

**Tableau 5 – Comparaison des résultats (colonne 1) avec ceux de l'étude Eurosyn (colonne 2).**

Les souleurs représentent les sons de type A (rouge), B (orange) et C (vert).

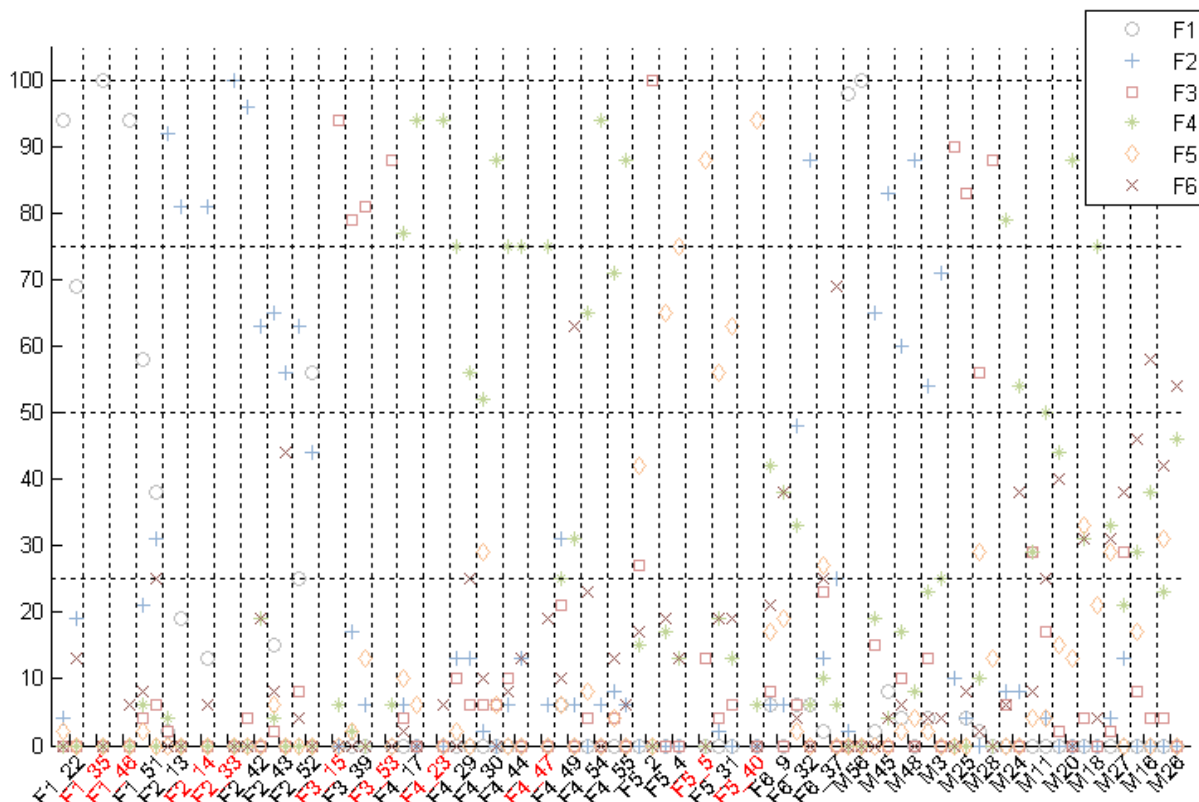
	F1_22		F1_51		F2_13		F2_42		F2_43		F2_52		F3_39	
Famille 1	94	69	58	38	2	19	0	0	15	0	25	56	0	0
Famille 2	4	19	21	31	92	81	96	63	65	56	63	44	17	6
Famille 3	0	0	4	6	2	0	4	0	2	0	8	0	79	81
Famille 4	0	0	6	0	4	0	0	19	4	0	0	0	2	0
Famille 5	2	0	2	0	0	0	0	0	6	0	0	0	2	13
Famille 6	0	13	8	25	0	0	0	19	8	44	4	0	0	0

	F4_17		F4_29		F4_30		F4_44		F4_49		F4_54		F4_55	
Famille 1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
Famille 2	6	0	13	13	2	0	6	13	31	6	0	6	8	6
Famille 3	4	0	10	6	6	6	10	0	21	0	4	0	4	0
Famille 4	77	94	75	56	52	88	75	75	25	31	65	94	71	88
Famille 5	10	6	2	0	29	6	0	0	6	0	8	0	4	0
Famille 6	2	0	0	25	10	0	8	13	10	63	23	0	13	6

	F5_2		F5_4		F5_31		F6_9		F6_32		F6_37	
Famille 1	0	0	0	0	0	0	6	0	6	6	2	0
Famille 2	0	0	0	0	2	0	6	6	48	88	13	25
Famille 3	27	100	0	0	4	6	8	0	6	0	23	0
Famille 4	15	0	17	13	19	13	42	38	33	6	10	6
Famille 5	42	0	65	75	56	63	17	19	2	0	27	0
Famille 6	17	0	19	13	19	19	21	38	4	0	25	69

	M56		M45		M48		M3		M25		M28		M24	
Famille 1	98	100	2	8	4	0	4	0	0	4	2	0	0	0
Famille 2	2	0	65	83	60	88	54	71	10	4	0	0	8	8
Famille 3	0	0	15	0	10	0	13	0	90	83	56	88	6	0
Famille 4	0	0	19	4	17	8	23	25	0	0	10	0	79	54
Famille 5	0	0	0	0	2	4	2	0	0	0	29	13	0	0
Famille 6	0	0	0	4	6	0	4	4	0	8	2	0	6	38

	M11		M20		M18		M27		M16		M26	
Famille 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Famille 2	29	4	0	0	0	0	4	13	0	0	0	0
Famille 3	29	17	2	0	4	0	2	29	8	4	4	0
Famille 4	29	50	44	88	31	75	33	21	29	38	23	46
Famille 5	4	4	15	13	33	21	29	0	17	0	31	0
Famille 6	8	25	40	0	31	4	31	38	46	58	42	54



**Figure 7 – Présentation graphique des résultats de notre étude – en premier – accolés à ceux de l'étude Eurosyn –en second.  
Les résultats pour les sons représentatifs, en rouge, sont présentés uniquement pour l'étude Eurosyn, rappelant ainsi qu'il n'y pas une association « absolue » pour ces sons.**

Cependant, certains faits mettant à mal notre typologie relevés par l'étude Eurosyn sont confirmés.

- La famille 4 est une famille large aux contours peu définis ; en particulier, pour certains sons, il est difficile de trancher pour les ranger en famille 4, ou de les « verser en famille 6 » (F6\_9, M27, M16, M26).
- Comment classer un son de transformateur : beaucoup sont regroupés en famille 3 mais le son F5\_5 est représentatif de la famille 5 tandis que le son F5\_2 est lui atypique ?
- Le son F6\_32 peut être associé à la famille 2.

## 4. Construction de la démarche de classification automatique

Le construction de la démarche de classification automatique s'est faite en plusieurs étapes. En premier lieu il a été nécessaire de se faire une première idée concernant les différentes familles, ce qui les caractérise : trouver des pistes de facteurs discriminants. Ensuite choisir une méthode de classification, calculer un grand nombre d'indicateurs avant d'en sélectionner quelques-uns et de les inclure dans la méthode de classification.

### 4.1. Pistes (facteurs discriminants)

Les facteurs discriminants les différentes familles peuvent être fonctionnels ou physique.

#### 4.1.1. Fonctionnel

Il apparaît clairement lors d'une première approche que les sons de la famille 1 sont des sons d'écoulement d'eau qui ont été regroupés fonctionnellement dans la catégorie « EAU – chute ». Cet aspect fonctionnel doit donc être exploré plus avant afin de mettre en évidence des corrélations intéressantes, car c'est un critère simple, connu, facile à mettre en oeuvre.

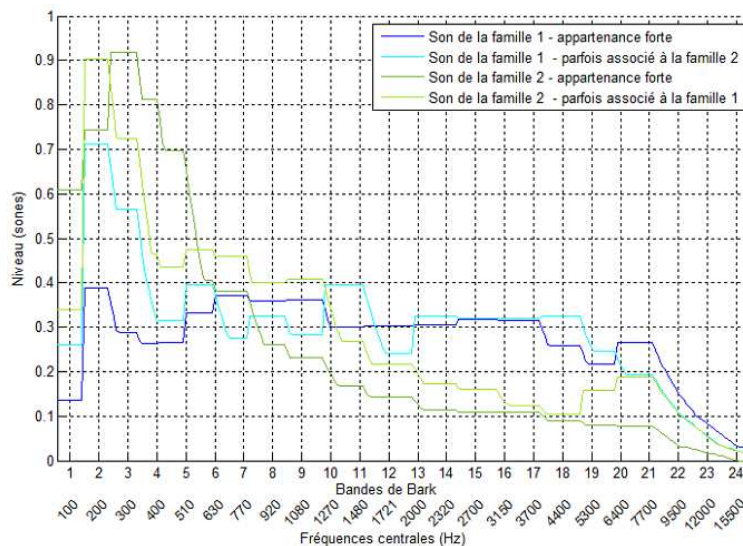
#### 4.1.2. Physique

Sur les cas les plus tranchés, une discrimination par paramètre physique est aisément audible voire représentable. Il peut être moins évident de trouver un indice simple calculable caractérisant ce phénomène. Au début de l'étude, différentes pistes ont été explorées, dont certains sons *typiques* permettent une bonne visualisation.



#### 4.1.2.1. Equilibre spectral

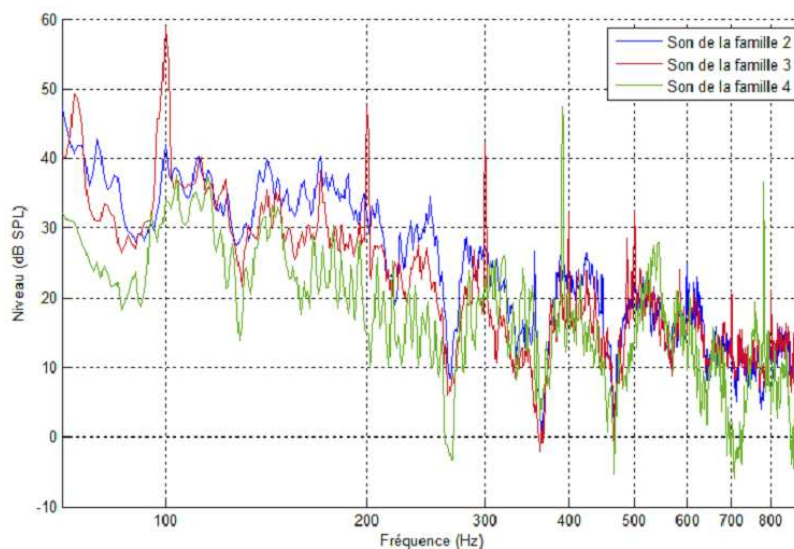
Les sons des familles 1 et 2 semblent pouvoir être discriminés physiquement par un critère d'équilibre spectral : en effet les sons de la famille 1 sont très large bandes et ont la particularité d'avoir une énergie importante haute fréquence, tandis que les sons de la famille 2 pouvant être par exemple des éléments de ventilation auront tendance à avoir beaucoup d'énergie en basse fréquence.



**Figure 8 – Illustration des différences d'équilibre spectral de sons « types » des familles 1 et 2 via la représentation de leur sonie spécifique.**

#### 4.1.2.2. Tonalités

À l'écoute, les sons de la famille 4 semblent présenter des tonalités marquées, ceux de la famille 3 (transformateurs uniquement) une tonalité précise (100Hz et harmoniques), ce qui les distingue des sons de la famille 2.



**Figure 9 – Illustration des différences de tonalités de sons « types » des familles 2, 3 et 4 par une analyse spectrale bandes fines.**

4.1.2.3. Modulation

La modulation est un trait principal des sons représentatifs de la famille 5. Si ce critère est aisément audible, il est moins facilement représentable. On remarque cependant pour ces deux sons que le spectre bandes fines présente un grand nombre de raies resserrées en HF.

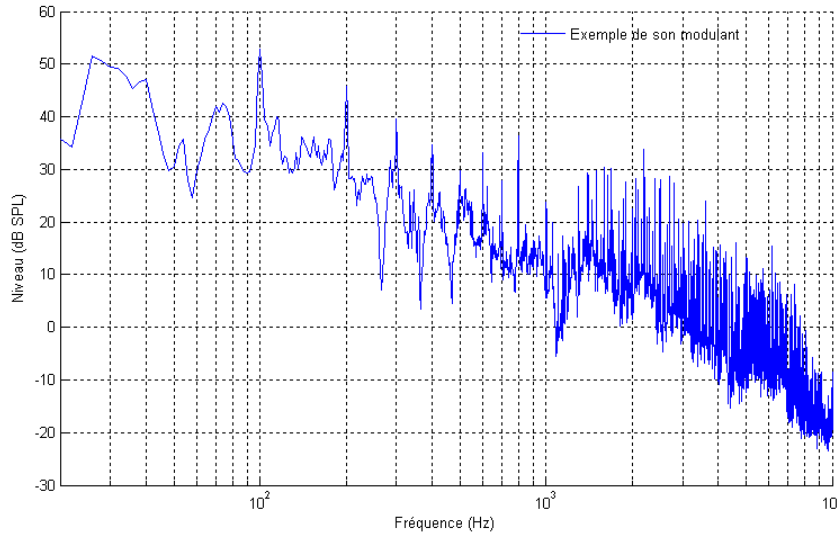


Figure 10 – Illustration du phénomène de modulation des sons de la famille 5 se traduisant par un nombre de raies HF du spectre bandes fines élevé.

4.2. Méthode adoptée : arbre de décision

La méthode retenue pour la classification automatique est un arbre de décision. Les premiers nœuds sont de type fonctionnel car il s'agit de la détermination la plus simple à effectuer. Les critères utilisés sont inspirés de l'écoute de tous les sons comparativement aux résultats de l'expérience perceptive. La structure générale de l'arbre après une première analyse rapide est la suivante :

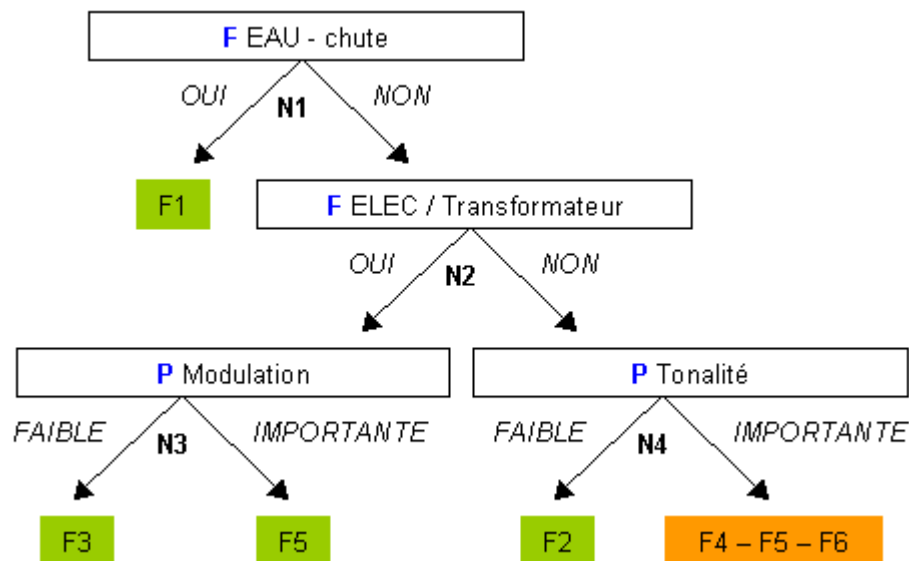


Figure 11 – Trame de l'arbre de décision permettant la classification automatique de sons industriels.

## 4.3. Indicateurs testés

Les décisions liées à chaque nœud de l'arbre de décision seront prises non pas sur un seul critère mais sur le croisement de plusieurs critères reflétant les aspects fonctionnels et physiques.

### 4.3.1. Aspect fonctionnel

Pour certains sons (chute d'eau, transformateur), la reconnaissance de l'aspect fonctionnel joue un rôle lors de la classification. De plus, ces types fonctionnels ont une cohésion perceptive forte qui doit se retrouver physiquement. On note que :

- il y a équivalence entre sons de type fonctionnel « EAU – chute » et les sons classés en famille 1 de la typologie perceptive mais attention : le son F1\_51 qui est un enregistrement d'un aéro-réfrigérant (« EAU – chute ») qui a la particularité d'être ventilé est de type B car parfois associé à la famille 2 ;
- tous les sons de type « ELEC – transformateurs » sont classés soit en famille 3, soit en famille 5 ;
- les sons de la famille 3 sont tous des sons « ELEC – transformateurs » présentant la particularité d'être *ventilés*.

### 4.3.2. Aspect physique

Un grand nombre d'indicateurs traduisant les trois paramètres (équilibre spectral, tonalité et modulation) considérés comme discriminants ont été testés. Parmi ces indicateurs, beaucoup ont les mêmes buts mais utilisent des algorithmes ou des implémentations différentes. Nous avons testés tous les indicateurs pour lesquels nous bénéficions de routines MATLAB (ou pouvions rapidement les coder) et certains indicateurs calculés par PAK. Au final pour chacun des paramètres un seul indicateur (celui collant le plus à nos données) a été retenu, pour aller au plus simple. Ci-après une présentation succincte des indicateurs testés, l'annexe J contenant leur description détaillée et leur valeur pour chacun des sons.

#### 4.3.2.1. Equilibre spectral

##### 4.3.2.1.1. Pondérations

La différence de niveau entre les pondérations A et C est un indicateur répandu dans la littérature pour quantifier le caractère « basses fréquences » d'un son. C'est l'indicateur qui a été retenu :

$$ES = L_{Ceq} - L_{Aeq}$$

avec  $L_{Aeq}$  le niveau avec pondération A et  $L_{Ceq}$  le niveau avec pondération C.

#### 4.3.2.1.2. Spectre tiers d'octave / Sonie partielle

En sommant les énergies des bandes tiers d'octave de deux zones fréquentielles (moyennes et basses fréquences) et en soustrayant les résultats obtenus, il est également possible de rendre compte du caractère « basses fréquences » d'un son. Un tel indicateur avait été testé lors des précédents travaux, ainsi que son pendant psycho-acoustique (nommé « sonie BF ») permettant d'aller plus loin d'un point de vue perceptif et calculé à partir du spectre de sonie. La difficulté pour ce type d'indicateurs est le paramétrage des fréquences limites de bandes.

#### 4.3.2.1.3. Centre de gravité spectral

C'est la fréquence qui correspond au centre de gravité des spectres (bandes tiers d'octave ou bandes fines selon la précision désirée) – chaque fréquence du spectre étant pondérée par le niveau correspondant.

#### 4.3.2.1.4. Acuité

L'acuité [Zwicker, 1999] est un indicateur psycho-acoustique largement utilisé dans le domaine du design sonore. D'un point de vue de l'équilibre spectral, il rendrait plutôt compte du caractère « hautes-fréquences » d'un son.

### 4.3.2.2. Tonalités

De nombreuses méthodes ont été développées pour rendre compte du caractère tonal d'un son, dont certaines sont normalisées. Nous avons testé les méthodes de Pedersen [Pedersen 2000], d'Aures, Tonality DIN (norme DIN 45681), TNR, PR. Deux résultats nous intéressaient : l'indicateur global de tonalité, ainsi qu'un calcul du nombre de raies du spectre bandes fines.

Nous avons retenu l'indicateur de Pedersen noté TA.

### 4.3.2.3. Modulation/Rugosité

Deux voies ont été explorées :

- étude du spectre de l'enveloppe du signal filtré,
- nombre de raies du spectre bandes fines.

Nous avons retenu le nombre de raies NR obtenu grâce à l'algorithme de Pedersen pour le calcul de la tonalité TA. Cela accroît la simplicité de notre démarche en vue d'une application en ingénierie.

#### 4.4. Indicateurs dans l'arbre de décision

Selon leur type déterminé par leur force d'appartenance à une famille, les sons vont nous permettre de trancher des problèmes différents - ils apporteront de l'information différente :

- type A : élimination des indicateurs qui ne permettent pas une distinction stricte des sons des différentes familles,
- type B : sélection d'indicateurs qui pourraient faire basculer les sons d'une famille à l'autre, détermination d'indicateurs « en concurrence » (ex : équilibre spectral vs tonalité),
- type C : vérification que ces sons ne seraient pas attribués fortement à une seule famille par les indicateurs sélectionnés et la démarche de classification adoptée.

Le tableau suivant présente les trois indicateurs retenus (ES, NR et TA) pour tous les sons de notre étude. Cela permet de déterminer des valeurs limites pour ces indicateurs permettant la classification des sons. En vert les valeurs faibles, en jaune/orangé les valeurs intermédiaires et en rouge les valeurs élevées. Les limites pour ces valeurs dépendront du nœud de l'arbre auquel on se trouve :

- Nœud N3 : uniquement des transformateurs, sur fond bleu – ES 11/14.5 ; NR 10/14
- Nœud N4 : ES 7/10 ; NR 5/40 ; TA 12,5/15.

Tableau 6 – Indicateurs retenus.

Son	Typologie fonctionnelle	ES	NR	TA	Famille(s)
F1_22	EAU - chute	5	0	0	1A
F1_35	EAU - chute	1,4	1	5,4	1R
F1_46	EAU - chute	6,4	4	11	1R
F1_51	EAU - chute	11	4	17	1B (2)
F2_13	COMBUSTION	10	3	10	2A
F2_14	SALLE DES MACHINES	15	0	0	2R
F2_33	GAZ - ventilateur	12	1	3,7	2R
F2_42	GAZ - soupape/bouche	18	2	5,2	2A
F2_43	GAZ - ventilateur	11	8	9,4	2B (1)
F2_52	GAZ - ventilateur	16	2	9,6	2B (1)
F3_15	ELEC - transformateur	17	8	26	3R
F3_39	ELEC - transformateur	16	7	20	3A
F3_53	ELEC - transformateur	15	7	13	3R
F4_17	EAU - pompe	7,5	14	16	4A
F4_23	GAZ - ventilateur	10	27	17	4R
F4_29	SALLE DES MACHINES	11	7	20	4A
F4_30	EAU - pompe	7,9	19	20	4B (5)
F4_44	GAZ - soupape/bouche	7,4	3	27	4A
F4_47	GAZ - soupape/bouche	6,8	4	22	4R
F4_49	EAU - pompe	11	3	29	C (2,4,3)
F4_54	GAZ - soupape/bouche	4,3	9	27	4B (6)
F4_55	GAZ - tuyauterie	10	2	6,5	4B (6,2)
F5_2	ELEC - transformateur	15	16	34	5B (3,6,4)
F5_4	ELEC - turbine	7,9	50	24	5B (6,4)
F5_5	ELEC - transformateur	11	87	14	5R
F5_31	COMBUSTION	7,8	41	18	5B (6)
F5_40	SALLE DES MACHINES	6,6	54	29	5R
F6_9	GAZ - ventilateur	3,7	6	6,6	C (4,6,3)
F6_32	GAZ - soupape/bouche	4,4	6	7,4	B2 (4)
F6_37	SALLE DES MACHINES	14	7	16	C (5,6,3,2,4)
M56	EAU - chute	5,9	0	0	1A
M45	GAZ - soupape/bouche	9,2	1	7,2	2B (4,3)
M48	GAZ - soupape/bouche	8,6	0	0	2B (4,3)
M3	GAZ - soupape/bouche	7,4	2	11	2B (4,3)
M25	ELEC - transformateur	17	2	27	3A
M28	ELEC - transformateur	12	12	24	3B (5)
M24	GAZ - tuyauterie	6,1	3	14	4A
M11	GAZ - ventilateur	20	11	7,4	C (2,3,4)
M20	SALLE DES MACHINES	3,4	7	16	C (4,6,5)
M18	EAU - pompe	9,6	22	23	C (5,4,6)
M27	SALLE DES MACHINES	12	7	19	C (4,6,5)
M16	SALLE DES MACHINES	16	9	26	C (6,4,5)
M26	SALLE DES MACHINES	14	10	15	C (6,5,4)

	Transformateurs
	Sons problématiques avec notre approche
	Nouveaux sons entrant difficilement dans la typologie

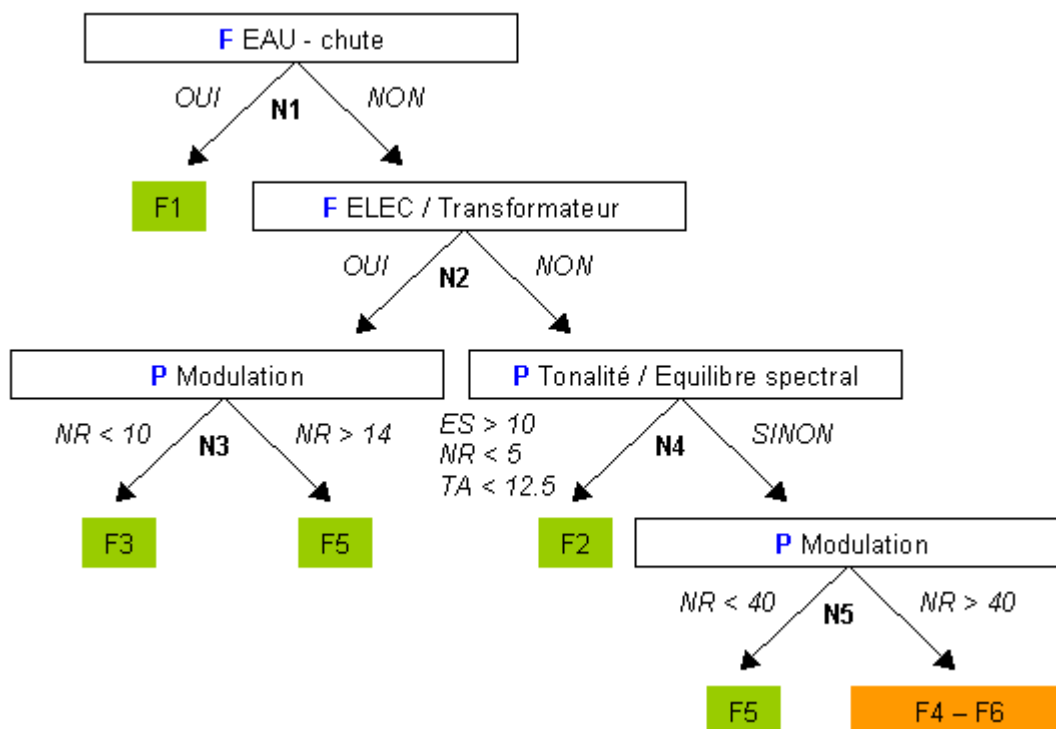


Figure 12 – Arbre de décision permettant la classification de sons industriels.

#### 4.5. Limites de validité des conclusions sur les indicateurs et achoppements méthodologiques

Notre démarche ne permet pas discriminer les familles 4 et 6. Cependant nous avons déjà vu lors de l'étude des résultats du test perceptif que les limites de ces familles étaient floues.

Il est par ailleurs difficile de trouver des indicateurs qui collent bien aux données, notamment en ce qui concerne la détection des tonalités et de la modulation. Par exemple la tonalité du son F4\_55 (rangé par 71% des sujets en famille 4) est mal détectée, et inversement, trop de raies sont détectées pour le son F2\_43, le reversant en famille « 4-6 ».

Ajoutons qu'il serait intéressant d'avoir une approche positive pour les sons des familles 1 et 2, en détectant de l'énergie de type « large-bande » plutôt que la seule absence de tonalité.

#### 4.6. Outil d'analyse et de visualisation des résultats

Un outil Matlab a été développé pour permettre une visualisation globale de la sonothèque : informations fonctionnelles, résultats de l'expérience perceptive, analyses des enregistrements en salle d'écoute, calcul d'indicateurs. Cet outil a été essentiel pour la détermination des indicateurs permettant la classification automatique des sons.

Cet outil a en outre permis de valider des routines MATLAB d'analyses de signaux par comparaison aux résultats obtenus avec le logiciel PAK. En outre, les principales routines d'analyses et de calcul d'indicateurs utilisées ont été légèrement adaptées pour permettre une utilisation « stand-alone » hors outil.

## 5. Conclusions et perspectives

L'approche typologique est intéressante pour traiter la diversité des sources de bruit industriel mais, en l'état, présente des limites :

- la typologie semble peu robuste concernant un grand nombre de sons, et les nouveaux sons n'y trouvent pas forcément bien leur place ;
- les familles n'ont pas du tout la même représentativité, traduisant la réalité complexe de la perception : certaines traduisent un aspect fonctionnel (famille 1 voire 3), d'autres de gêne (famille 5), tandis que la définition des autres est assez faible ;
- dès qu'il y a des tonalités marquées, le classement perceptif se complique (tonalité grave/aiguë...).

Les frontières perceptives floues entre certaines familles se retrouvent lors de l'établissement de notre démarche de classification automatique. Il est difficile d'affecter des bornes aux indicateurs : certains sons complexes mettent déjà cette approche à mal, et l'on peut imaginer que l'ajout de nouveaux sons invaliderait les valeurs que nous avons définies.

D'autre part dans le cadre global de l'étude, il a été déterminé des indicateurs à utiliser pour chacune des familles. Mais cette approche « par famille » a finalement aboutie pour la plupart des familles à la seule utilisation des indicateurs de niveau pondérée et de sonie totale. De plus, la tentative de passage de l'approche « mono-source », à l'approche « multi-exposition » par combinaison de sources n'a pas aboutie.

L'étude a ainsi mis en avant la complexité de ces problèmes perceptifs pour la prévision de la gêne occasionnée par les sites industriels. En l'état, il n'est donc pas possible de porter l'approche « typologique » des sources de bruit industriel vers l'ingénierie.

En outre, notre stage aura permis de tester un grand nombre d'indicateurs, de constater leurs limites pour notre application, sans toutefois pouvoir véritablement établir de cahier des charges pour la définition de nouveaux indicateurs.



## 6. Références bibliographiques

[Alayrac 2009] Alayrac M.. Indicateurs de gêne sonore pour l'étude d'impact du bruit d'un site industriel : caractérisation physique et perceptive. Thèse d'acoustique, Lyon : Institut National des Sciences Appliquées, 2009.

[Alayrac 2010] Alayrac M., Marquis-Favre C., Viollon S., Morel J. and Le Nost G. "Annoyance from industrial noise: indicators for a wide variety of industrial sources". JASA, Septembre 2010, volume 128, Issue 3, pp. 1128-1139.

[Alayrac 2011] Alayrac M., Marquis-Favre C., Viollon S. "Total annoyance from an industrial noise source with a main spectral component combined with a background noise". JASA, Juillet 2011, volume 130, Issue 1, pp. 189-199.

[Le Nost 2007] Le Nost G. Contribution à l'étude de l'impact environnemental sonore des sites industriels: une typologie perceptive de sources de bruit. Thèse d'acoustique, Lyon : Institut National des Sciences Appliquées, 2007.

[Pedersen 2000] Pedersen T.H., Sondergaard M., Andersen B. "Objective method for assessing the audibility of tones in noise - Joint nordic method v2" Delta report AV 1952/99, 2000.

[Zwicker 1999] Zwicker E., Fastl H. Psychoacoustics: Facts and models. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 1999, 417p.

## 7. Tables

### 7.1. Table des figures

Figure 1 – Dendrogramme issu de la catégorisation libre .....	6
Figure 2 – Interface présentée aux sujets lors de l'expérience perceptive.....	10
Figure 3 – Représentation de la sonie des sons représentatifs d'après le modèle de Zwicker (norme ISO 532B), champs libre (sonesGF).....	12
Figure 4 – Dendrogramme issu de la classification des sujets par comparaison de leurs réponses ...	15
Figure 5 – Présentation graphique des résultats de l'expérience perceptive (proportion d'attribution des sons aux différentes familles).....	18
Figure 6 – Réponses des sujets concernant la définition des familles .....	19
Figure 7 – Présentation graphique des résultats de notre étude – en premier – accolés à ceux de l'étude Eurosyn –en second.....	22
Figure 8 – Illustration des différences d'équilibre spectral de sons « types » des familles 1 et 2 via la représentation de leur sonie spécifique. ....	24
Figure 9 – Illustration des différences de tonalités de sons « types » des familles 2, 3 et 4 par une analyse spectrale bandes fines.....	24
Figure 10 – Illustration du phénomène de modulation des sons de la famille 5 se traduisant par un nombre de raies HF du spectre bandes fines élevé. ....	25
Figure 11 – Trame de l'arbre de décision permettant la classification automatique de sons industriels. ....	25
Figure 12 – Arbre de décision permettant la classification de sons industriels. ....	30

### 7.2. Table des tableaux

Tableau 1 – Classement des sources en six familles .....	7
Tableau 2 – Sons représentatifs .....	12
Tableau 3 – Associations des sons aux familles. Première colonne : pourcentage du nombre d'associations. Deuxième colonne : moyenne arithmétique de l'indice de confiance associée. En rouge : sons de type A ; en orange : sons de type B et en vert : sons de type C.....	17
Tableau 4 – Comparaison de la notion de définition d'une famille à celle de confiance dans le classement des sons dans cette famille .....	20
Tableau 5 – Comparaison des résultats (colonne 1) avec ceux de l'étude Eurosyn (colonne 2). Les soleurs représentent les sons de type A (roug), B (orange) et C (vert).....	21
Tableau 6 – Indicateurs retenus.....	29

## **ANNEXE A – INSTRUCTIONS POUR L'EXPERIENCE PERCEPTIVE**

Nous réalisons une expérience perceptive afin de classer des sons issus d'enregistrements de différentes sources industrielles. Cette expérience est anonyme.

### **Contexte de l'expérience**

Nous avons fait des enregistrements sonores de différentes sources industrielles.

Des travaux précédents ont permis de regrouper des sons industriels selon leur ressemblance dans cinq familles. Ces familles comprennent donc des sons similaires à l'écoute, qui sonnent de la même manière. Inversement, les sons de deux familles différentes seront peu ressemblants à l'écoute.

Chacune de ces familles est représentée par deux sons, deux exemples particulièrement remarquables de chaque famille.

### **Votre rôle dans l'expérience**

Nous disposons maintenant de nouveaux sons et souhaitons les classer, les ranger dans chacune de ces familles. Nous vous présentons une partie de ces sons et désirons votre avis sur l'appartenance de ces sons à une famille. Nous vous demandons de nous aider à savoir à quelle famille chaque son se rattache. C'est véritablement votre avis qui nous intéresse, il n'y a donc pas de mauvaise réponse.

Pour ce faire, vous disposerez pour chacune des cinq familles des sons représentatifs que nous avons sélectionnés, qui donnent une idée générale de la famille. Si un son vous semble proche, ressemblant, à un des sons représentatifs de la famille, vous le rangez (en le glissant-disposant) dans cette famille. Ainsi l'ensemble des sons d'une même famille devraient être similaires entre eux. Vous pouvez écouter tous les sons aussi souvent et dans l'ordre que vous souhaitez (en double-cliquant sur le bouton correspondant). Vous vous intéressez aux caractères des sons, à la façon dont ils sonnent.

Vous avez bien sûr le droit de mettre autant de sons que vous voulez dans chaque famille.

En outre, comme il s'agit de nouveaux sons par rapport aux études précédentes, il est possible que certains sons ne ressemblent à aucun des sons représentatifs et que vous jugiez qu'il ne vous est pas possible de les ranger dans l'une des cinq familles. C'est pourquoi nous avons prévu une sixième famille qui regroupera ce type de sons.

Il se peut que vous hésitez avant de ranger un son plus que pour un autre dont le classement vous semblera aller de soi. C'est pour cela que nous vous demandons pour chaque son un indice qui a la signification suivante :

1. vous avez rangé le son dans cette famille sans aucune hésitation,
2. vous avez un peu hésité avant de décider de ranger le son dans cette famille,
3. vous avez beaucoup hésité avant de décider de ranger le son dans cette famille.

### **Récapitulatif**

Pour chaque famille, des sons représentatifs vous sont proposés afin que vous puissiez les comparer aux sons à classer. Ils vous permettront également de vous faire une idée générale de la famille. Vous écoutez les sons dans l'ordre que vous voulez, le nombre de fois que vous voulez. Les sons regroupés dans une même case se ressemblent à l'écoute, sonnent de la même manière, créant ainsi une famille.

### **Début de l'expérience**

Pour vous familiariser avec cette expérience, je vous propose de commencer à blanc. Quand vous jugerez avoir bien compris ce qui vous est demandé, je relancerai l'expérience et vous laisserai faire. Vous pourrez me contacter au :

**474086**

pour toute question et lorsque vous aurez terminé.

## **ANNEXE B – FIN DE L'EXPERIENCE : QUESTIONNAIRE ET DEBRIEFING**

### **Questionnaire**

N°:

### **Expérience perceptive – EDF R&D Clamart – juillet-août 2012**

*Pour compléter le questionnaire ci-dessous, veuillez cocher la case correspondante à votre réponse ou formuler votre réponse si cela vous est demandé.*

**Sexe :**  homme  femme

**Profession :**

**Votre activité professionnelle est-elle liée au son ou à l'acoustique (ingénieur du son, musicien,...) ?**

oui  non

*Si oui, veuillez préciser le lien :*

**Pratiquez-vous une activité musicale soutenue ?**

oui  non

**Quel âge avez-vous ?**

moins de 35 ans  de 35 à 50 ans  plus de 50 ans

**Habitez-vous à proximité d'une installation industrielle ?**

oui  non

*Si oui :*

- *quel(s) type(s) d'installation(s) industrielle(s) :*

- *si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit de cette installation industrielle vous gêne-t-il ?*

pas du tout  légèrement  moyennement  beaucoup  extrêmement

- *quand vous êtes chez vous, est-ce que cette installation émet du bruit en permanence ou par intermittence ?*

**Vous arrive-t-il de travailler en présence de sons issus de sources industrielles ?**

oui  non

*Si oui, quel(s) type(s) de source(s)*

:

## Annexes

**Pour chacune des familles de sons que vous avez constituées, seriez-vous d'accord pour dire qu'elle est clairement définie, qu'elle a une identité forte ?**

Famille 1 :	<input type="checkbox"/> pas du tout d'accord	<input type="checkbox"/> pas d'accord	<input type="checkbox"/> ni en désaccord ni d'accord	<input type="checkbox"/> d'accord	<input type="checkbox"/> tout à fait d'accord
Famille 2 :	<input type="checkbox"/> pas du tout d'accord	<input type="checkbox"/> pas d'accord	<input type="checkbox"/> ni en désaccord ni d'accord	<input type="checkbox"/> d'accord	<input type="checkbox"/> tout à fait d'accord
Famille 3 :	<input type="checkbox"/> pas du tout d'accord	<input type="checkbox"/> pas d'accord	<input type="checkbox"/> ni en désaccord ni d'accord	<input type="checkbox"/> d'accord	<input type="checkbox"/> tout à fait d'accord
Famille 4 :	<input type="checkbox"/> pas du tout d'accord	<input type="checkbox"/> pas d'accord	<input type="checkbox"/> ni en désaccord ni d'accord	<input type="checkbox"/> d'accord	<input type="checkbox"/> tout à fait d'accord
Famille 5 :	<input type="checkbox"/> pas du tout d'accord	<input type="checkbox"/> pas d'accord	<input type="checkbox"/> ni en désaccord ni d'accord	<input type="checkbox"/> d'accord	<input type="checkbox"/> tout à fait d'accord

**Avez-vous trouvé cette expérience difficile ?**

pas du tout  un peu  moyennement  très  extrêmement

**Remarques (difficulté...) :**

### **Debriefing (enregistré)**

Commentaires informel sur la difficulté, le déroulement du test

« Afin de nous aider dans notre étude, nous aimerions savoir comment vous décrivez, si c'est possible, les familles de bruit : quels sont les critères forts de la famille, qui la caractérisent, qui font son identité ? »

## **ANNEXE C – CHOIX DES SONS REPRESENTATIFS**

### **Méthodologie**

#### **Problèmes méthodologiques**

Le choix de bons sons représentatifs pose des problèmes méthodologiques :

- combien de sons représentatifs proposer
- un son représentatif

*Avantages* : aucune « direction » d'écoute n'est favorisée et l'interprétation d'une ressemblance perceptive est laissée libre au sujet

*Inconvénients* : construction d'une représentation de la famille dans son ensemble plus difficile pour le sujet

- deux sons représentatifs les plus semblables possible

*Avantages* : facilite la construction d'une représentation de la famille par le sujet

*Inconvénients* : « dirige » fortement cette représentation et la réduit

- deux sons représentatifs différents

*Avantages* : aide à forger une représentation assez large de la famille plus proche de l'étendue conférée par la typologie originale

*Inconvénients* : le sujet pourrait être amené à réunir deux classes bien distinctes (pas gênant d'un point de vue robustesse mais d'un point de vue pertinence) - la famille 4 est un exemple de cette problématique

- à partir de quels résultats choisir ces sons représentatifs
- propositions issues de la thèse de G. Le Nost (discussion avec les sujets)

*Avantages* : sujets originaux

*Inconvénients* : méthodologie problématique

- à partir de la matrice d'associations issue l'expérience de catégorisation libre effectué par G. Le Nost (table 3, page 23)

*Avantages* : meilleure représentation de la typologie initiale

*Inconvénients* : résultat statistique

- à partir des résultats Eurosyn

*Avantages* : consensus de divers experts

*Inconvénients* : choix dirigé par la représentation commune construite lors de la phase d'apprentissage

#### **Choix méthodologiques**

Il a été décidé de proposer au sujet deux sons représentatifs pour chacune des cinq familles les mieux définies de la typologie initiales.

Le choix de ces sons représentatifs sera réalisé en recoupant l'ensemble des données statistiques obtenues lors des précédentes études conjugué à l'écoute de l'ensemble des sons en salle d'écoute dans les conditions de l'expérience perceptive.

### **Statistiques sur les matrices**

#### **Matrice des associations**

Les colonnes m1, m2, m3, m4, m5 et m6 représentent la moyenne du nombre d'associations d'un son avec les membres de la famille correspondante (respectivement 1, 2, 3, 4, 5 et 6). Elles permettent de voir, en moyenne, si un son est fortement associé aux autres membres de sa famille et s'il n'est pas trop associé à d'autres familles.

Le code couleur est le suivant (rappel : l'expérience avait été faite sur 60 sujets mais seuls les résultats de 58 d'entre eux avaient été conservés) :

- rouge plus de 75% d'associations,
- orange plus de 50% d'associations,
- vert plus de 25% d'associations.

La couleur a été appliquée au texte pour les associations entre sons et au fond pour les moyenne par familles.



## Choix des sons représentatifs par famille

### Famille 1

**Remarques préliminaires sur la famille :** bruit large bande - chute d'eau.

**Proposition de G. Le Nost :** source 35 (9 occurrences parmi les 29 sujets considérés, contre moins de 5 occurrences pour les autres sons).

**Analyse statistique de la matrice d'associations :** les sons 35 et 46 sont les plus associés à d'autres membres de la famille.

**Étude Eurosyn :** les sons 35 et 46 rencontrent le plus grand consensus (respectivement 100% et 94%). Il est à noter qu'un son n'appartenant pas à la typologie d'origine (le son 56) atteint également un consensus de 100%.

**Conclusion :** les sons **35** et **46** ont été retenus. Notons que le son 46 présente une très légère tonalité.

### Famille 2

**Remarques préliminaires sur la famille :** bruit bande plus étroite (par rapport à famille 1), plus basses fréquences (ventilations)

**Proposition de G. Le Nost :** parmi les sujets sélectionnés pour les verbalisations, les sources 42 et 52 ont chacune été choisies à deux reprises. Les autres sources ont été choisies moins de deux fois.

**Analyse statistique de la matrice d'associations :** les sons 14 et 33 sont les plus associés à d'autres membres de la famille.

**Étude Eurosyn :** les sons 33, 13 et 14 rencontrent le plus grand consensus (respectivement 100%, 81% et 81%). Remarque : le son 32, originalement associé à la famille 6, rencontre un plus fort consensus (88%) que les sons 13 et 14.

**Conclusion :** les sons **33** et **14** ont été retenus. Notons que le son 14 est le son de la famille 2 qui a été en moyenne le plus souvent associé à des sons de la famille 3.

### Famille 3

**Remarques préliminaires sur la famille :** sons de transformateurs (ventilés . . . ou non !), émergence à 100 Hz.

**Proposition de G. Le Nost :** les sources 15 et 53 ont toutes deux été désignées comme meilleur représentant par 6 sujets parmi les 22 sujets retenus pour l'analyse.

**Analyse statistique de la matrice d'associations :** Le son 39 est le plus associé à d'autres membres de la famille.

**Étude Eurosyn :** exception faite du son 2 qui a été associé à cette famille contrairement à la typologie d'origine, les sons 15, 39 et 53 remportent des consensus proches, bien que le son 15 soit plus consensuel.

**Conclusion :** le son 39, bien que ressortant de l'analyse statistique, présente une émergence BF à 50 Hz problématique. Les sons retenus ont donc été les sons **15** et **53**. Notons que le son 15 a la particularité de ne pas présenter l'harmonique à 300 Hz.

### Famille 4

**Remarques préliminaires sur la famille :** cette famille est assez complexe, regroupant des sons « fluctuants » et des sons présentant une émergence HF importante.

**Proposition de G. Le Nost :** « nous ne pouvons définir de "meilleur représentant" pour les stimuli de la famille 4 de la même manière que pour les autres familles. Néanmoins [...] c'est la source 44 qui semblerait la plus représentative de la famille 4. ».

**Analyse statistique de la matrice d'associations :** les sons 47, 17 et 44 sont les plus associés à d'autres membres de la famille.

**Étude Eurosyn :** les sons 17, 23 et 54 rencontrent le plus fort consensus (94%).

**Conclusion :** les sons **23** et **47** ont été retenus. Ils sont tous les deux assez différents à l'écoute, ce qui devrait permettre de donner aux sujets une image plus large de la famille.

### Famille 5

**Remarques préliminaires sur la famille :** sons agressifs, modulants

**Proposition de G. Le Nost :** sur les 6 sujets sélectionnés pour l'étude des verbalisations, 3 ont choisi la source 5 comme "meilleur représentant".

**Analyse statistique de la matrice d'associations :** les sons 4 et 5 sont les plus associés à d'autres membres de la famille.



**Étude Eurosyn** : les sons 40 et 5 apparaissent comme donnant les meilleurs consensus (respectivement 94% et 88%).

**Conclusion** : les sons **5** et **40** ont été retenus, les autres sons présentant à l'écoute des particularités singulières.

**ANNEXE D – QUESTIONNAIRE DE RECRUTEMENT (EXTRAIT)**

1. Vous travaillez ou avez travaillé dans l'un des secteurs suivants:

	OUI	NON
A .Dans une agence de publicité	1	2
B. Dans le secteur Automobile	1	2
C. Dans une agence d'Etudes marketing	1	2
D. Dans le secteur de l'énergie	1	2
E. Dans un département marketing / télémarketing	1	2
F. Dans le secteur des transports	1	2
G. Dans les relations publiques / Le journalisme / La presse / Les médias	1	2

2. Votre activité professionnelle est-elle liée au son ou à l'acoustique (ingénieur du son, musicien,...) ? → informatif

..... Oui

..... Non

Si oui, précisez : \_\_\_\_\_

3. Pourriez-vous me préciser quelle est votre profession ?

..... Cadre

..... Cadre supérieur

..... Artisan, commerçant, chef d'entreprise

..... Profession intermédiaire

..... Employé

..... Ouvrier

..... Etudiant

..... Retraité

..... Femme au foyer

..... Demandeur d'emploi

Quelle est votre profession exacte ? \_\_\_\_\_

**4. Avez-vous participé à des tests consommateurs au cours des 3 derniers mois ?**

..... Oui

..... Non

Si oui, sur quels produits ? \_\_\_\_\_

**5. Etes-vous...**

..... Un homme 50% (60 consommateurs à recruter au total)

..... Une femme 50%

**6. Quel âge avez-vous ? \_\_\_\_\_ ans**

..... 25-35 ans 33%

..... 36-50 ans 33%

..... 50 et + 33%

Quotas à croiser avec le sexe

**7. Souffrez-vous de troubles auditifs ?**

..... Oui → stop questionnaire

..... Non

**8. Utilisez-vous fréquemment un ordinateur (êtes-vous familier avec l'utilisation d'une souris) ?**

..... Oui

..... Non → stop questionnaire

Vous correspondez à la cible de personnes que nous recherchons pour ce test.

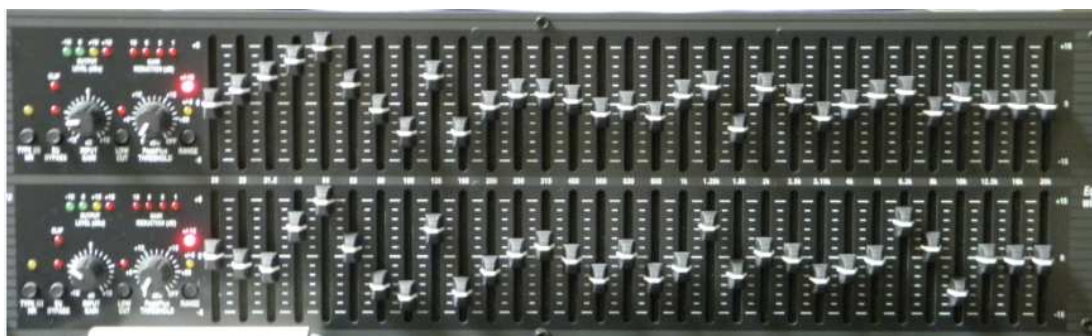
## **ANNEXE E – PARAMETRES DE DIFFUSION ET D'ENREGISTREMENT DES SONS EN SALLE D'ECOUTE**

### **Diffusion en salle d'écoute**

#### **Mise en forme des fichiers audio**

Il a été fait le choix de prendre les fichiers précédemment égalisés). Pour les sons n'appartenant pas à la typologie d'origine, des fichiers de 5s avaient été préparés pour Eurosyn et ont été récupérés. Pour les sons appartenant à la typologie d'origine, les fichiers égalisés avaient une durée de 15 s. Les sons étant stationnaires, la découpe a été faite entre la cinquième et la dixième seconde pour éviter un éventuel blanc au début du fichier sauf pour les sons 39 (famille 3) et 17 (famille 4) qui présentaient des bruits étranges dans cette plage. Ces sons ont été coupés entre 0,2 et 5,2s. Pour tous les sons, un fade in et un fade out de 50 ms ont été appliqués en début et fin de fichier (selon la procédure employée par G. Le Nost).

#### **Réglage de la chaîne électro-acoustique**



**Figure 13 – Photographie de l'égaliseur**

La salle présente un mode à 50 Hz pour lequel le sujet se trouve dans un noeud. Cependant le son 39 de la famille 3 présente une raie très marquée à cette fréquence. Le choix a donc été fait d'amplifier au maximum cette fréquence avec l'equalizer. Cela oblige à avoir une atténuation en entrée de l'equalizer relativement importante pour ne pas qu'il applique une atténuation pour le son 39. Un compromis a donc été trouvé entre l'atténuation en entrée de l'equalizer pour éviter la saturation et un niveau important en sortie pour éviter le bruit de fond rajouté par le gain de l'ampli notamment voie droite.

Le réglage des autres bandes de fréquence a été fait pour chaque enceinte par la diffusion d'un bruit rose et un réglage temps réel avec Pulse. Il a été fait en prenant en compte simultanément les résultats pour deux microphones placés approximativement à la position des oreilles des sujets (à une hauteur de 1,15m). Des mesures ont ensuite été réalisées à d'autres positions à l'intérieur d'une zone d'écoute plus large pour valider le réglage.

Aucun réglage n'est effectué en HF car le filtrage des sons pour traduire la propagation implique que l'énergie dans ces bandes est minime.

#### **Enregistrement des sons**

L'enregistrement a été effectué par un microphone ½ pouce ICP BK type 4189 et le système d'acquisition PULSE. Le microphone était placé à la position d'écoute à 1m20 du sol.

L'ensemble des 43 sons utilisés pour l'expérience perceptive a été diffusé en respectant les paramètres de l'expérience (niveau sonore, égalisation de la salle) avec une pause prenant en compte les mesures de TR de la salle réalisées par G. Le Nost entre chaque son. L'enregistrement a été réalisé de manière continue.

Les mesures ont été réalisées tôt le matin car la circulation dans le couloir ou la fermeture de portes du sous-sol peut augmenter le niveau de bruit de fond (ce qui peut également déclencher le trigger en cas d'automatisation des mesures).

Le paramétrage de Pulse conduisant nécessairement à une faible dynamique, l'export des fichiers « .DAT » en fichiers « .WAV » pour le traitement MATLAB a été fait en 24bits pour conserver un rapport signal sur bruit correct.

## Annexes

Enfin, les fichiers « .WAV » résultant ont été coupés à la main (longueur de 4,5s) avec Adobe Audition.

## ANNEXE F – TABLEAU DES NIVEAUX MESURES EN SALLE D'ECOUTE

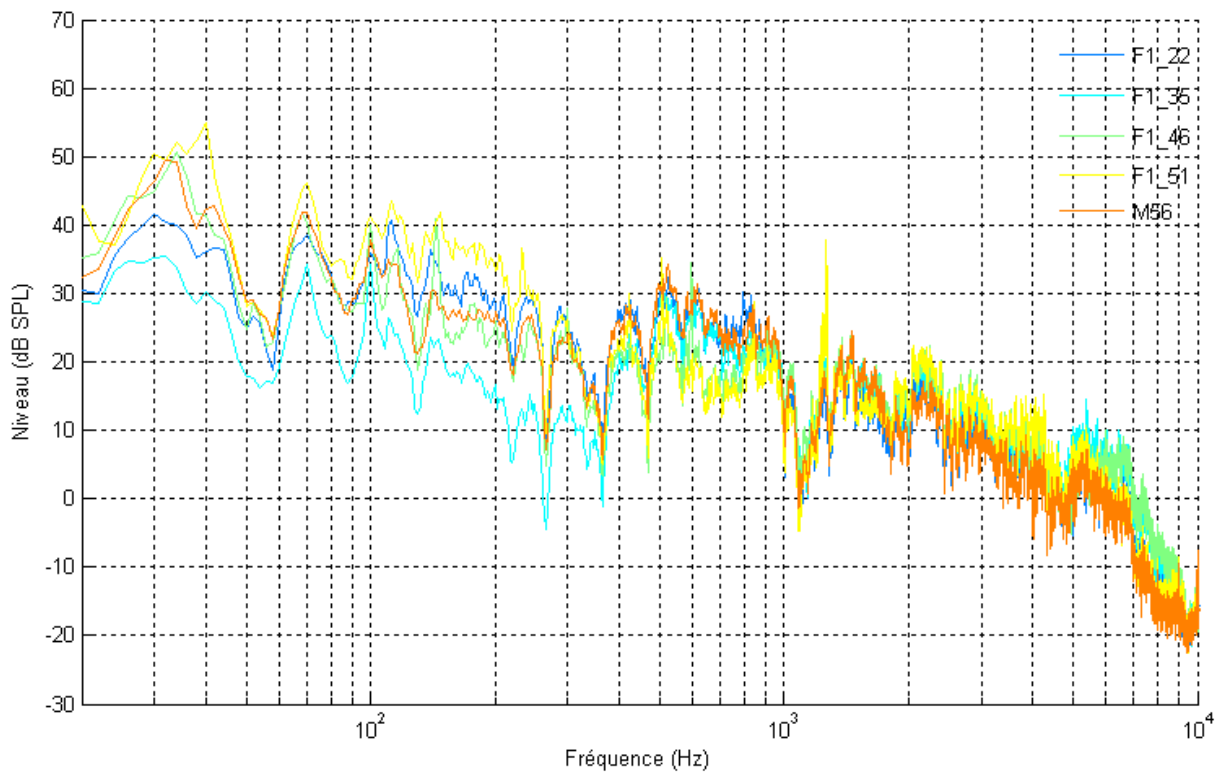
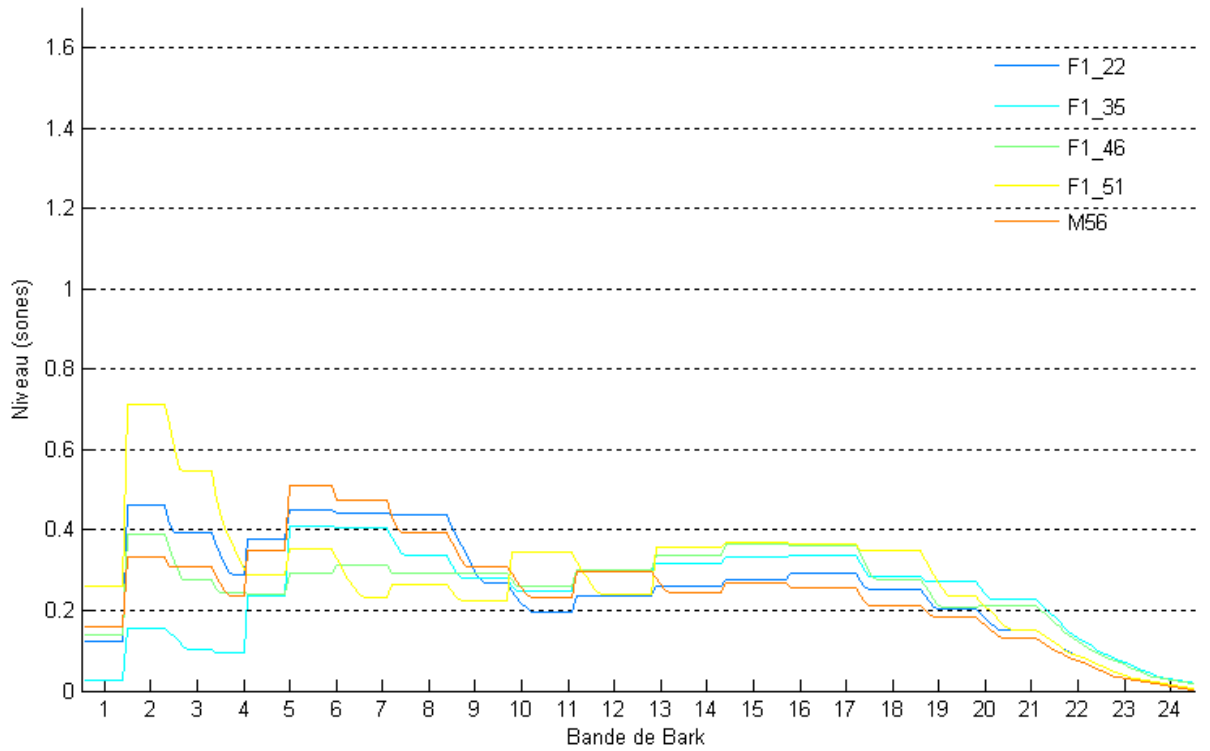
Tableau 1 - Niveaux de diffusion mesurés en salle d'écoute :  
en rouge les sons représentatifs des familles ; en bleu, les valeurs de sonie légèrement faibles  
mais considérées comme non problématiques.

Son	Lp (dB(A))	Sonie totale (soneGF)
F1_22	48.8	6.4
F1_35	48.4	5.9
F1_46	48.0	6.3
F1_51	48.8	7.0
F2_13	49.7	6.6
F2_14	49.8	6.8
F2_33	51.1	6.7
F2_42	50.1	6.0
F2_43	49.0	6.6
F2_52	51.5	6.4
F3_15	52.2	6.9
F3_39	50.3	6.7
F3_53	50.8	7.4
F4_17	47.8	5.4
F4_23	50.2	6.2
F4_29	50.2	6.1
F4_30	49.9	6.6
F4_44	51.9	5.8
F4_47	50.3	5.5
F4_49	49.8	6.7
F4_54	50.3	4.3
F4_55	46.5	4.6

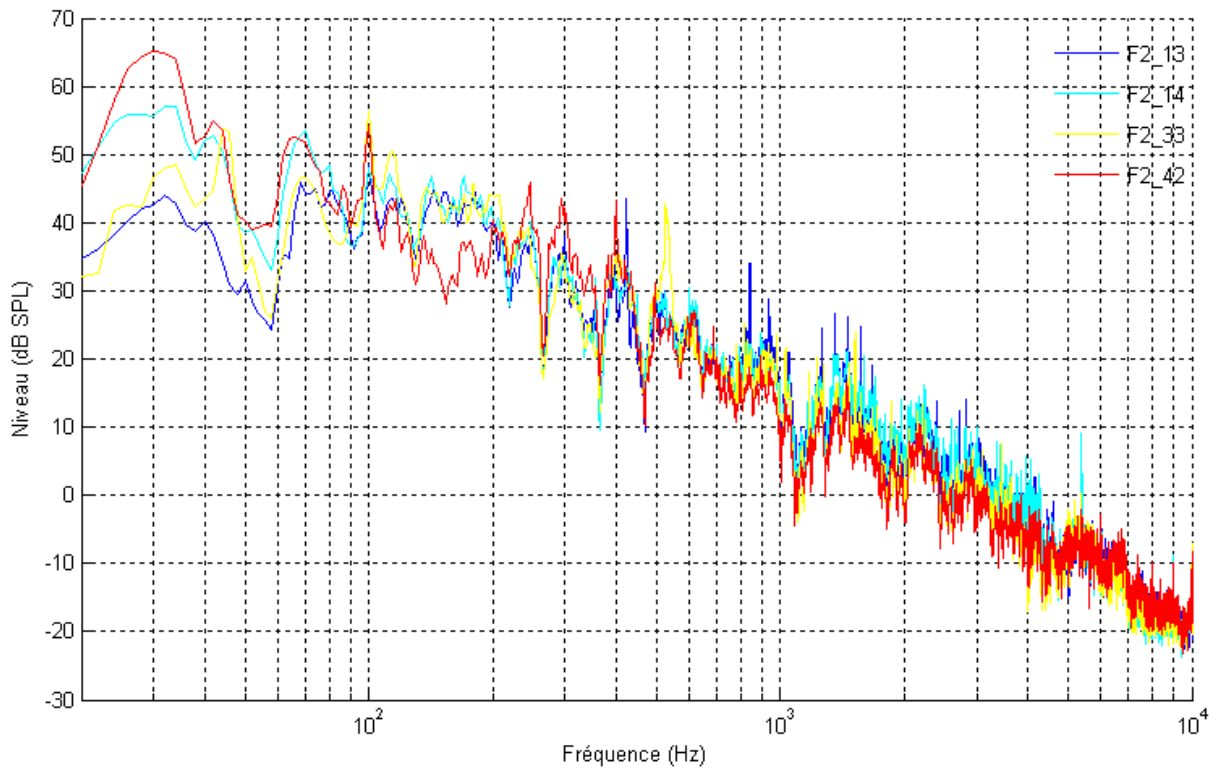
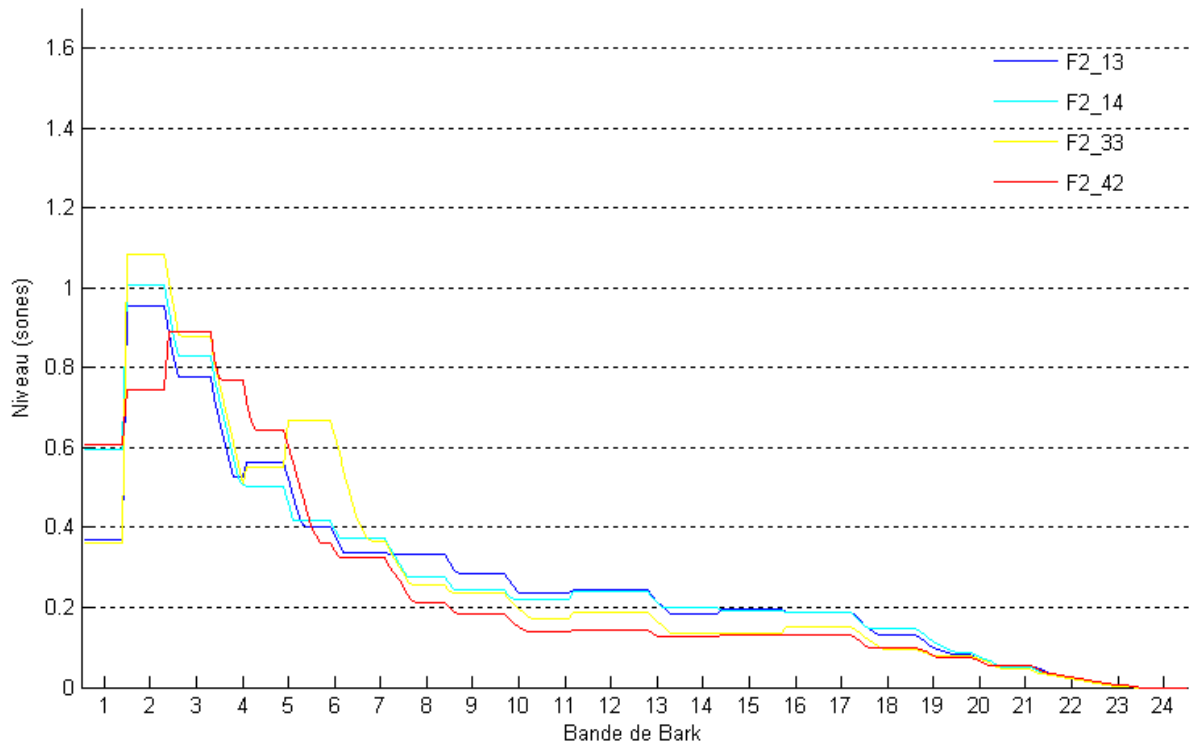
Son	Lp (dB(A))	Sonie totale (soneGF)
F5_2	51.8	6.2
F5_4	48.2	5.1
F5_5	47.7	6.2
F5_31	48.4	6.0
F5_40	49.1	5.2
F6_9	49.3	4.7
F6_32	51.6	5.8
F6_37	49.0	6.8
M56	49.1	6.1
M45	49.2	5.5
M48	49.9	6.0
M3	48.6	4.7
M25	51.3	7.1
M28	50.9	7.3
M24	49.7	5.6
M11	48.2	6.0
M20	49.1	3.6
M18	49.5	6.7
M27	49.6	6.2
M16	48.3	6.6
M26	49.1	6.5

## ANNEXE G – ANALYSES PHYSIQUES DES SONS DIFFUSES

### Famille 1 (R, A, B)

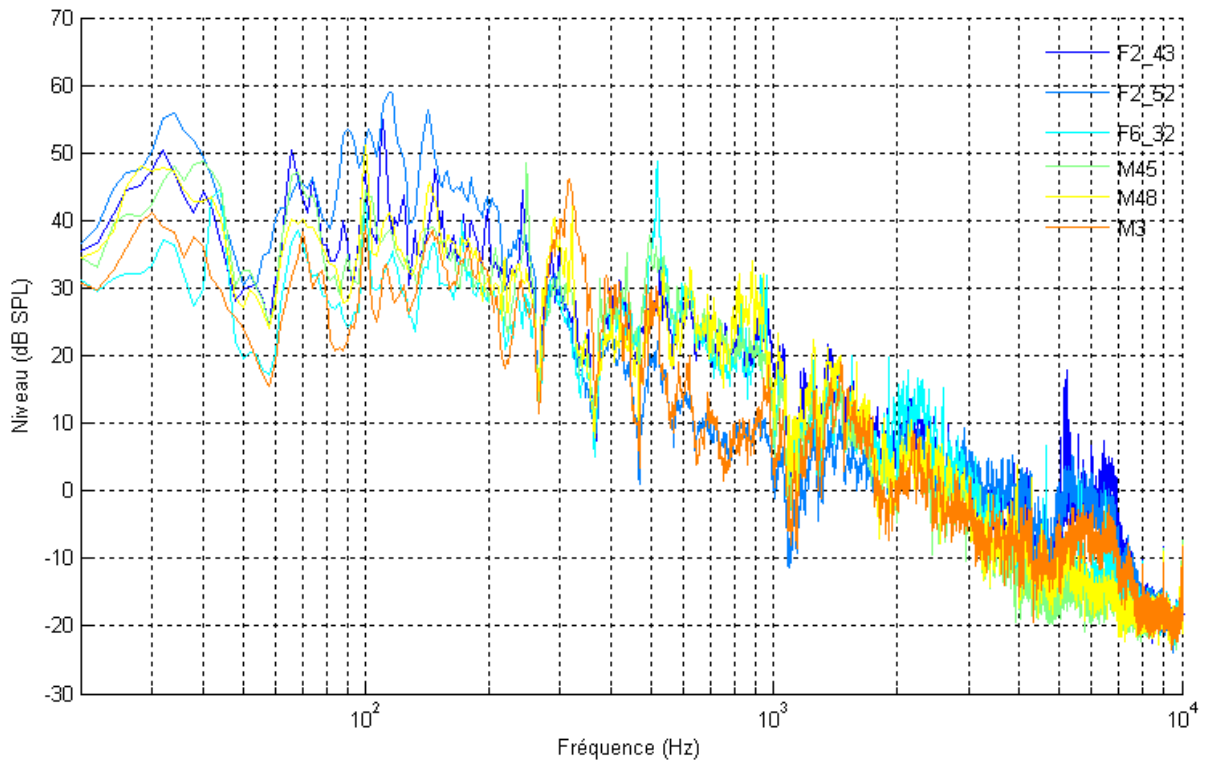
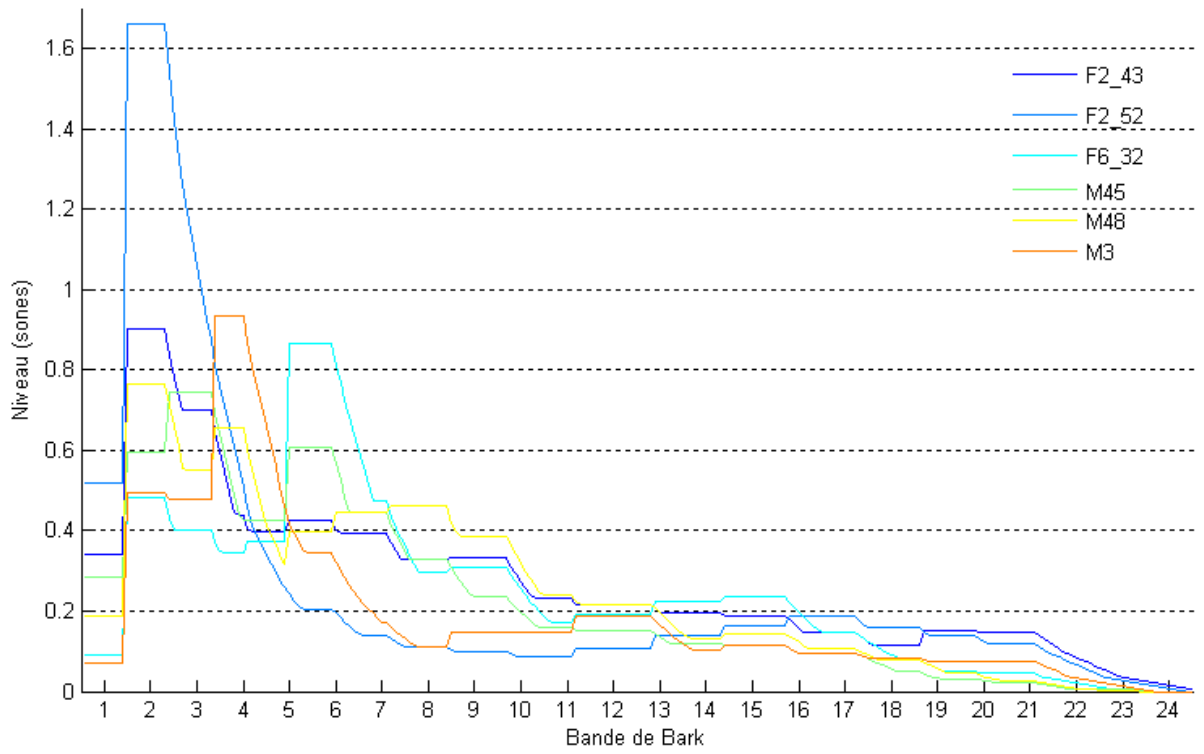


Famille 2 (R, A)

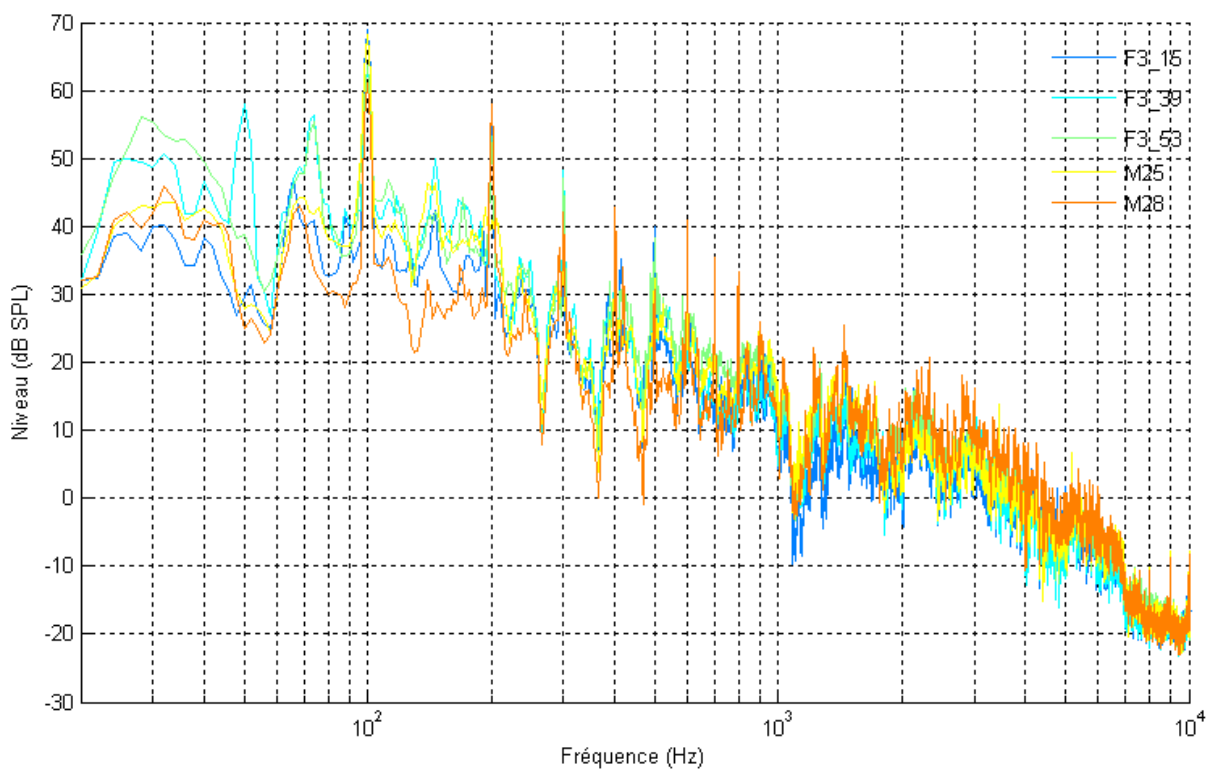
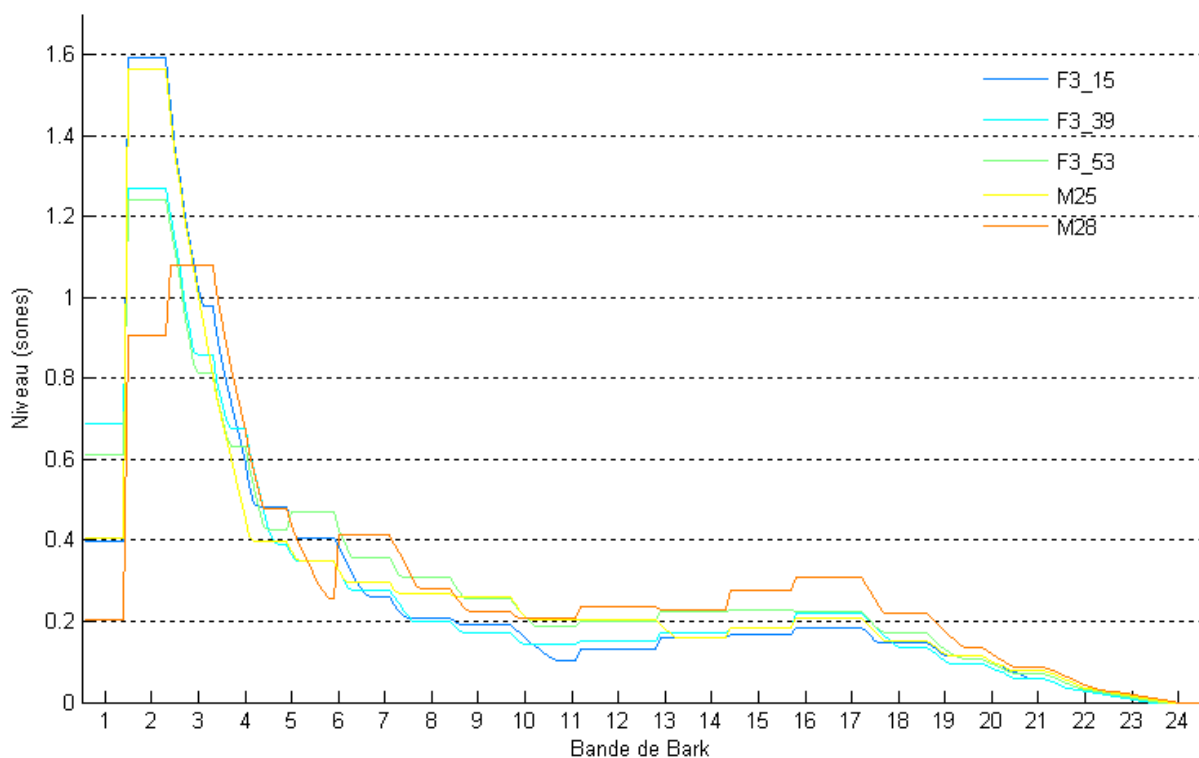




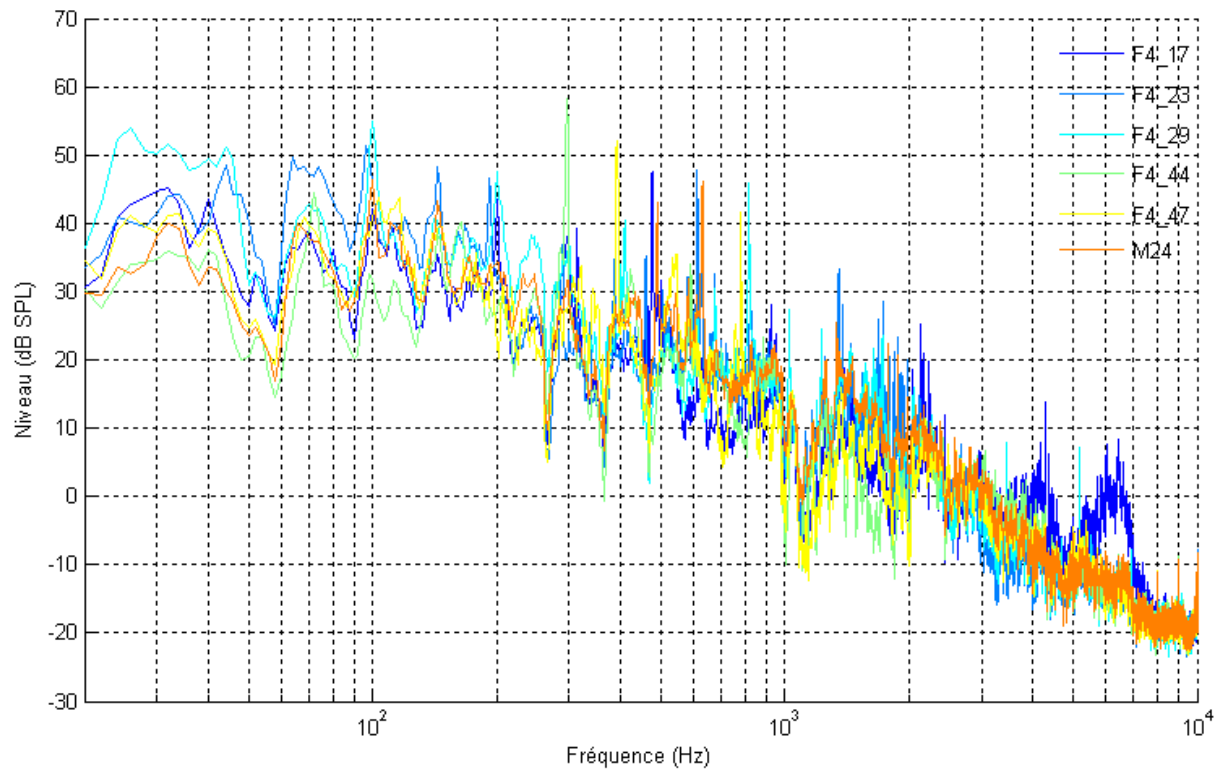
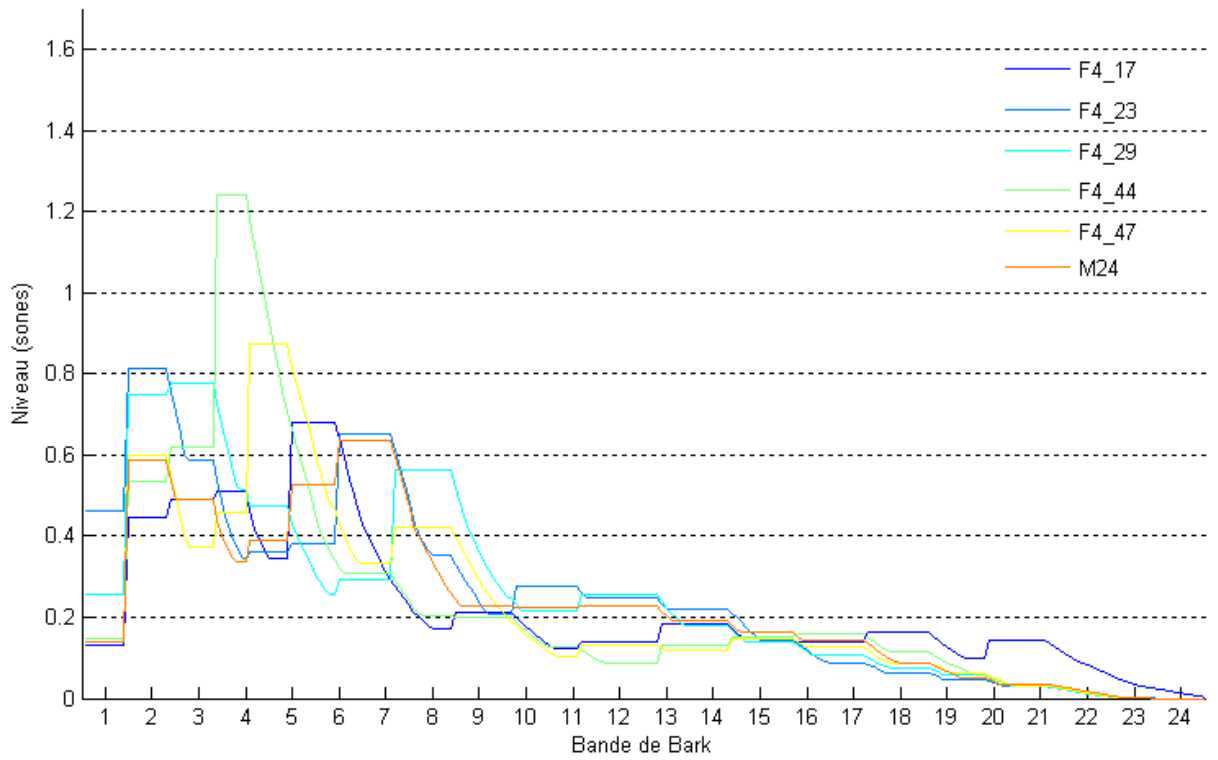
Famille 2 (B)



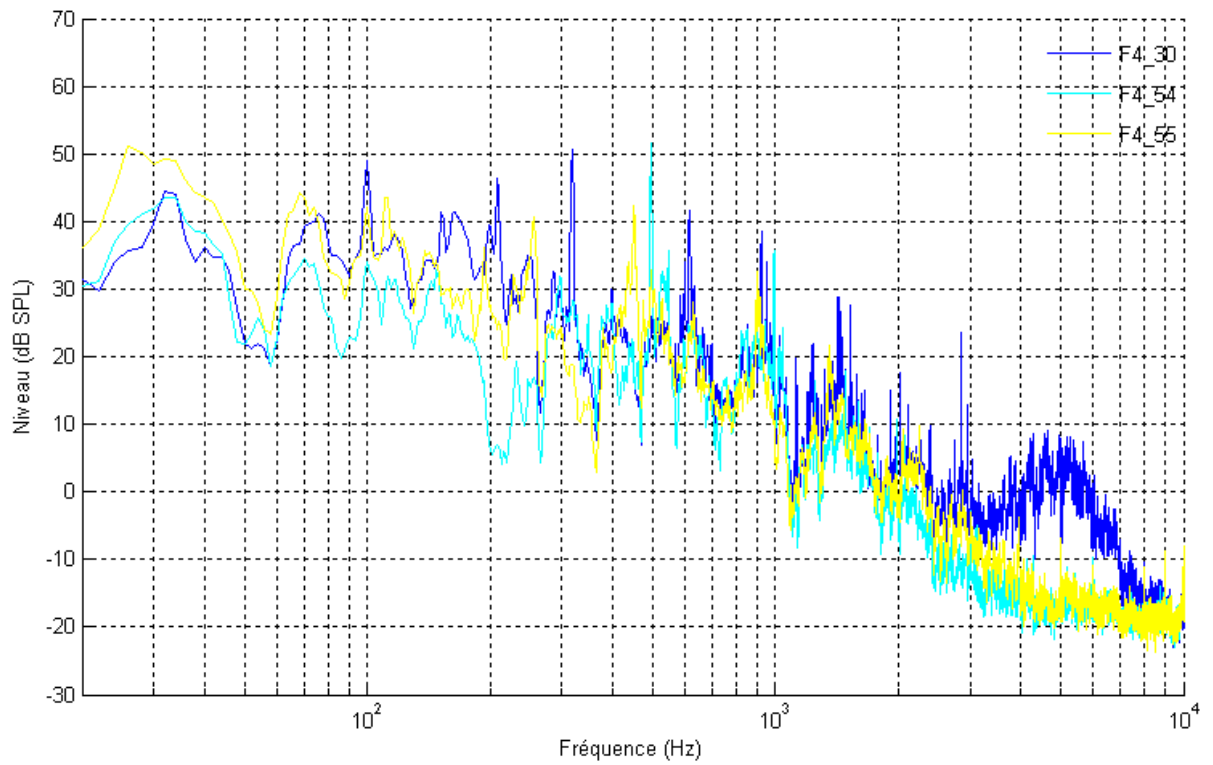
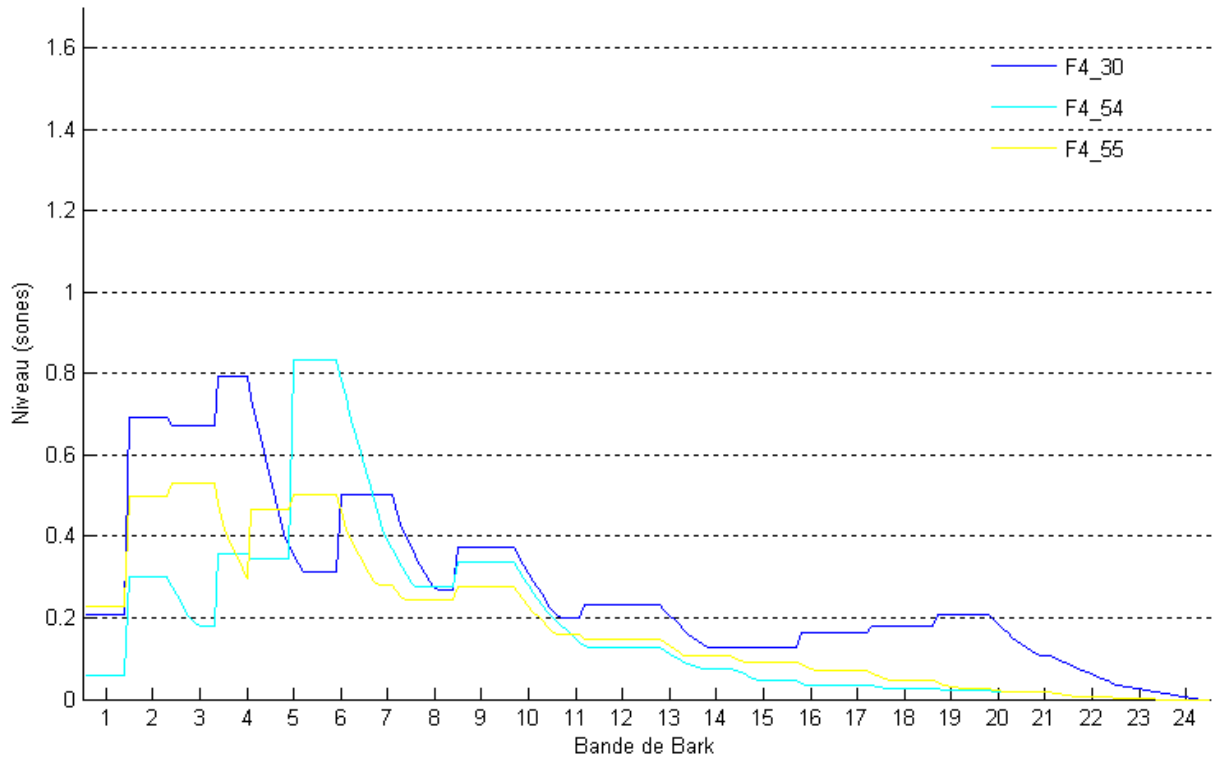
Famille 3 (R, A, B)



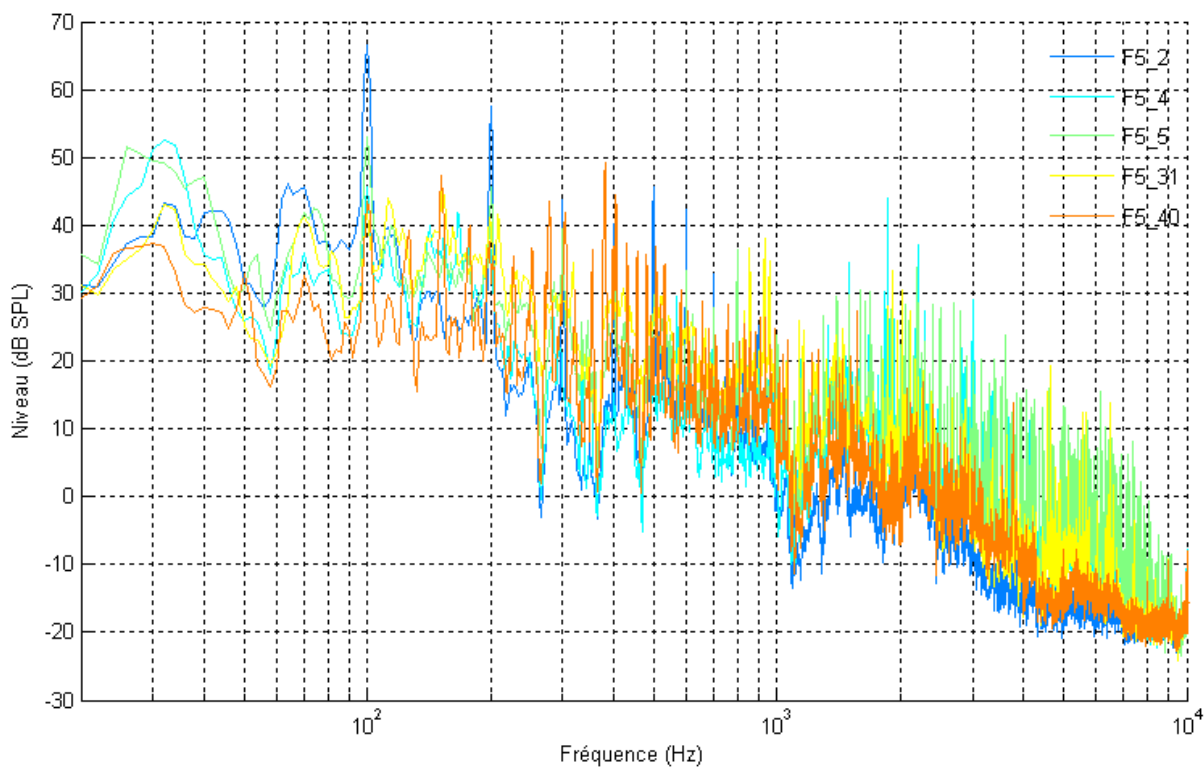
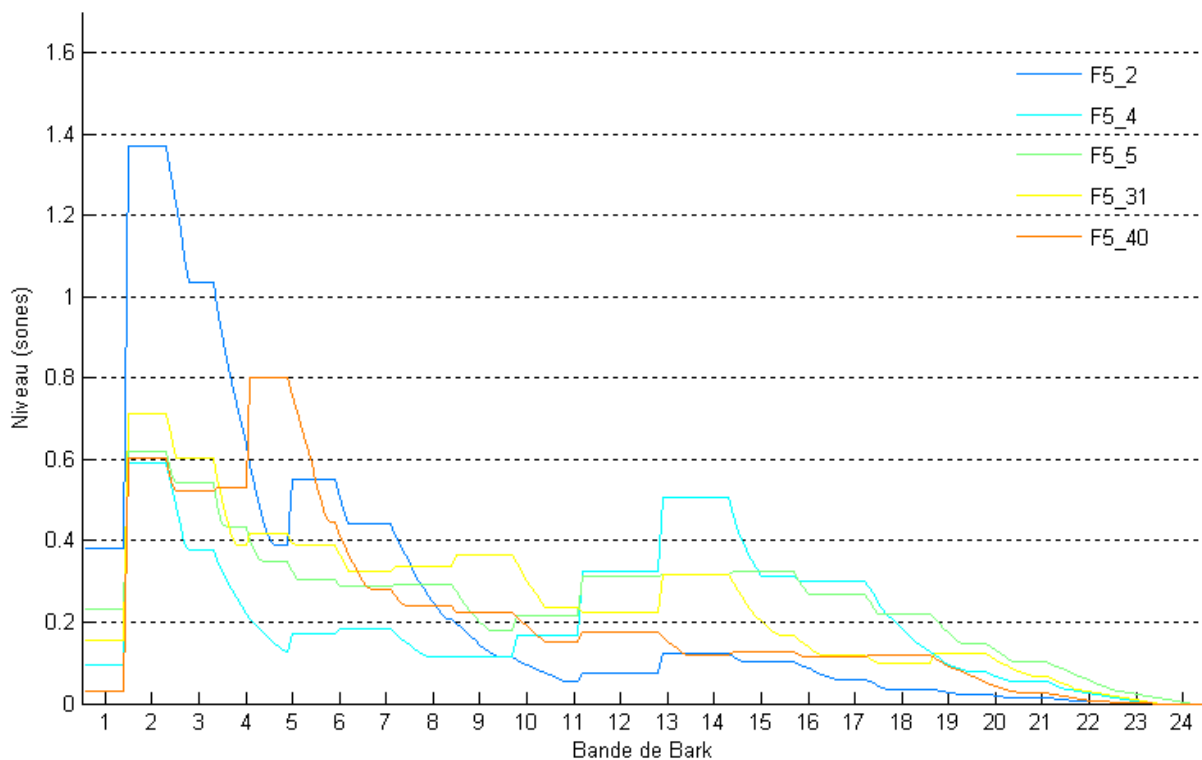
Famille 4 (R, A)



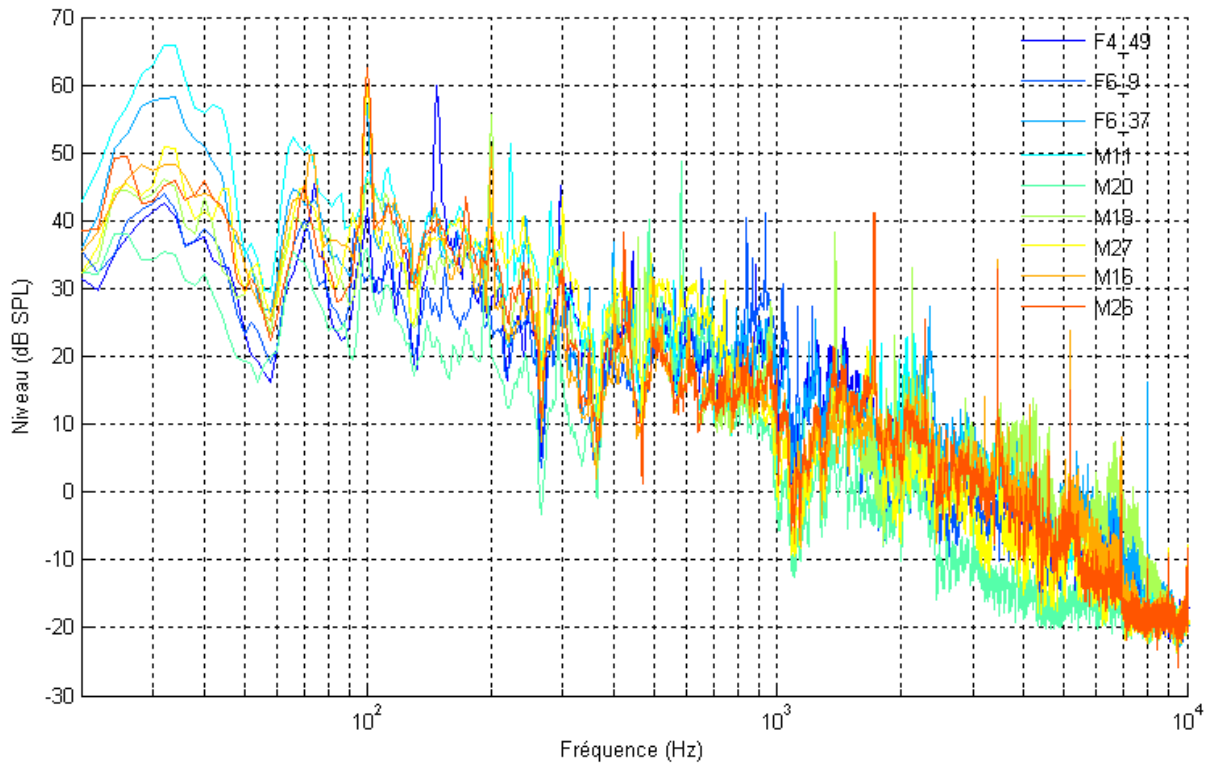
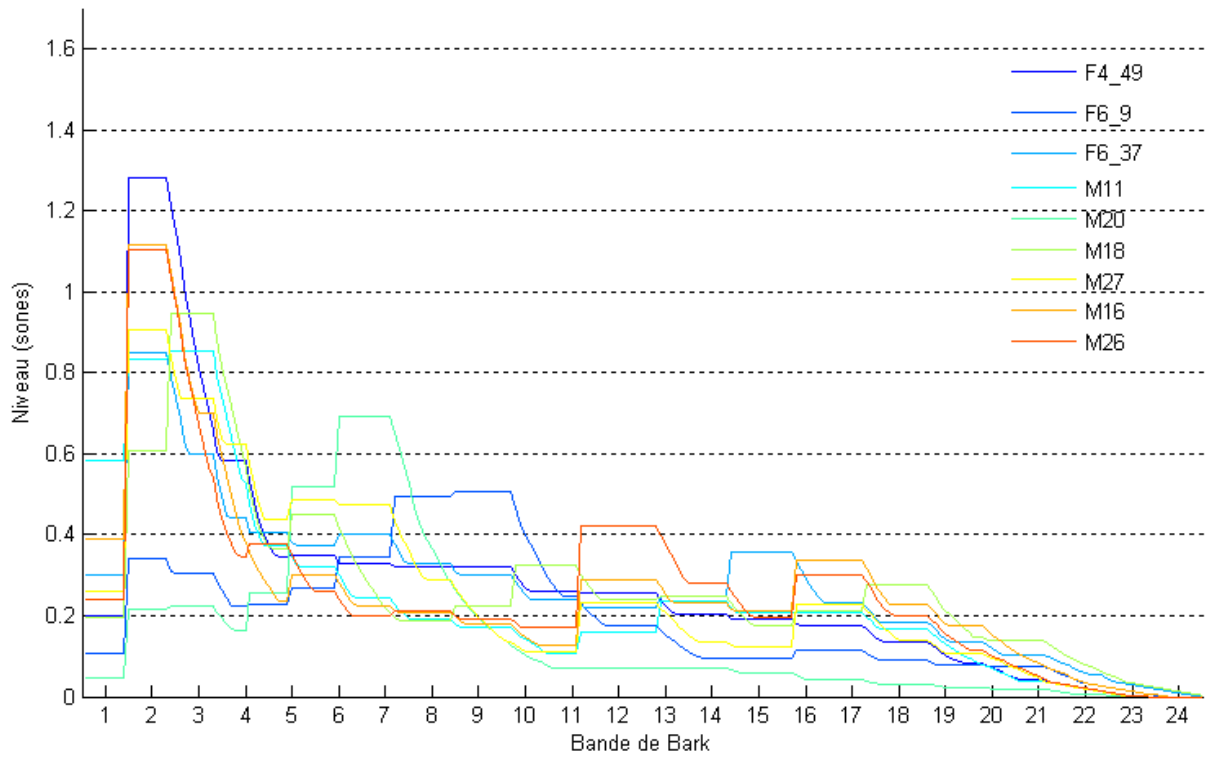
Famille 4 (B)



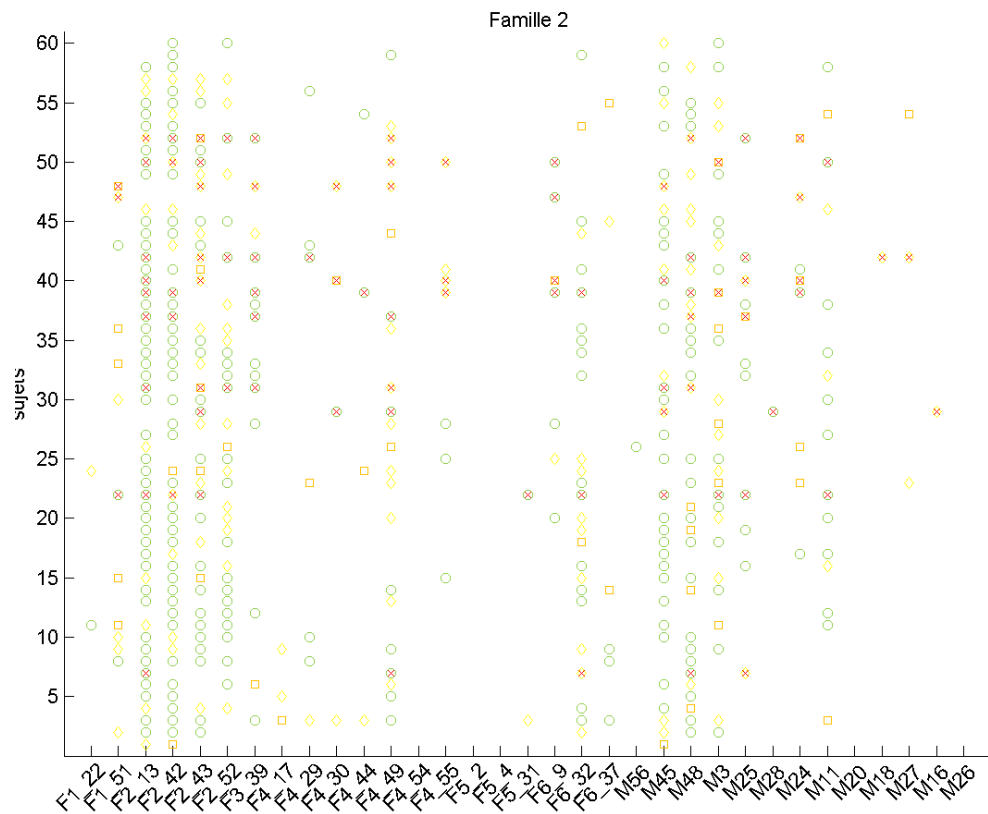
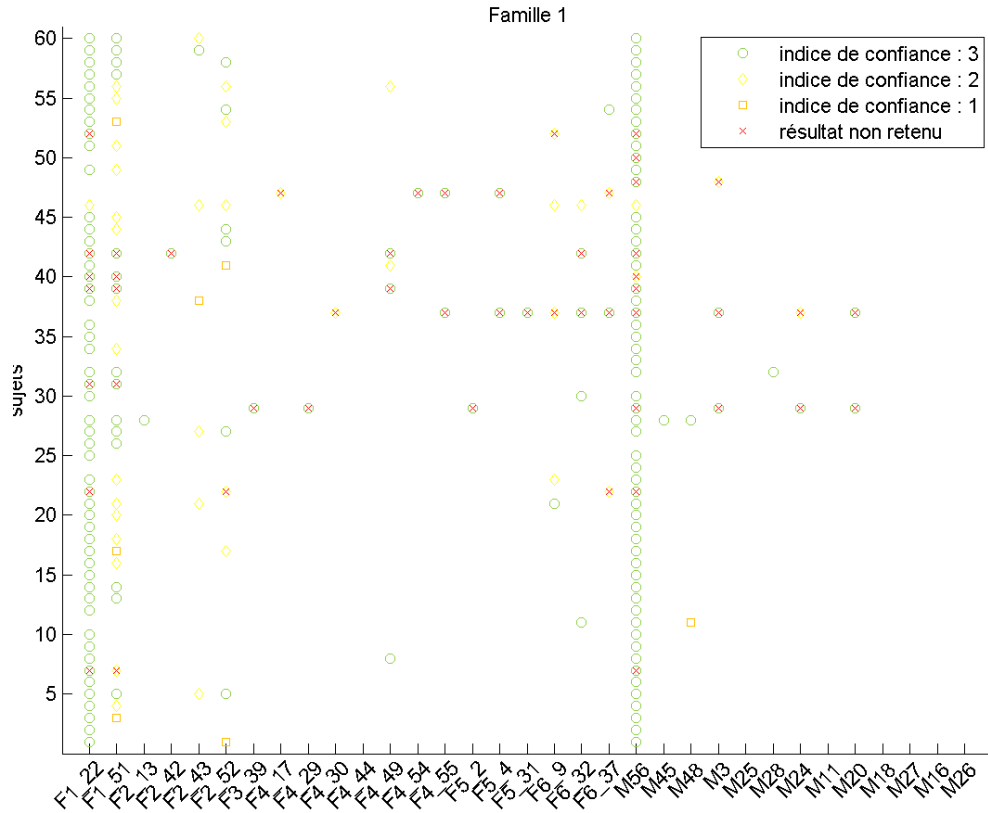
Famille 5 (R, B)



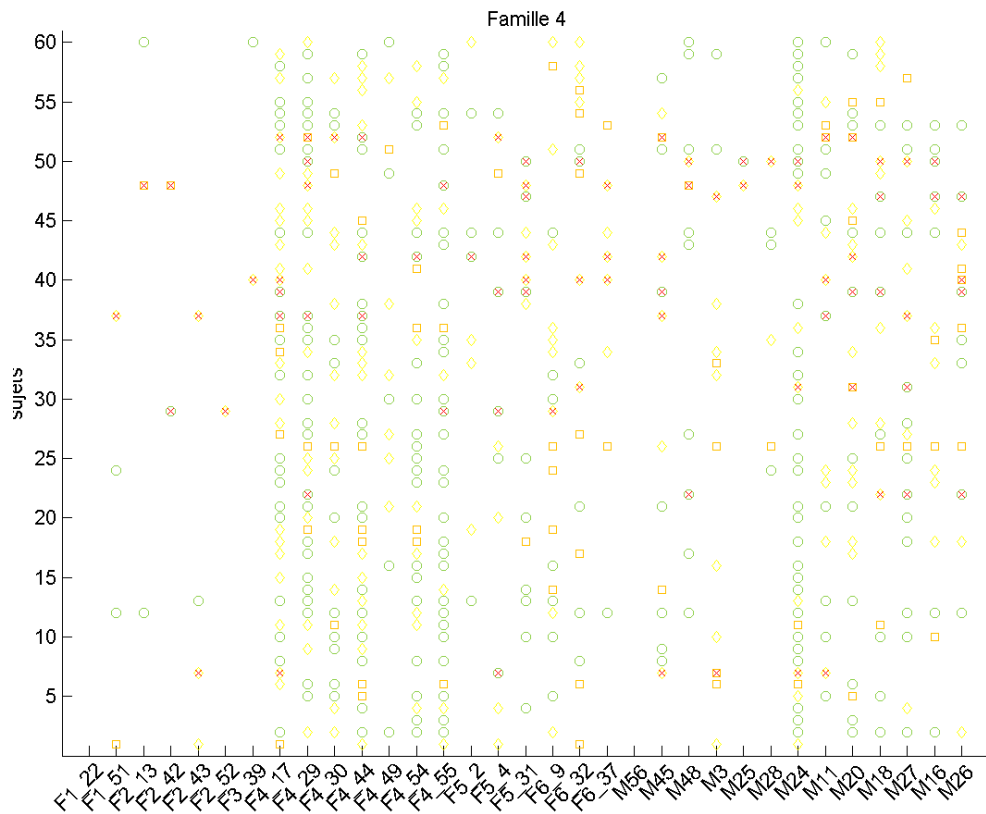
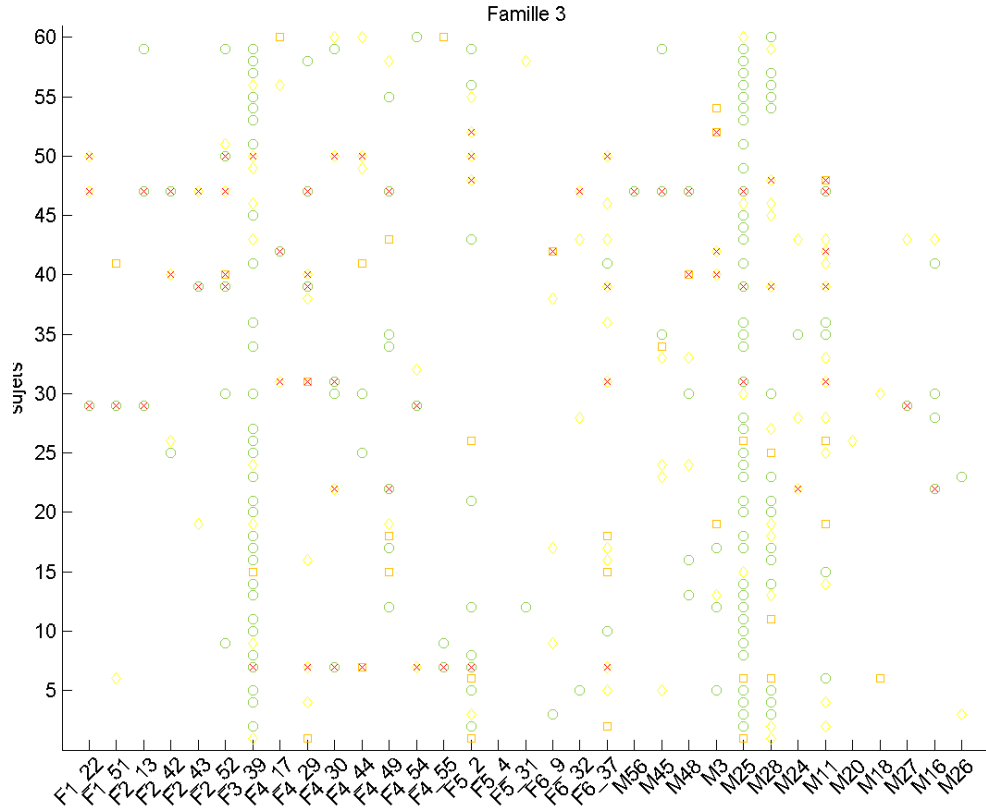
**C**



**ANNEXE H – RESULTATS BRUTS POUR LES 60 SUJETS**

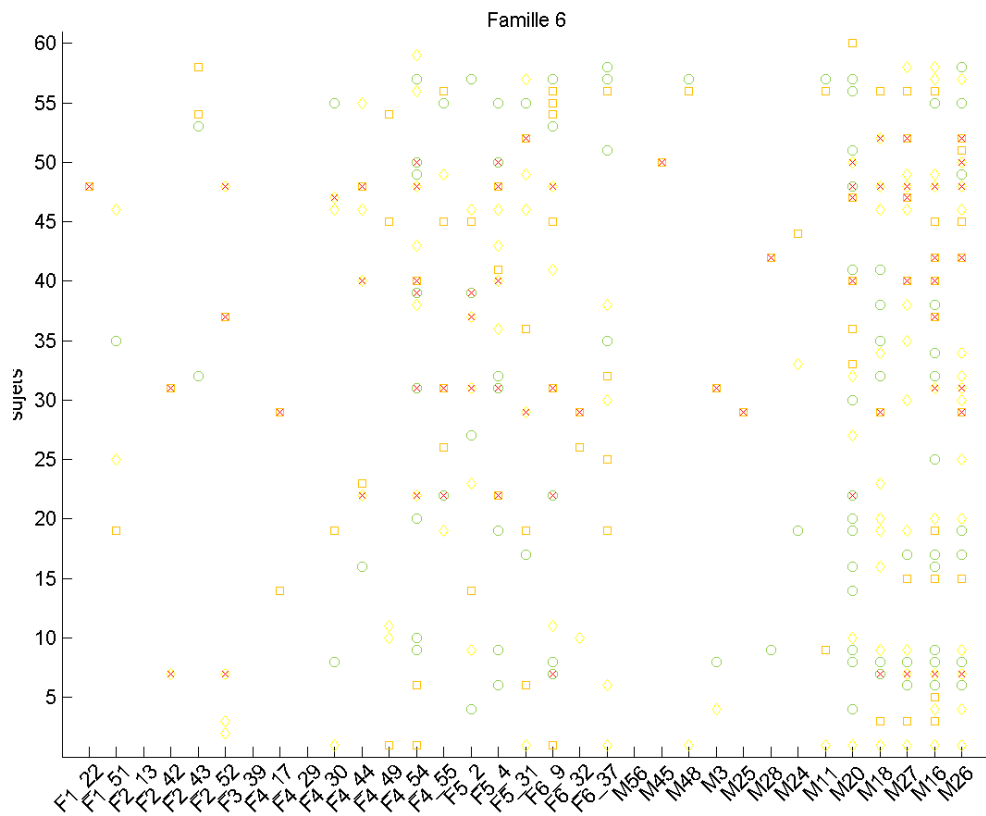
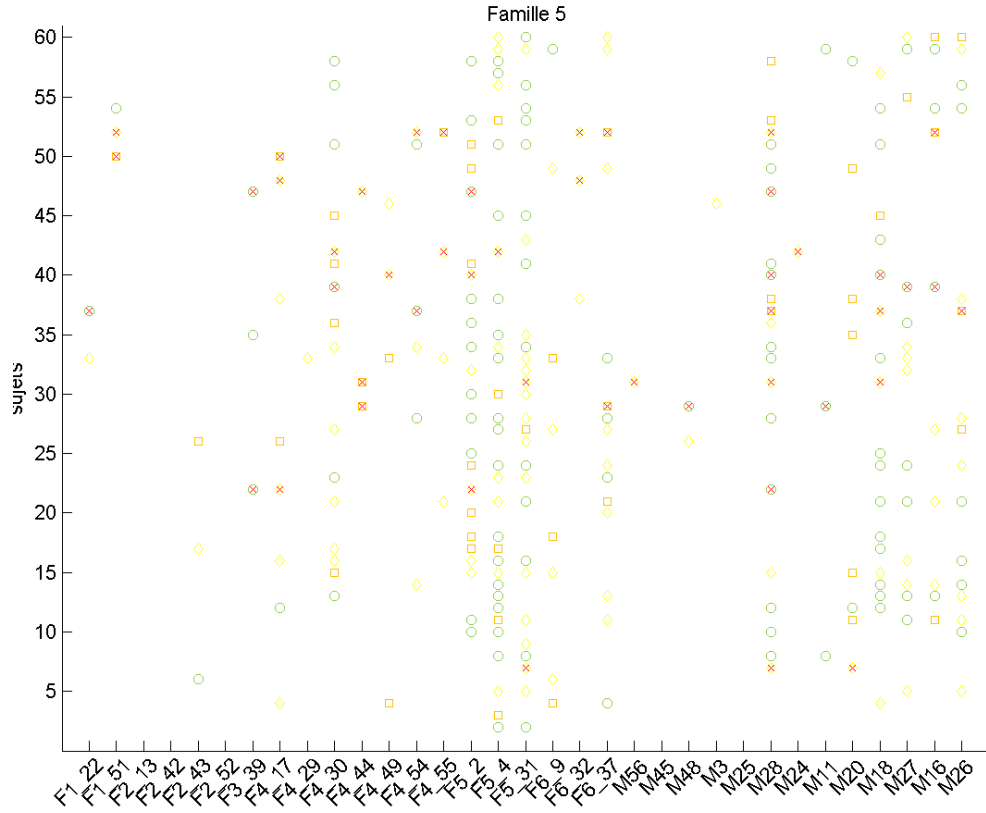


# Annexes





# Annexes



**ANNEXE I – DEFINITION/IDENTITE DES FAMILLES**

Colonne 1 : nombre de sons classés dans la famille

Colonne 2 : degré de définition/identité de la famille tel qu'indiqué dans le questionnaire

Colonne 3 : moyenne arithmétique de l'indice de confiance sur les sons associés à la famille

En rouge : nombre d'associations en dehors de l'intervalle moyenne +/- écart-type sur l'ensemble des sujets

	Famille 1			Famille 2			Famille 3			Famille 4			Famille 5		
S1	3	5	2,3	3	5	1,3	5	2	1,4	9	3	1,7	0	5	
S2	2	5	3	8	5	2,6	6	4	2,3	14	5	2,7	2	5	3
S3	3	5	2,3	16	3	2,4	5	1	2,6	4	3	3	1	3	1
S4	3	5	2,7	7	4	2,3	5	4	2,6	8	5	2,4	5	5	1,8
S5	5	5	2,8	5	3	2,8	8	3	2,8	10	4	2,5	4	4	2
S6	2	1	3	7	3	2,4	6	5	1,5	9	3	1,8	2	5	2,5
S7	3	4	2,7	5	4	2,6	8	4	2,4	7	2	2	3	1	2
S8	3	5	3	8	2	3	3	2	3	7	2	3	4	5	3
S9	2	4	3	10	4	2,6	5	5	2,6	5	4	2,6	1	4	2
S10	2	5	3	8	4	2,8	3	3	3	12	5	2,8	4	2	3
S11	3	2	2,3	9	4	2,4	3	2	2,3	8	3	1,8	8	4	1,9
S12	2	5	3	5	5	3	5	5	3	16	5	2,9	5	5	3
S13	3	5	3	6	4	2,8	5	4	2,6	12	3	2,8	7	5	2,7
S14	3	5	3	9	5	2,6	4	5	2,8	8	5	2,3	6	5	2,5
S15	2	4	3	10	4	2,3	5	3	1,6	5	4	2,6	8	2	1,8
S16	3	4	2,7	8	4	2,8	5	4	2,6	6	4	2,8	7	4	2,4
S17	4	5	2,3	5	5	2,8	7	5	2,7	8	5	2,3	5	5	1,8
S18	3	4	2,7	8	3	2,6	5	1	2	13	4	2,1	4	4	2
S19	2	4	3	7	4	2,4	6	4	1,7	6	2	1,3	0	5	
S20	3	4	2,7	11	4	2,6	3	4	3	9	4	2,8	2	4	1,5
S21	5	4	2,6	5	4	2,4	4	4	3	10	4	2,8	9	5	2,3
S22	4	4	2,5	10	3	2,9	4	4	2,5	5	3	2,8	4	4	2,5
S23	4	5	2,5	11	4	2,2	5	3	2,8	6	4	2,5	4	5	2,5
S24	1	4	3	9	4	1,8	4	4	2,3	12	5	2,5	7	5	2,4
S25	2	2	3	9	3	2,8	6	4	2,5	10	4	2,7	2	5	3
S26	2	4	3	5	4	1,6	6	4	1,7	14	4	1,3	4	4	1,5
S27	5	4	2,8	5	4	2,8	3	3	2,7	11	3	2,5	7	5	1,9
S28	6	5	3	8	4	2,4	5	4	2,4	7	4	2,4	7	5	2,7
S29	7	5	3	6	4	2,7	5	4	3	5	3	2,6	4	3	2
S30	3	5	3	7	4	2,7	9	5	2,8	7	4	2,9	3	5	2
S31	2	4	3	7	4	2,4	6	4	2,2	4	4	2	5	4	1,8
S32	4	4	3	9	3	2,8	1	3	2	9	4	2,4	3	4	2
S33	1	5	3	7	4	2,6	3	4	2	9	3	2,3	11	3	2,2
S34	3	2	2,7	7	5	3	4	5	2,5	9	5	2,1	7	3	2,4
S35	2	5	3	7	5	2,9	5	5	3	11	5	2,5	4	5	2,3
S36	2	5	3	10	4	2,3	4	4	2,8	10	4	1,8	4	4	2,3
S37	11	3	2,7	6	4	2,5	0	3		8	5	2,5	5	3	2
S38	4	5	2,3	8	4	2,8	2	4	2	7	2	2,4	7	5	2
S39	4	3	3	10	5	2,7	7	4	2,6	7	4	3	3	5	3
S40	3	4	2,7	8	4	1,9	5	4	1,6	7	4	1,9	4	4	2,5
S41	4	4	2,3	9	4	2,4	7	2	2,3	5	2	1,6	4	4	2
S42	6	4	3	9	4	2,7	4	3	2	7	3	2,4	4	4	2
S43	3	5	3	7	2	2,7	10	3	2,1	9	1	2,3	2	5	2,5
S44	4	5	2,8	8	5	2,4	1	4	3	19	2	2,7	0	5	
S45	3	5	2,7	9	5	2,8	3	5	2,7	8	5	1,9	4	5	2
S46	6	4	2	5	4	2	4	4	2	7	2	2	2	2	2
S47	5	3	2,6	3	3	2,3	13	4	2,7	5	3	2,8	4	3	2,8
S48	2	4	2,5	6	4	1,8	3	4	1,7	9	4	1,8	2	4	2
S49	3	5	2,7	7	4	2,6	3	4	2,3	9	5	2	5	5	1,8
S50	1	5	3	8	3	2,4	7	3	2,1	10	4	2,6	2	3	1
S51	3	5	2,7	3	5	3	3	5	2,7	14	5	2,8	7	5	2,7
S52	3	5	2,7	9	4	2,2	2	4	1,5	8	5	1,6	7	5	1,6
S53	4	4	2,3	7	3	2,4	2	3	3	14	5	2,5	4	3	2
S54	4	5	3	6	2	2,2	4	2	2,5	11	2	2,7	5	5	3
S55	3	3	2,7	8	5	2,4	5	4	2,8	8	3	2,1	1	5	1
S56	6	5	2,5	5	4	2,6	5	1	2,6	3	1	1,7	4	4	2,8
S57	4	4	2,8	4	4	2	3	4	3	10	3	2,2	2	4	2,5

## Annexes

	Famille 1			Famille 2			Famille 3			Famille 4			Famille 5		
S58	4	4	3	6	4	2,8	5	4	2,6	8	4	2,3	5	4	2,6
S59	4	5	3	3	4	3	8	5	2,9	9	4	2,8	8	4	2,5
S60	4	5	2,8	4	3	2,8	7	3	2	11	3	2,5	6	5	1,8
Moy 48S		4,4	2,8		3,9	2,5		3,6	2,5		3,6	2,4		4,4	2,2

**ANNEXE J – INDICATEURS**

	Leq	LeqA	LeqC	N	ES	EBF	NBF	CGS	CGN	S	Pedersen		Aures		Tonality		TNR		PR		Mod		
											Nr	TA	Nr	T	Max	Freq	Max	Freq	Max	Freq		Max	Freq
F1 22	54,4	48,8	53,8	6,4	5,0	-2,8	12,3	723	0,9	1,3	0	D/N/A	1	38	676	1,4	1048	1,9	1051,5	3,2	2193,5	62,8	
F1 35	50,4	48,4	49,8	5,9	1,4	2,9	5,6	1312	0,3	1,6	1	5,4	100	1	33,9	769	1,1	19344	0,6	516	3,1	2188	58,8
F1 46	56,1	48	54,4	6,3	6,4	-9,6	9,4	773	0,9	1,5	4	11,2	144	1	19,4	822	1,3	19344	1,8	596	3,4	559,5	58,2
F1 51	60,9	48,8	59,3	7	10,5	-14,4	14,7	513	1,5	1,3	4	16,5	1226	2	22,6	772	3,3	1264	2,9	506	9	1300,5	69
F2 13	60,5	49,7	60,1	6,6	10,4	-9,3	20,3	373	1,8	0,8	3	10,1	422	1	15,4	667	1,9	420	5,2	421,5	4,5	888,5	73,6
F2 14	66,3	49,8	64,6	6,8	14,8	-16,1	20,5	222	2,1	0,8	0	D/N/A		1	0	0	1	1036	0,6	248,5	2,9	898	75,3
F2 33	63,7	51,1	63,2	6,7	12,1	-11,2	21,1	271	1,8	0,7	1	3,7	1030	3	14,9	408	2,6	528	3,8	525,5	4,3	573	75,4
F2 42	70,8	50,1	68,1	6	18,0	-17,5	21,0	154	2,7	0,7	2	5,2	100	1	7,9	411	1,2	400	1,6	398,5	3,3	2211	72,7
F2 43	81	49	60,3	6,6	11,3	-11,4	18,8	370	1,5	1	8	9,4	110	1	31,1	722	1,3	5256	2	5155	2,7	1444,5	72
F2 52	68,1	51,5	67,5	6,4	16,0	-25,5	22,8	211	5,4	0,8	2	9,6	142	1	25,2	120	0,9	1036	0,6	423	6,7	137,5	80,5
F3 15	69,4	52,2	69,1	6,9	16,9	-22,2	22,2	250	3	0,7	8	26,1	100	4	29,8	100	8,5	100	37,6	100	79,9	150,5	77,8
F3 39	67	50,3	66,4	6,7	16,1	-16,7	21,9	219	3	0,8	7	20,2	100	2	15,4	543	3,9	300	14,3	300	4,2	100	77,2
F3 53	67	50,8	66,2	7,4	15,4	-16	20,9	248	2,1	0,8	7	13,4	100	2	24,4	770	3,8	300	7,9	300	2,9	2192,5	75,7
F4 17	56,1	47,8	55,3	5,4	7,5	-3,3	16,4	476	1,5	1,1	14	15,7	462	6	32,9	478	4,4	476	65,1	477	39,1	488,5	64,1
F4 23	60,9	50,2	60,3	6,2	10,1	-9,1	15,0	332	1,2	0,8	27	17	614	5	22,9	422	5,1	612	32,4	614	11,6	612	69,9
F4 29	62,6	50,2	61,2	6,1	11,0	-11,4	17,3	280	1,8	0,8	7	20,2	300	5	32,6	1476	4,4	816	9,2	818	19,2	881	70,7
F4 30	58,1	49,9	57,8	6,6	7,9	-3,6	17,9	487	1,8	1	19	20,3	318	6	24,6	317	6,4	316	38,8	317,5	10,9	963,5	68,6
F4 44	59,4	51,9	59,3	5,8	7,4	5,8	19,0	444	3	0,8	3	26,8	296	5	45,2	296	16,3	296	143	296	49,1	336	65,4
F4 47	57,5	50,3	57,1	5,5	6,8	-0,4	16,9	409	1,2	0,8	4	22,1	392	4	32,3	391	5,8	392	43,5	391,5	21,1	347,5	65,1
F4 49	61,2	49,8	60,9	6,7	11,1	-11	21,7	426	2,1	0,8	3	28,8	148	3	17,3	148	6,6	148	35,3	148	17,4	119,5	67,8
F4 54	55,2	50,3	54,6	4,3	4,3	3	10,0	478	0,6	0,8	9	27,3	496	2	18,8	497	7,2	496	16,7	496,5	41,3	549	65,1
F4 55	58,6	46,5	56,9	4,6	10,4	-9,6	17,7	302	1,5	0,7	2	6,5	450	2	15,7	912	2,4	900	3	450	13	911,5	64,7
F5 2	67,5	51,8	67,2	6,2	15,4	-17,4	21,8	228	2,7	0,5	16	34,1	300	10	48,3	100	14,5	300	157	200	25,2	149,5	79,1
F5 4	58	48,2	56,1	5,1	7,9	-19,4	10,9	552	2,1	1,2	50	24,3	1884	8	26,5	537	12,6	1860	74,9	1860	10,9	1727	64,7
F5 5	59,7	47,7	58,2	6,2	10,5	-12,6	15,7	451	1,8	1,1	87	14,3	2602	23	31,2	647	3	800	6,7	800,5	4,7	863	67,9
F5 31	56,6	48,4	56,2	6	7,8	-6,9	16,9	504	1,5	1	41	17,6	1864	10	44,4	621	3,9	1916	6,5	1916	11,5	889	69,2
F5 40	56	49,1	55,7	5,2	6,6	0,5	18,9	475	1,8	0,8	54	28,9	404	5	51,4	200	7,7	380	30,4	379,5	5,2	357,5	69,2
F6 9	54	49,3	53	4,7	3,7	-1,7	7,9	567	0,6	1	6	6,6	934	3	10,5	935	2	1028	1,8	1215,5	9,3	904,5	63,9
F6 32	56,3	51,6	56	5,8	4,4	2,3	11,7	543	0,9	0,9	6	7,4	518	2	12,4	517	3,7	520	2,1	519	18,9	547	67,6
F6 37	65,1	49	63,2	6,8	14,2	-16	17,3	314	1,5	1,1	7	15,7	100	3	41,1	721	3,3	8016	6	298	7,4	2252	70,6
M56	56,4	49,1	56	6,1	5,9	-5,1	10,1	613	0,6	1,2	0	D/N/A		1	33,8	728	1	1036	0,6	1037	3,3	1461	63,6
M45	59,3	49,2	58,4	5,5	9,2	-7,5	17,7	327	1,5	0,7	1	7,2	248	2	47,4	764	2	248	3,5	248,5	3,7	491,5	68,5
M48	59,3	49,9	58,5	6	8,6	-6,3	16,6	364	1,5	0,8	0	D/N/A		1	9,5	301	1,2	19252	1,8	320	5	877	68,8
M3	56,2	48,6	56	4,7	7,4	2,6	18,5	463	3	0,9	2	10,7	100	2	24,9	312	1,3	1052	1,4	500	10,4	337,5	70,6
M25	68,8	51,3	68,5	7,1	17,2	-21,8	22,1	267	2,7	0,8	2	26,5	100	3	42,1	773	5,3	100	21,5	100	30,9	144,5	75,7
M28	63,6	50,9	63,3	7,3	12,4	-14,4	20,8	393	2,7	1	12	24	418	10	64	3381	7,1	200	42,7	200	15	150,5	74,2
M24	56,1	49,7	55,8	5,6	6,1	-2,6	13,7	492	0,9	0,9	3	14	632	3	21,8	631	4,4	632	8,4	631	7,4	671,5	64,9
M11	70,6	48,2	68,2	6	20,0	-22,9	20,8	165	3	0,8	11	7,4	280	3	10,1	226	1,7	224	6	223,5	4,4	2184	72,9
M20	53	49,1	52,5	3,6	3,4	4,7	7,6	536	0,6	0,8	7	15,6	292	2	27	583	4,2	584	23,6	582,5	24,1	541	65,3
M18	59,6	49,5	59,1	6,7	9,6	-10,8	19,0	477	2,7	1,1	22	22,7	200	4	22,2	1384	5,3	1384	15,8	1382,5	50,7	1436	71,8
M27	62,5	49,6	61,9	6,2	12,3	-10,9	19,7	311	1,8	0,8	7	18,9	100	3	38,7	723	7,9	3448	30,3	3448,5	34,2	3699,5	71,2
M16	64,4	48,3	63,9	6,6	15,6	-21,5	19,8	334	2,7	1	9	26,3	200	5	29,7	99	4,2	3448	8,9	3449,5	11,8	3664	73,9
M26	63,8	49,1	63,3	6,5	14,2	-19	18,3	354	2,4	1	10	15	422	7	50,7	770	5,3	1724	15,6	1725	18,3	1623	72,3

**Leq** : niveau équivalent avec les pondération L (linéaire), A et C (dBSPL)

**N** : sonie totale (Zwicker, soneGF)

**ES** : équilibre spectral ; ES = LeqC – LeqA.

**EBF** : équilibre basse fréquence (1/3 d'octaves) différence entre l'énergie dans les bandes [280 1403]Hz et [22 280]Hz à partir du spectre 1/3 d'octaves (fréquences centrales de 315 à 1250 Hz et de 25 à 250Hz)

**NBF** : équilibre/énergie basse fréquence (sonie) somme des sonies partielles par dixième de Bark dans l'intervalle [1 5]Bark

**Centre de gravité spectraux**

$$CGS = \frac{\sum_{i=1}^N A_i f_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

*i* indice de bande, *A* amplitude de la bande, *f* « fréquence » (Hz ou Bark) centrale de la bande

**CGS** : à partir du spectre tiers d'octave (Hz)

**CGN** : à partir du spectre de sonie (Bark)

**S** : acuité (acum)

**Tonalités** (calcul de Pedresen et Aures via MATLAB et Tonality, TNR, PR avec PAK) :

**Nr** : nombre de raies

**TAT/Max** : indicateur de tonalité

**Freq.** : fréquence du maximum de l'indicateur (Hz)

**Mod** : indicateur de modulation calcul du spectre de l'enveloppe du signal filtré (100 -10000Hz), puis sommation de l'énergie de ce spectre entre 10 et 100Hz

### ANNEXE K – SYNTHÈSE DES RESULTATS DE M. ALAYRAC, EXPOSITION « MONO-SOURCE »

Famille	N° des sources	Types fonctionnels	Caractéristiques spectrales communes aux sources	Paramètres acoustiques ayant influencé la gêne	Indicateurs de gêne proposés
1	22 35 46 51	EAU-chute	Bruits à large bande (sans caractéristique spectrale particulière)	Niveau sonore	$L_{Aeq}$ ( $r^2=0,96$ ; $p<0,001$ ) $L_N$ ( $r^2=0,96$ ; $p<0,001$ )
2	33 42 43 52 13 14	GAZ COMBUSTION SDM	Bruits basses fréquences Quelques raies spectrales en moyennes fréquences	Niveau sonore	$L_{Aeq}$ ( $r^2=0,99$ ; $p<0,001$ ) $L_N$ ( $r^2=0,98$ ; $p<0,001$ )
3	15 39 53	ELEC	Bruits basses fréquences Raie spectrale principale à 100 Hz	Niveau sonore <i>Niveau de la raie spectrale à 100 Hz</i> Niveau du reste du spectre	$L_N$ ( $r^2=0,97$ ; $p<0,001$ ) $I_{A,1/3oct,100Hz}$ ( $r^2=0,96$ ; $p<0,001$ ) $L_n(I_{spec})$ ( $r^2=0,98$ ; $p<0,001$ )
4	17 30 49 23 44 47 54 55 29	EAU-pompe GAZ SDM	Plusieurs raies spectrales entre 100 et 1000 Hz Répartition entre les basses et les moyennes fréquences	Niveau sonore Nombre de raies spectrales Répartition entre les basses et les moyennes fréquences	$L_{Aeq}$ ( $r^2=0,97$ ; $p<0,001$ ) $L_N$ ( $r^2=0,97$ ; $p<0,001$ ) $L_{Aeq}$ ; $NR$ ; ( $N_{4-9Barks}-N_{2-3Barks}$ ) ( $R^2=0,98$ ; $p<0,001$ )
5	2 4 5 31 40	ELEC COMBUSTION SDM	Nombre important de raies spectrales entre 100 Hz et 10 kHz Répartition entre les basses et les moyennes fréquences	Niveau sonore Nombre de raies spectrales Répartition entre les basses et les moyennes fréquences	$L_{Aeq}$ ( $r^2=0,98$ ; $p<0,001$ ) $L_N$ ( $r^2=0,98$ ; $p<0,001$ ) $L_{Aeq}$ ; $NR$ ; ( $N_{4-9Barks}-N_{2-3Barks}$ ) ( $R^2=0,99$ ; $p<0,001$ )
6	9 32 37	GAZ SDM	Pas de caractéristique spectrale commune	Niveau sonore	$L_{Aeq}$ ( $r^2=0,93$ ; $p<0,001$ ) $L_N$ ( $r^2=0,96$ ; $p<0,001$ )

Tableau synthétique des résultats obtenus à l'issue des tests en laboratoire menés sur les six familles dans une situation d'exposition « mono-source » (issu de [Alayrac 2009])

$$I_{A,1/3oct100Hz} = 10 \times \log_{10} \left( 10^{0,1 \times L_{A,eq} - 10} \cdot 10^{0,1 \times L_{A,100Hz}} \right) \text{ dB(A)}$$

$$I_{spec} = N - N_2 \text{ Barks} \quad (\text{sones})$$

$N_{ij}$  Barks somme de sonie partielles des bandes i à j