# Sonie de sons variant au cours du temps Asymétrie entre crescendo et décrescendo

## Rapport de stage

Paul Paindavoine

Travail réalisé en 2010 sous la direction
de Sabine Meunier et Patrick Susini

# Table des matières

**Table des matières** 3

**Remerciements** 4

**Introduction** 5

**1 Etat de l'art** 6
- 1.1 La sonie . . . 6
- 1.2 Contexte général . . . 7
- 1.3 Méthodes . . . 8
- 1.4 Résultats . . . 12

**2 Hypothèses et procédure** 19
- 2.1 Hypothèses . . . 19
- 2.2 Protocole expérimental . . . 19

**3 Résultats** 23
- 3.1 Normalisation des résultats . . . 23
- 3.2 Vérification de la cohérence des réponses . . . 23
- 3.3 Fonction de sonie . . . 25
- 3.4 Effet de la durée . . . 26

**4 Modélisation** 30
- 4.1 présentation du modèle . . . 30
- 4.2 Résultats obtenus . . . 32

**Conclusion** 35

**Bibliographie** 36

**ANNEXES** 38

**A Implémentation des tests** 39
- A.1 Prise en main . . . 39
- A.2 Développement et adaptation . . . 39

A.3 Mise au point et résolution des problèmes . . . . . 41

**B Table ANOVA** **43**

# Remerciements

Je tiens à remercier vivement mes encadrants de stage Sabine Meunier et Patrick Susini pour leur disponibilité, leur écoute et leurs conseils avisés.

Mes remerciements vont aussi à toute l'équipe PA du LMA pour avoir su m'accueillir dans un environnement de travail stimulant, tout en étant agréable et même amusant.

Plus particulièrement je remercie Jacques Chatron et Guy Rabau pour leur aide précieuse lors de la phase de montage des tests. Je remercie aussi Françoise Dubois et Pierre-Yohann Michaud pour m'avoir accompagné au début de mon stage. Je remercie Michèle Laurent pour son aide dans mes démarches administratives et Sophie Savel pour ses conseils sur l'utilisation du logiciel Statistica.

Enfin je souhaite remercier Georges Canévet d'avoir pris le temps de me montrer le fonctionnement de ses programmes Delphi, développés bien avant mon arrivée au LMA.

# Introduction

Ce document constitue le rapport de mon stage de fin d'études que j'effectue dans l'équipe de psychoacoustique (PA) au laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) à Marseille sous la direction conjointe de Sabine Meunier (chargée de recherche au LMA dans l'équipe PA) et Patrick Susini (chargé de recherche à l'IRCAM dans l'équipe PDS).

Ce stage porte sur l'étude de la sonie des sons dont l'intensité varie au cours du temps en notamment l'effet de la durée de rampe sur l'asymétrie entre crescendo et décrescendo. En effet, comme nous le verrons au début de ce document, les sons dont l'intensité varie linéairement au cours du temps ont déjà été étudiés, mais le nombre de paramètres constituant ce type de sons étant tellement important, il n'est pas possible de tout étudier en une seule fois. Ainsi, l'effet de la durée sur la perception de ce type de son n'a que très peu été étudié.

Après avoir effectué un état de l'art sur le sujet, nous proposerons une présentation de l'étude qui a été menée pendant ce stage, puis nous verrons quels ont été les résultats obtenus. Enfin nous présenterons un modèle permettant d'estimer la sonie des sons purs à 1 kHz dont l'intensité augmente linéairement en fonction du temps.

# Chapitre 1

# Etat de l'art

## 1.1 La sonie

La sonie peut être définie comme la mesure de la sensation d'intensité sonore, c'est donc l'équivalent sensoriel de l'intensité physique d'un son. Les unités de mesure de la sonie sont le phone ou le sone. 1 sone est par définition la sonie d'un son pur à 1kHz et à 40dB.

La sonie d'un son stationnaire de "longue durée" ($> 200ms$ ou $> 500ms$ selon les auteurs) est connue. La sonie de ce type de son a été modélisée en 1957 par S. S. Stevens qui a établi la relation qui donne la sonie en fonction de l'intensité. Cette loi porte le nom de "fonction de sonie". Elle s'écrit :

$$S = \alpha.I^{0.3} = k.P^{0.6}$$

Avec :
- S la sonie en sones,
- I l'intensité sonore,
- P la pression acoustique,
- $\alpha$ et k des constantes.

On peut remarquer que la sonie est multipliée par 2 lorsque le son augmente de 10 dB. Ainsi, un son pur à 1kHz et à 50dB aura une sonie de 2 sones.

La sonie dépend aussi de la fréquence. La relation donnée ci-dessus n'est valable que pour un son pur à 1kHz, mais nous pouvons l'adapter en modifiant le coeffeicient k en fonction de la fréquence. Pour les sons plus complexes (bande de bruit,...) il y a sommation de sonie à partir du moment où la largeur de bande dépasse celle de la bande critique du filtre auditif.

L'effet de la durée sur la sonie a été étudié dès le début des années 1960 et il a été montré que pour des sons dont la durée varie de quelques millisecondes à 70ms ou 200ms selon les auteurs la sonie augmente régulièrement jusqu'à atteindre une valeur constante. Pour des sons de durée plus longue il apparaît un phénomène d'adaptation de sonie, le lecteur pourra se référer à la thèse de S. Meunier pour de plus amples informations.

La sonie des sons dont l'intensité varie au cours du temps n'est pas encore bien connue et nous verrons dans la suite de ce chapitre que plusieurs auteurs se sont penchés sur la question et ont proposé différents modèles pour déterminer la sonie de ce type de sons.

## 1.2 Contexte général

Lorsqu'une moto passe dans la rue, le piéton l'entend s'approcher puis s'éloigner, il entend donc un crescendo puis un décrescendo. A l'heure actuelle il n'existe pas de modèle de calcul de sonie de ce type de son, néanmoins plusieurs études concernant les sons dont l'intensité varie au cours du temps ont été publiées. On peut se poser plusieurs questions sur ce type de son, en voici en liste non exhaustive :

- Quelle est la dynamique de variation ressentie ?
- Quelle est la durée du son perçue ?
- Quelle est la sonie globale ?
- Peut-on relier la perception de ce type de son à des caractéristiques physiologiques ou à des effets cognitifs ?

La sonie des sons évolutifs a été étudiée sur plusieurs types de sons et avec différentes caractéristiques :

- Sons purs, voyelles synthétiques, bruits blancs,...
- Dynamiques de 15dB, 30dB,...
- Plages de variations de 50dB à 75dB, de 60dB à 90dB,...
- Durées de 1.8s, 2s, 10s,...
- Sens de variation (croissant ou décroissant).

Il est donc impossible dans une même étude de faire varier tous ces paramètres. De plus les auteurs n'ont pas forcément utilisé les mêmes méthodes et ne se sont pas forcément posés les mêmes questions (durée perçue, sonie globale,...).

Ici nous ferons donc un tour d'horizon des travaux qui ont été effectués sur la sonie des sons variant au cours du temps de façon linéaire (rampe croissante ou décroissante linéairement).

## 1.3 Méthodes

Un des objectifs du stage de R. Trapeau en 2009 (qui a donné lieu à un article, voir [14]) était de déterminer ce qui est mesuré par les différentes méthodes utilisées par les auteurs.

On dénombre principalement trois méthodes :

- Jugement direct de la variation de sonie,
- Jugement indirect de la variation sonie,
- Jugement direct de la sonie globale.

Ces méthodes sont décrites ci-après.

### 1.3.1 Jugement direct de la variation de sonie

En 1998, J. G. Neuhoff a publié une étude [7] qui utilisait cette méthode. Elle consiste en un jugement direct de la variation de sonie, c'est-à-dire qu'il était présenté à l'auditeur un son (variant au cours du temps), puis sa tâche était d'effectuer une estimation de la variation d'intensité sonore *via* un curseur sans échelle, sur lequel était inscrit « no change »à l'extrémité gauche et « large change »à l'extrémité droite.

Plusieurs auteurs ont depuis repris cette méthode, et notamment P. Susini & al. en 2007 (voir [13]), D. R. Bach & al. en 2009 (voir [2]) ou encore K. N. Olsen en 2009 (voir [9]).

R. Trapeau a montré pendant son stage que ce type de méthode n'aboutit pas forcément au but recherché : les auteurs (notamment J. G. Neuhoff) pensent mesurer effectivement la variation de sonie perçue alors que leurs résultats sont fortement influencés par les niveaux de fin des signaux pour les rampes croissantes.

Pour les rampes croissantes, on constate un faible effet de la dynamique et une forte influence du niveau de fin du signal, tandis que pour les rampes décroissantes l'effet de la dynamique est important et le niveau de début influence aussi les résultats (mais dans une moindre mesure que pour les rampes croissantes). Ces observations sont conformes à ce qui a été trouvé par R. & M. Teghtsoonian & al. (voir [15]) en 2005.

La figure 1.3.1 montre les résultats obtenus par R. Trapeau par la mesure directe de la variation de sonie.

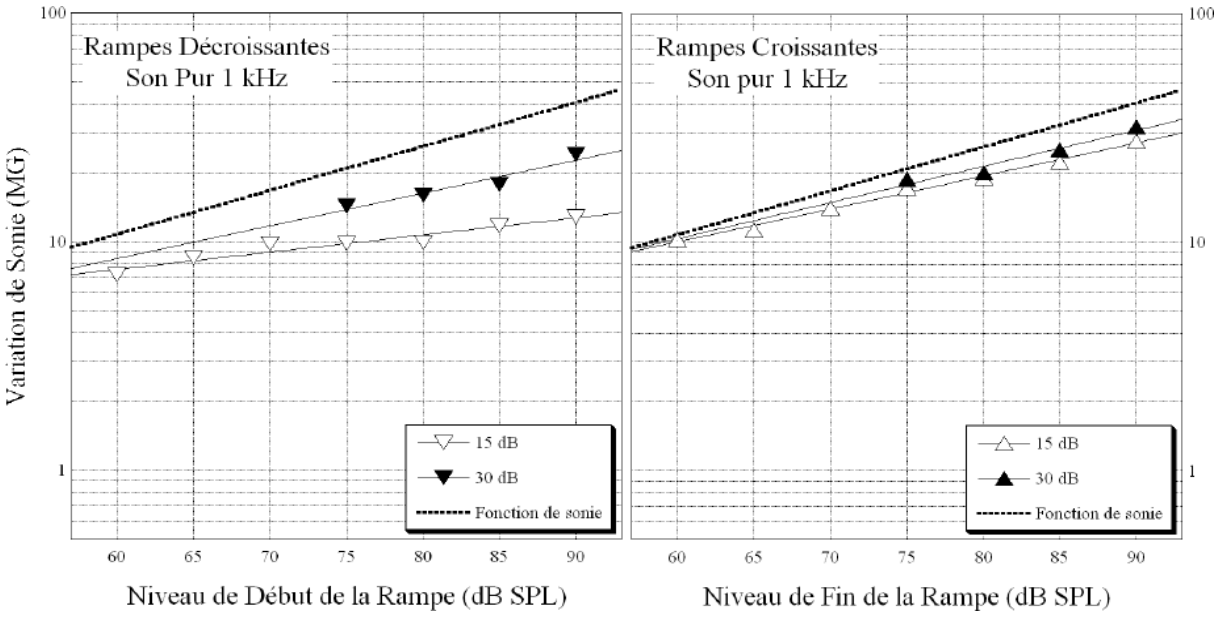


FIGURE 1.1 – *Résultats obtenus par R. Trapeau pour un son pur à 1kHz sur un jugement direct de variation de sonie. Comparaison du jugement direct de la variation de sonie avec la fonction de sonie de l'auditeur. Les jugements de variation des crescendos sont fortement influencés par le niveau de fin du signal, ceux des décrescendos par le niveau de début mais dans une moindre mesure.*

### 1.3.2 Jugement indirect de la variation sonie

C'est G. Canévet qui en 2003 (voir [3]) a utilisé cette méthode pour la première fois (au moins dans les articles constituant cette bibliographie). Elle consiste à présenter à l'auditeur un son stationnaire de même niveau que celui du début du son. Il demande alors au sujet d'estimer la sonie de ce son puis la rampe (croissante ou décroissante) est émise (avec un plateau à la fin). Enfin, il est demandé à l'auditeur d'estimer la sonie finale. La variation d'intensité sonore perçue est alors déterminée en effectuant le ratio entre sonie de début et sonie de fin. La figure 1.3.2 montre un exemple de son présenté au sujet lors de l'expérience.

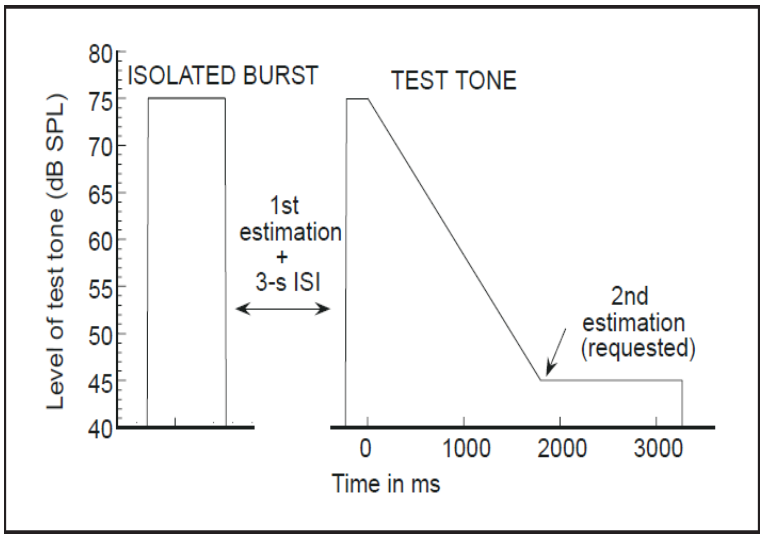


Figure 1.2 – *Son permettant d'estimer la variation de sonie indirectement. Exemple issu de G. Canévet & al. (voir [3]).*

Les autres auteurs ayant utilisé cette méthode sont R. & M. Teghtsoonian & al. en 2005 (voir [15]) qui dans cette étude ont comparé les résultats obtenus par un jugement direct de la variation de sonie et par un jugement indirect de variation de sonie. P. Susini & al. en 2010 (voir [14] et [16]) ont aussi utilisé cette méthode afin de la comparer avec les autres.

Pour ce type de jugement, R. Trapeau a montré que l'estimation de la variation de sonie d'un son évolutif n'est pas du tout influencée ni par le niveau de fin pour les crescendos, ni par le niveau de début pour les décrescendos. En effet, on peut voir sur la figure 1.3.2 qu'aucune des courbes de variation de sonie ne suit la fonction de sonie. De plus, le fait que pour les deux dynamiques les pentes des courbes sont parallèles (au moins pour les crescendos) et que celle pour 30dB soit plus élevée que celle pour 15dB amène à penser que par cette méthode on effectue bien un jugement de variation de sonie.

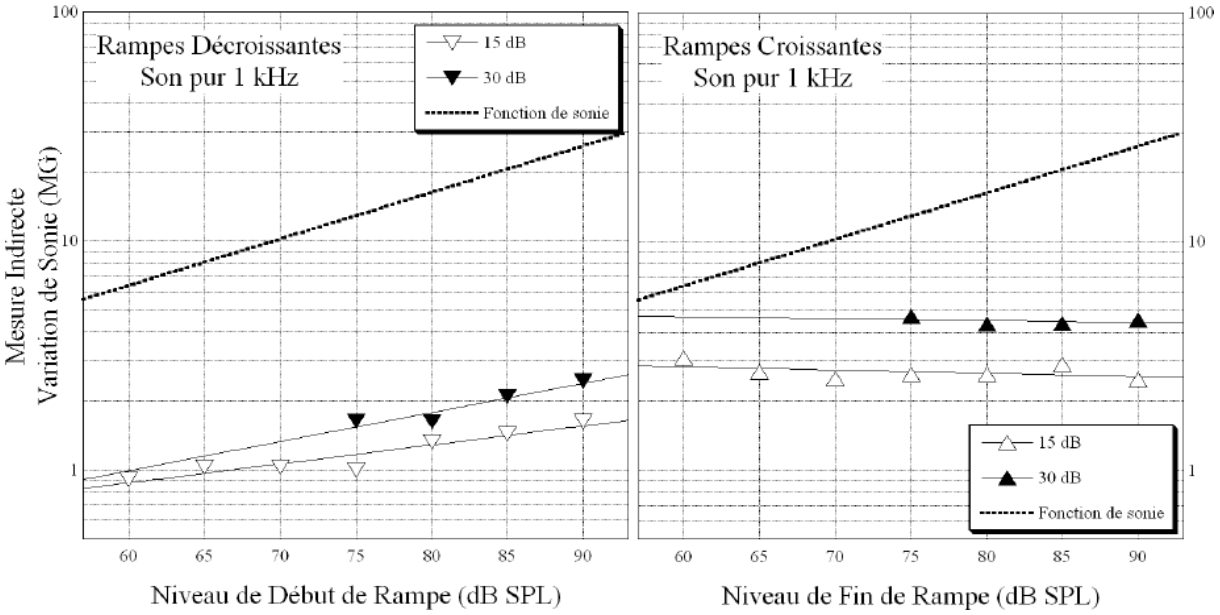


FIGURE 1.3 – *Résultats obtenus par R. Trapeau pour un son pur à 1kHz sur une estimation de la variation de sonie de façon indirecte. On peut remarquer que la variation de sonie pour les rampes croissantes et décroissantes ne suit pas la fonction de sonie, le résultat n'est donc pas influencé par le niveau de début ou de fin du signal. De plus, les courbes obtenues sont parallèles (au moins pour les crescendos), ce qui prouve qu'on effectue une estimation de la variation de sonie perçue.*

### 1.3.3 Jugement global direct de sonie

Cette méthode est apparue en 2007 avec P. Susini & al. (voir [13]). Elle consiste à demander au sujet la sensation globale d'intensité sonore qu'il perçoit lorsqu'il entend un son évolutif.

R. Trapeau a montré dans son rapport de stage (voir [16]) que ce type de jugement sur un crescendo dépend du niveau de fin de la rampe, que pour un décrescendo le jugement dépend du niveau de début du signal et que l'effet de la dynamique est très faible.

De plus, il apparaît que pour une dynamique donnée le jugement global de sonie augmente avec la plage de variation (plus la plage de variation est élevée et plus le jugement est élevé), ce qui montre que le jugement global de sonie est en fait une intégration de l'énergie du signal. La figure 1.3.3 montre que l'estimation de sonie globale est influencée par les niveaux de début et de fin suivant le sens de variation.

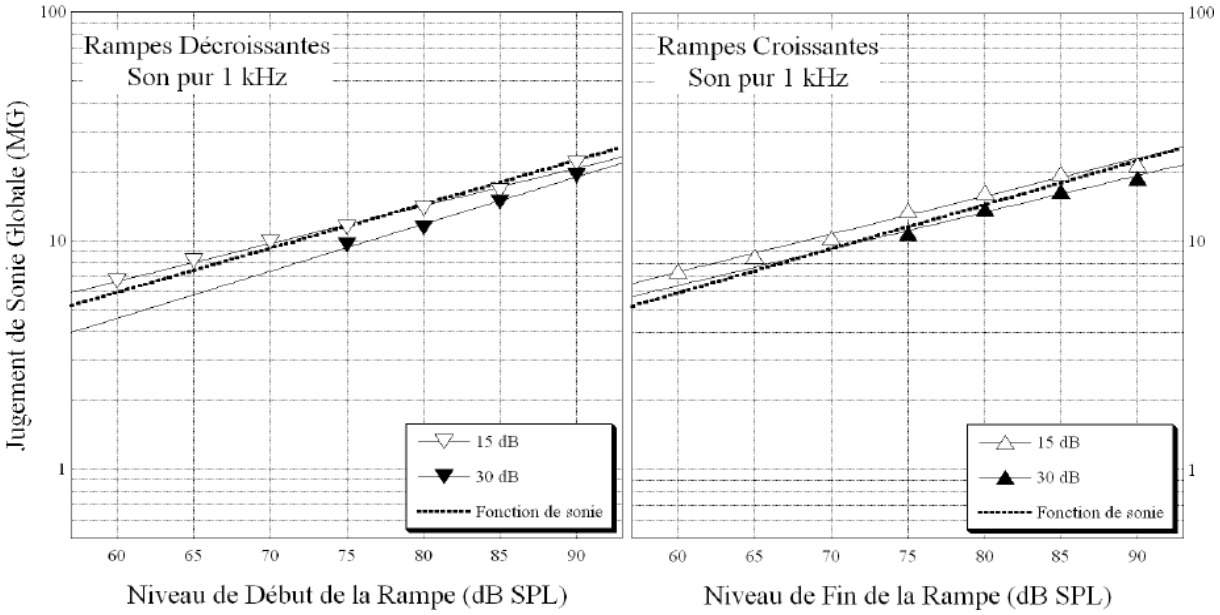


Figure 1.4 – *Résultats obtenus par R. Trapeau pour un son pur à 1kHz. On voit bien sur cette figure que le jugement de sonie globale est influencé par le niveau de fin du signal pour les crescendos, par le niveau de début du signal pour les décrescendos.*

## 1.4 Résultats

Comme nous l'avons déjà dit, on ne peut pas sur une seule étude se concentrer sur tous les paramètres d'un son évolutif (étude de l'effet de la durée, de la dynamique, de la plage de variation,...). Dans la suite de ce chapitre nous présenterons donc les résultats obtenus dans les différentes études qui se sont concentrées sur tel ou tel paramètre.

### 1.4.1 Influence du sens de variation

Ce paramètre a été étudié dans toutes les études qui constituent ce rapport bibliographique. Il apparaît clairement, et ce dans tous les articles, qu'il existe une asymétrie de jugement (de variation ou de sonie globale) entre les sons dont l'intensité croît et ceux dont l'intensité décroît.

Cependant tous les auteurs n'ont pas trouvé le même type d'asymétrie. L'exemple le plus marquant est celui de J. G. Neuhoff (voir [7]) et de G. Canévet & al. (voir [3]). Neuhoff trouve un « Bias for Rising Tones »tandis que Canévet trouve un effet de « décrutement ».

Selon Neuhoff un auditeur a tendance à surestimer la dynamique de variation d'un son dont l'intensité croît et à la sous estimer pour un son dont l'intensité décroît. Il explique cette asymétrie par le fait que le codage neuronal sélectionne les sons qui s'approchent (par exemple un ours qui s'approche produit un son dont l'intensité croît). Ce serait donc l'évolution humaine qui serait impliquée.

De son côté, G. Canévet a montré qu'au contraire, un son dont l'intensité décroît va être jugé varier plus qu'un son dont l'intensité croît. Il appelle cet effet le « décrutement ».

Il est important de noter à ce stade que les deux auteurs cités précédemment n'ont pas utilisé la même méthode d'estimation de la variation de sonie : G. Canévet a utilisé le jugement indirect (voir chapitre 1.3.2) tandis que J. G. Neuhoff a utilisé un jugement direct de variation de sonie (voir chapitre 1.3.1).

Dans le but de « départager »Neuhoff et Canévet, R. & M. Teghtsoonian & al. (voir [15]) ont mené en 2005 une étude dans laquelle ils testent les deux méthodes : ils retrouvent l'effet de décrutement observé par G. Canévet en 2003 et montrent que les mesures effectuées par J. G. Neuhoff en 1998 sont fortement influencées par le niveau de fin pour les rampes croissantes. La figure 1.4.1 illustre ce propos.

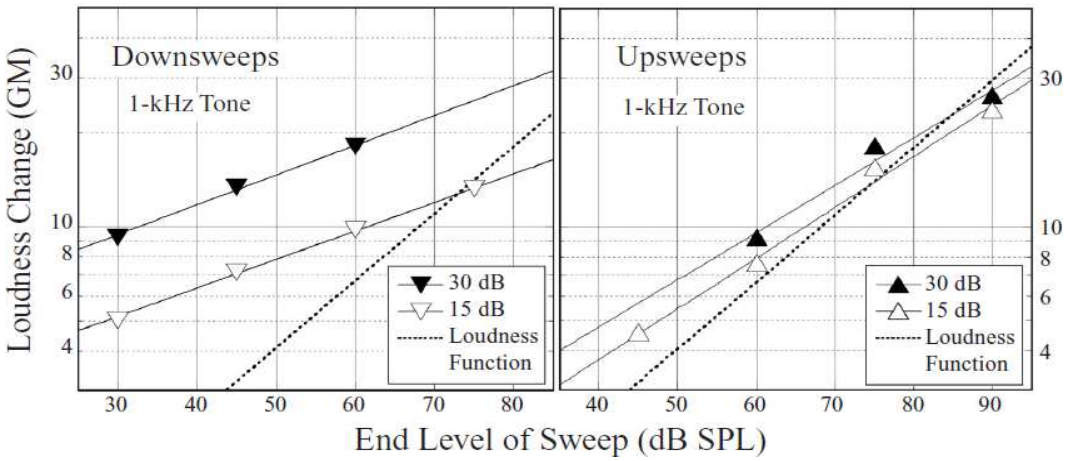


FIGURE 1.5 – *Résultats obtenus par R. & M. Teghtsoonian & al. en 2005 en utilisant la méthode de jugement de variation direct de sonie. Les rampes croissantes et décroissantes sont comparées à la fonction de sonie des auditeurs. On voit que pour les rampes croissantes le jugement est fortement influencé par le niveau de fin du signal.*

P. Susini & al. (voir [13]) ont testé une méthode d'estimation de variation de sonie de façon continue. Par cette méthode ils montrent un effet de décrutement.

### 1.4.2 Influence de la dynamique

Tous les auteurs n'ont pas étudié l'effet de la dynamique sur le jugement de variation de sonie d'un son évolutif. G. Canévet en 2003 (voir [3]) a étudié l'effet de ce paramètre, mais aussi R. & M. Teghtsoonian en 2005 (voir [15]) ou encore P. Susini & al. en 2010 (voir [14]).

Les dynamiques utilisées dans la plupart des publications sont de 15dB et 30dB. G. Canévet montre (sans surprise) que l'on juge la variation plus importante pour les dynamiques de 30dB (par la méthode d'estimation indirecte de variation de sonie). R. & M. Teghtsoonian & al. montrent que par la méthode de jugement direct de variation de sonie nous n'avons pas forcément accès à une différence de jugement significative entre les dynamiques de 15dB et de 30dB, et notamment pour les sons croissants. La figure 1.4.2 illustre ce propos.

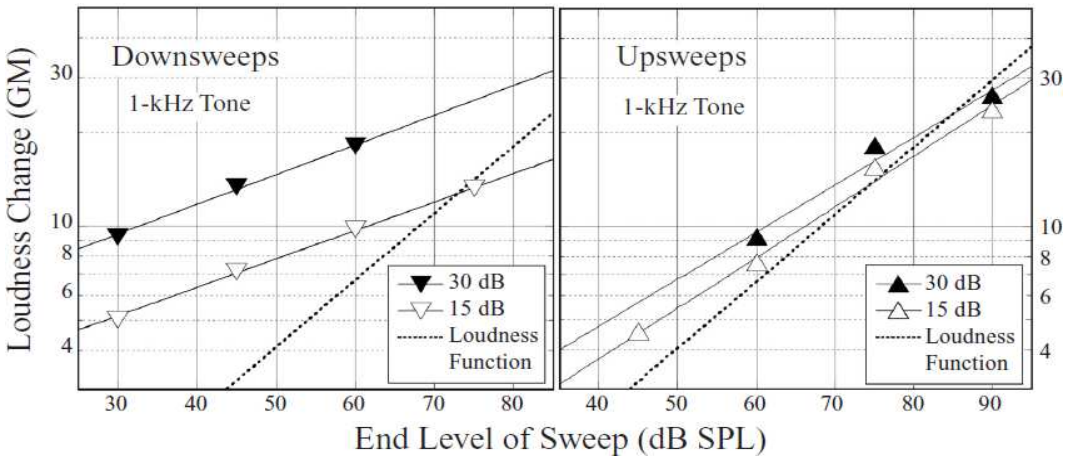


FIGURE 1.6 – *Résultats obtenus par R. & M. Teghtsoonian & al. en 2005 en utilisant la méthode de jugement direct de variation de sonie. Pour les rampes croissantes la variation jugée n'est pas significative.*

R. Trapeau (voir [16]) a remarqué que sur un jugement global de sonie les rampes de dynamique 15dB étaient jugées plus fortes que celles de dynamique 30dB. Il explique ce résultat par le fait qu'à niveau maximum égal il y a plus d'énergie (à durée égale) sur une rampe de 15dB que sur une rampe de 30dB, ce qui est conforme avec le fait de dire qu'un jugement global de sonie s'apparente à une intégration d'énergie.

### 1.4.3 Influence de la plage de variation

Presque tous les auteurs de cette bibliographie ont étudié l'effet du paramètre « plage de variation ».

On voit chez Neuhoff en 1998 (voir [7]) que plus la plage de variation est élevée en niveau (à durée et dynamique constantes) et plus la variation de sonie du signal est jugée importante. On retrouve donc le biais dû à la méthode de jugement direct de la variation de sonie utilisée (influencé par le niveau de fin pour les crescendos, par le niveau de début pour les décrescendos).

Etant donné qu'un jugement direct global de sonie est influencé par le niveau de fin du signal pour un crescendo et par le niveau de début pour un décrescendo, il est évident que la plage de variation joue un rôle primordial : plus la plage de variation est élevée en niveau et plus le jugement global sera important.

### 1.4.4 Influence du type de son

Les types de sons qui ont été testés lors des études précédentes sont souvent des sons « d'étude »(sinus, bruit blanc,...). Il existe des différences significatives sur la perception de ce type de son.

Dans son étude de 1998, J. G. Neuhoff (voir [7]) a étudié l'effet du type de son et il trouve que pour un bruit blanc la variation de sonie perçue est moindre que pour un sinus à 1kHz ou une voyelle synthétique (à dynamiques identiques). Il explique ce résultat par une théorie évolutionniste : un bruit blanc est introuvable dans la nature, tandis que les sons harmoniques sont perçus de façon prioritaire.

G. Canévet (voir [3]) observe aussi cette tendance, on peut donc considérer que la méthode utilisée ne participe pas au fait que le type de son influence le jugement de variation de sonie d'un son évolutif.

Les sons harmoniques sont jugés varier plus que les bruits large bande. Cependant, P. Susini & al. (voir [14]) ont montré que le jugement global de sonie n'est pas influencé par

le type de son.

### 1.4.5 Influence de la durée

Il est important dans ce travail bibliographique de regarder ce qui a été observé sur l'effet de la durée sur la perception des sons évolutifs, car le but du stage est justement de se focaliser sur cet effet.

Les auteurs ayant étudié l'effet de la durée sont G. Canévet & al. (voir [3]), R. & M. Teghtsoonian & al. (voir [15]), P. Susini & al. (voir [13]) et K. N. Olsen & al. (voir [9]).

D'autres auteurs ont étudié les sons évolutifs non pas en observant la sonie ou la variation ressentie, mais en testant la durée du son perçue. Par exemple, R. S. Schlauch & al. (voir [11]) ont étudié cette question. Les sons testés dans cette étude sont des sons purs (1kHz et 8kHz) et un bruit blanc et les durées varient entre 10 et 200ms. Il est demandé au sujet de juger la durée du son et une observation est que les sons croissants sont jugés durer plus longtemps que les sons décroissants. Ils expliquent ce résultat par les propriétés physiologiques du codage du son. La figure 1.4.5 illustre les résultats obtenus.

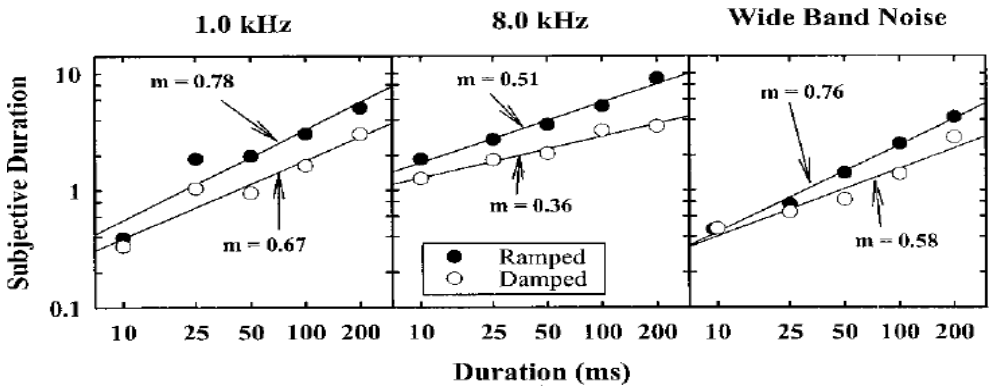


Figure 1.7 – *Durée perceptive normalisée par une loi puissance pour les différents types de sons testés par R. S. Schlauch & al. en 2001. La durée perçue est globalement plus importante pour les sons dont l'intensité croît que pour ceux dont l'intensité décroît.*

Un autre aspect de l'influence de la durée est que, selon Susini & al. (voir [13]), plus la durée est importante et plus le jugement de variation est grand. La figure 1.4.5 illustre ce résultat.

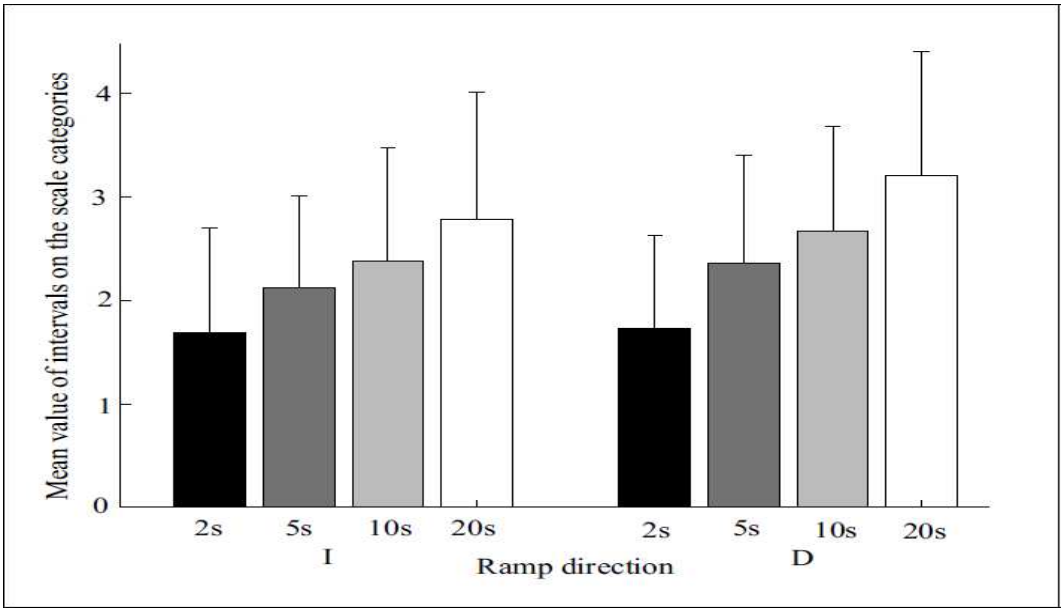


FIGURE 1.8 – *Moyenne de la variation de sonie pour les sons croissants (I) et décroissants (D) et pour les différentes durées. Plus la durée du son augment et plus la variation de sonie est jugée importante.*

G. Canévet & al. ont observé en 2003 (voir [3]) qu'il y a un effet de la durée pour les rampes croissantes dans le cas de sinus purs à 1kHz et pour les bruits blancs mais pas pour les sons purs à 4kHz. En revanche, ils montrent qu'il y a un effet de la durée pour tous les types de sons, toutes les dynamiques et toutes les plages de variation. Cet effet va dans le même sens que tous les autres : plus le sons est long et plus il est jugé varier beaucoup. La figure 1.4.5 illustre les résultats obtenus dans l'étude citée précédemment.

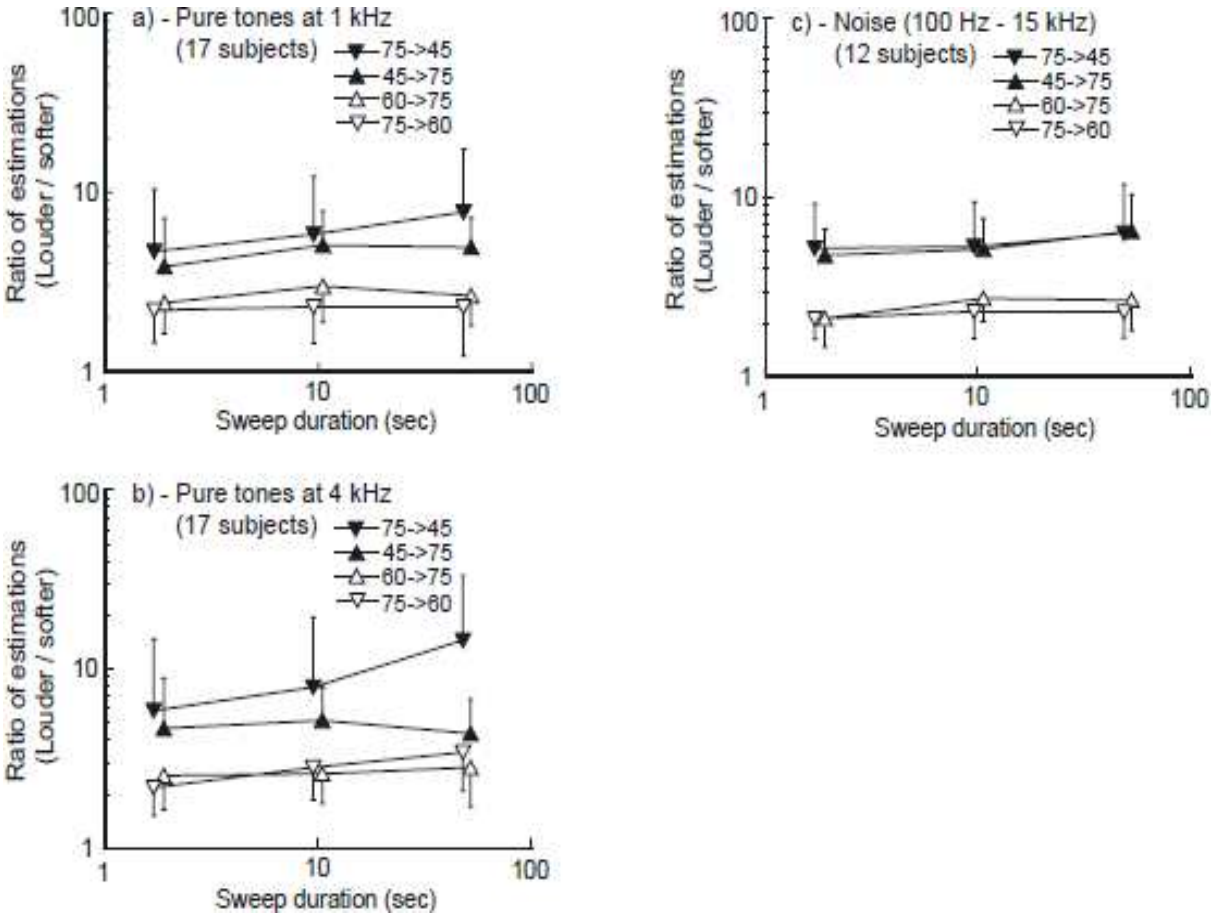


Figure 1.9 – *La variation de sonie est ici calculée de façon indirecte. L'effet de la durée est significatif pour les rampes décroissantes et pour les rampes croissantes uniquement dans le cas du son pur à 1kHz et dans le cas du bruit blanc.*

# Chapitre 2

# Hypothèses et procédure

Le but de notre étude est d'analyser l'influence de la durée sur le jugement de la sonie globale de sons évolutifs. Nous déterminerons ddonc dans ce chapitre quelles sont les hypothèses formulées et la procédure mise en place pour les vérifier.

## 2.1 Hypothèses

Selon Susini & al. (voir [13]), qui ont testé des durées jusqu'à 20s, l'effet de la durée n'est significatif que pour la durée de 2s comparé aux autres. S'il y a un effet de la durée, nous devrions le voir apparaître avant 10s. Olsen & al. (voir [9]) trouvent qu'un son plus long mène à un jugement de variation de sonie plus important uniquement dans le cas des crescendos. Dans le cadre de notre étude, nous faisons l'hypothèse qu'un son crescendo d'une durée plus importante sera aussi jugé plus fort globalement, mais que dans le cas des décrescendos il seront jugés de moins en moins fort à mesure que la durée augmente.

Nous pouvons formuler les hypothèses suivantes pour un jugement global de sonie :

- Il y a une surestimation de la sonie des sons dont l'intensité croît lorsque la durée augmente (ce jugement dépendant de la sonie de fin de rampe),
- Il y a une sous estimation de sonie dans le cas des décrescendos due à un effet d'oubli, même si ce jugement dépendra toujours de la sonie de début de rampe.

## 2.2 Protocole expérimental

Dans cette section nous présentons les caractéristiques "techniques" du test que nous avons réalisé.

### 2.2.1 Participants

39 personnes normo-entendantes ont participé à nos tests. Ils étaient âgés entre 14 et 55 ans, pour une moyenne d'âge de 26 ans. Les auditeurs recevaient 10 euros pour leur participation à l'étude.

Sur ces 39 personnes, 20 ont effectué uniquement un jugement global de sonie des crescendos et décrescendos, et les 19 autres ont non-seulement effectué ce jugement, mais ont aussi effectué un jugement de niveau de fin pour les crescendos et un jugement de niveau de début pour les décrescendos.

### 2.2.2 Stimuli

30 sons croissants en intensité et 30 décroissants ont été sélectionnés. Ce sont tous des sinus purs à 1kHz. Les durées utilisées sont les suivantes :

- 500ms,
- 1s,
- 2s,
- 4s,
- 8s,
- 10s.

Pour chacune de ces durées les plages de variation testées pour les crescendos et les décrescendos ont été les suivantes :

- 50dB - 65dB,
- 55dB - 70dB,
- 60dB - 75dB,
- 65dB - 80dB,
- 70dB - 85dB.

Chaque son comportait une attaque et une décroissance en $cos^2$ d'une durée de 30ms (incluse à la durée totale du son) afin d'éviter les "clics".

Comme nous le verrons par la suite, la fonction de sonie de chacun des auditeurs a été tracée. Les sons utilisés pour la tracer sont des sinus purs stationnaires à 1kHz d'une durée de 800ms.

### 2.2.3 Définition de la procédure

Tous les tests ont été effectués dans la chambre anéchoïque du bâtiment P du GLM. Pour chacun des participants la procédure était la suivante :

- Audiogramme (environ 15 min.),
- Fonction de sonie (environ 3 min.),
- Jugement global de sonie des sons variant au cours du temps (environ 20 min.),
- Jugement du niveau de fin pour les crescendos et du niveau de début pour les décrescendos (environ 20 min.).

L'audiogramme a été réalisé au moyen d'un audiomètre Interacoustics AC40, sur un casque Telephonics TDH 39.

La fonction de sonie de chaque participant a été tracée par estimation de grandeur. Des sons de 20dB à 80dB par pas de 7.5dB, d'une durée de 800ms et à la fréquence de 1kHz ont été présentés à l'auditeur. Il lui était demandé de faire une estimation de grandeur sur une échelle libre de la sonie du son qu'il avait entendu. La consigne à recpecter était d'attribuer une note deux fois plus importante si un son lui paraîssait deux fois plus fort qu'un autre. Chaque son était jugé trois fois, et ils étaient présentés de façon aléatoire. La réponse était récupérée au moyen d'un terminal de type VT320. Le casque utilisé lors de cette expérience est un SENNHEISER HD280.

La procédure d'estimation de sonie globale des sons dont l'intensité varie au cours du temps est similaire à celle du tracé de la fonction de sonie : il était diffusé à l'auditeur un son, puis il lui était demandé d'effectuer un jugement de grandeur sur échelle libre de la sonie globale de ce son, toujours en recpectant la règle de multiplier par deux la note si un son lui paraîssait deux fois plus fort qu'un autre.

Stecker & al. (voir [12]) ont montré que la différence entre les rampes croissantes et décroissantes dépend du type de stimuli présenté avant. En effet, ils ont observé qu'un crescendo est jugé plus fort en moyenne qu'un décrescendo si il est précédé d'un crescendo et non pas lorsqu'il est précédé d'un décrescendo. Il a donc été intéressant d'effectuer les tests en deux blocs séparés : un bloc de crescendos et un bloc de décrescendos.

Chaque son étant jugé deux fois, la procédure pour le jugement global de sonie a été la suivante :

1. Sons crescendos à 1kHz
   - Premier bloc avec tous les sons présentés aléatoirement,
   - Second bloc avec tous les sons présentés aléatoirement.
2. Sons décrescendos à 1kHz
   - Premier bloc avec tous les sons présentés aléatoirement,

– Second bloc avec tous les sons présentés aléatoirement.

Enfin, deux groupes de sujets ont été faits : le premier groupe fait le test dans le sens 1, 2 et le second dans le sens 2, 1.

Pour les 20 sujets n'ayant fait que le jugement global de sonie le test s'arrêtait là. Pour les 19 autres il continuait avec le jugement de niveau de fin pour les crescendos et le jugement de niveau de début pour les décrescendos. La procédure est exactement la même que pour le jugement global et encore deux groupes ont également été formés (ceux qui faisaient le test dans le sens crescendos puis décrescendos et ceux qui faisaient le test dans le sens décrescendos puis crescendos).

Le lecteur trouvera en annexe A une description de l'implémentation et des essais réalisés pour mettre en place les tests.

# Chapitre 3

# Résultats

Les résultats obtenus pour les différentes mesures effectuées sont présenté dans ce chapitre. Des analyses ANOVA ont été effectuées pour les mesures correspondant aux jugements sur les niveaux globaux des crescendos/décrescendos. Le lecteur trouvera en annexe B un tableau récapitulatif des résultats de cette analyse.

## 3.1 Normalisation des résultats

La normalisation effectuée sur les résultats bruts est la suivante :

$$\textit{Résultat normalisé} = \frac{2 \times \textit{estimation}}{\textit{moyenne géométrique des estimations de l'individu pour le } 1kHz \textit{ à } 50\ dB}$$

Toutes les réponses d'un sujet ont donc été divisées avec la moyenne de ses propres estimations sur le son à 50dB multipliée par deux. Cela revient à normaliser en sonie. En effet, un son pur à 1kHz et à 50dB correspond par définition à une sonie de 2 sones.

## 3.2 Vérification de la cohérence des réponses

Afin de s'assurer que tous les sujets ont compris la consigne et qu'ils ont tous respecté les mêmes règles pour effectuer leur jugement global de sonie, on a effectué deux tests : la mesure de corrélation individuelle et l'application de la procédure de Jackknife.

Ces tests et leurs résultats sont présentés ci-dessous.

### 3.2.1 Mesure de corrélation

La mesure de corrélation permet de savoir si le sujet a donné le même jugement à chaque estimation pour le même son. Pour le jugement des sons purs à 1kHz chaque sujet effectuait deux estimations du même son.

Soit X le vecteur contenant les valeurs de la première estimation de chaque son et Y celui contenant les valeurs de la seconde estimation. La mesure de corrélation $\rho$ de ces deux vecteurs est donnée par :

$$\rho = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

avec
- $\sigma_{X,Y}$ la covariance (si X et Y ne sont pas corrélées alors $\sigma_{X,Y} = 0$).
- $\sigma_X$ l'écart type de X,
- $\sigma_Y$ l'écart type de Y.

On a donc la propriété suivante : $-1 \leq \rho \leq +1$. Si $\rho = 1$ alors X et Y sont parfaitement corrélés (X = Y), si $\rho = 0$ alors il n'y a aucune corrélation et si $\rho = -1$ alors la relation entre X et Y est parfaitement négative.

Le résultat du calcul pour chaque sujet de leur mesure de corrélation permet de valider le fait que les sujets ont été cohérents entre leurs estimations :

- $0.67 \leq \rho \leq 0.98$ pour les sons crescendos,
- $0.78 \leq \rho \leq 0.99$ pour les sons décrescendos,
- $0.73 \leq \rho \leq 0.99$ pour la fonctioin de sonie.

### 3.2.2 Procédure de Jackknife

La procédure de Jackknife nous permet de savoir si un sujet en particulier a une influence importante sur la variance globale des résultats, c'est-à-dire de savoir si il a une variance dans ses réponses beaucoup plus importante que la moyenne des variances des autres sujets.

Cette procédure consiste à calculer la variance sur toutes les réponses et sur tous les sujets moins un (celui qu'on teste). On répète cette opération autant de fois qu'il y a de sujets (i.e. 39 dans notre cas) et on regarde s'il y a une chute de la variance à un moment, ce qui voudrait dire que la variance totale est moins importante lorsque le sujet testé n'est pas présent et donc qu'il serait plus intéressant d'exploiter les résultats en éliminant les réponses de ce sujet.

Le résultat de cette procédure appliquée à notre cas est présenté à la figure 3.2.2.

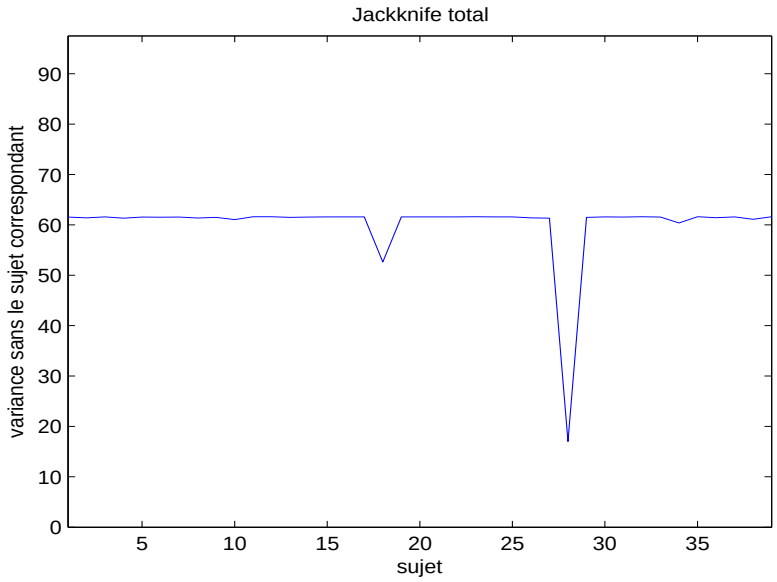


FIGURE 3.1 – *Application de la procédure de Jackknife aux 39 sujets ayant participé à l'expérience et sur le total des sons normalisés (comprenant fonction de sonie et sons tests).*

On remarque que le sujet 28 pose problème : il y a une chute de la variance lorsque ses estimations ne sont pas prises en compte dans le calcul de la variance totale. On peut alors penser que ce sujet n'a pas respecté la consigne, mais cette affirmation est contradictoire avec ce qui a été montré dans la section précédente avec la mesure de corrélation : tous les sujets ont été cohérents avec eux-mêmes.

Ce qui se passe en réalité est que le sujet 28 a une pente de fonction de sonie à 0.645 tandis que la moyenne tourne plutôt autour de 0.43. Cela signifie que le sujet 28 a un écart très important dans ses jugements entre les sons perçus faibles et les sons perçus forts.

Nous faisons donc le choix de garder les réponses de tous les sujets.

## 3.3 Fonction de sonie

Pour rappel, ce que l'on cherche à estimer lorsqu'on trace la fonction de sonie d'un sujet sont les coefficients $\alpha$ et k dans le modèle $S = k.P^{\alpha}$. La pente de la foncton de sonie

$\alpha$ moyennée sur tous les sujets est de 0.425 et le coefficient directeur k est de 0.173 pour les résultats normalisés.

## 3.4 Effet de la durée

Le paramètre "durée" est statistiquement significatif ($F(5,8.5) = 88.6$, $p < 0.001$) et plus un son est long en temps et plus il est jugé fort (au moins pour les durées testées dans notre étude). De plus ce paramètre est significatif lorsqu'il est croisé avec la paramètre "plage de variation". En effet, à durée fixée un son est jugé plus fort s'il a une plage de variation plus importante.

Deux représentations des résultats sont proposées ci-dessous : la première met en évidence l'effet de la plage de variation ($F(4,31) = 320.8$, $p < 0.001$) et la seconde met en évidence l'effet de la durée.

Nous voyons bien sur ces figures que plus la durée augmente et plus le jugement est important. En effet, si on compare les estimations de sonie globale avec la fonction de sonie qui est tracée sur ces figures et qui est fixe quel que soit la durée, on voit que ces courbes montent avec la durée. Nous pouvons aussi observer que cette augmentation se produit pour les deux sens (cresnedos et décrescendos), ce qui peut être contradictoire avec les hypothèses : il n'y a pas d'effet d'oubli du niveau de début pour le jugement des sons décrescendos. Le jugement global de sonie sur les sons variant au cours du temps serait donc bien une intégration d'énergie sur la fin du signal pour les sons crescendos et sur le début du signal pour les sons décrescendos.

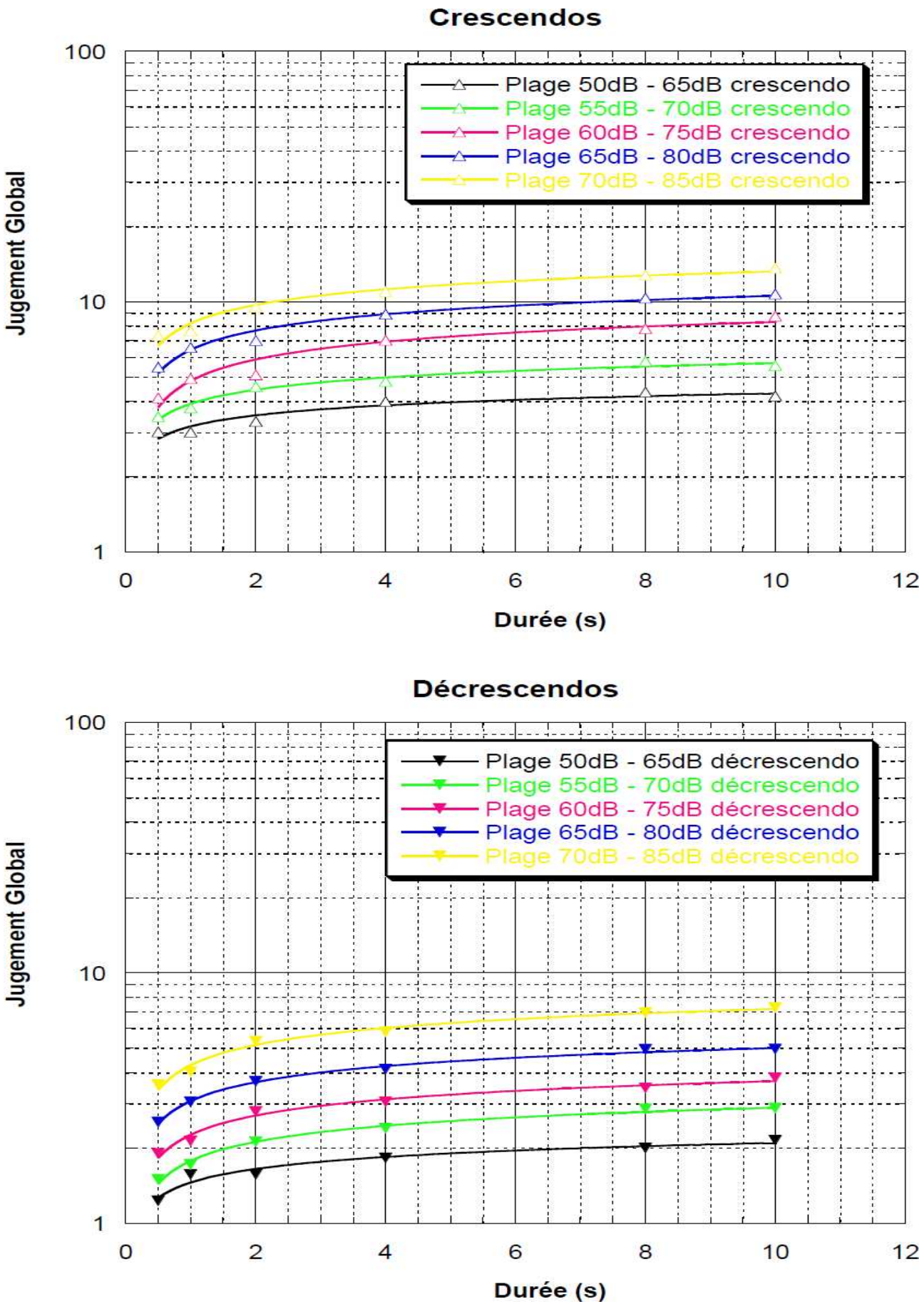


FIGURE 3.2 – *Mise en évidence de l'effet de la durée sur le jugement global de sonie de sons variant au cours du temps.*

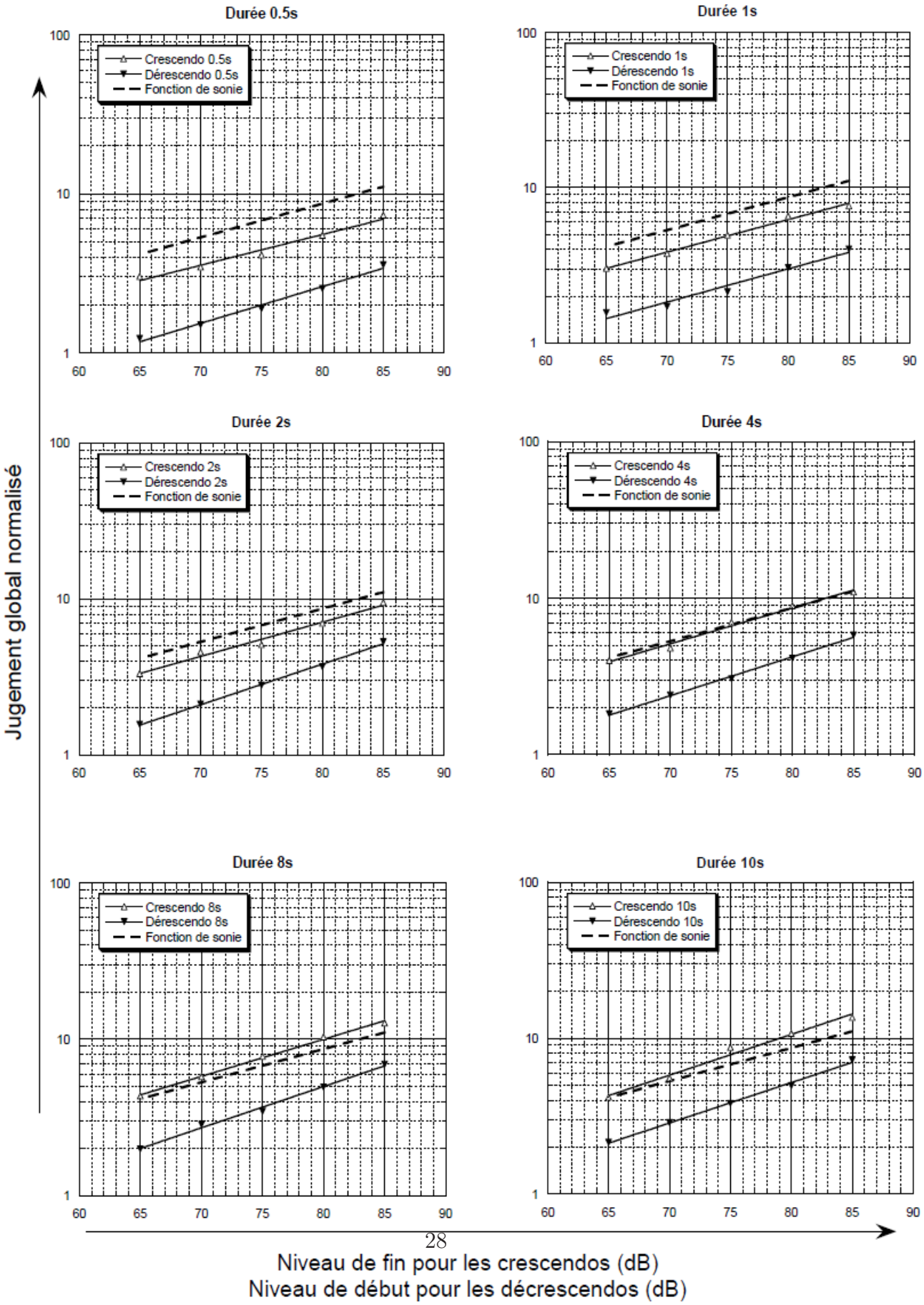




Figure 3.3 – *Mise en évidence de l'effet de la plage de variation sur le jugement global de sonie de sons variant au cours du temps.*

Ces résultats peuvent sembler satisfaisants, cependant ils ne concordent pas exactement avec ce qu'avait obtenu R. Trapeau. En effet, si on fait l'approximation qu'il a utilisé une durée de 2s pour ses tests (en réalité c'était une durée de 1.8s), nous pouvons comparer les résultats. Les figures ci-dessous mettent en évidence cette comparaison.

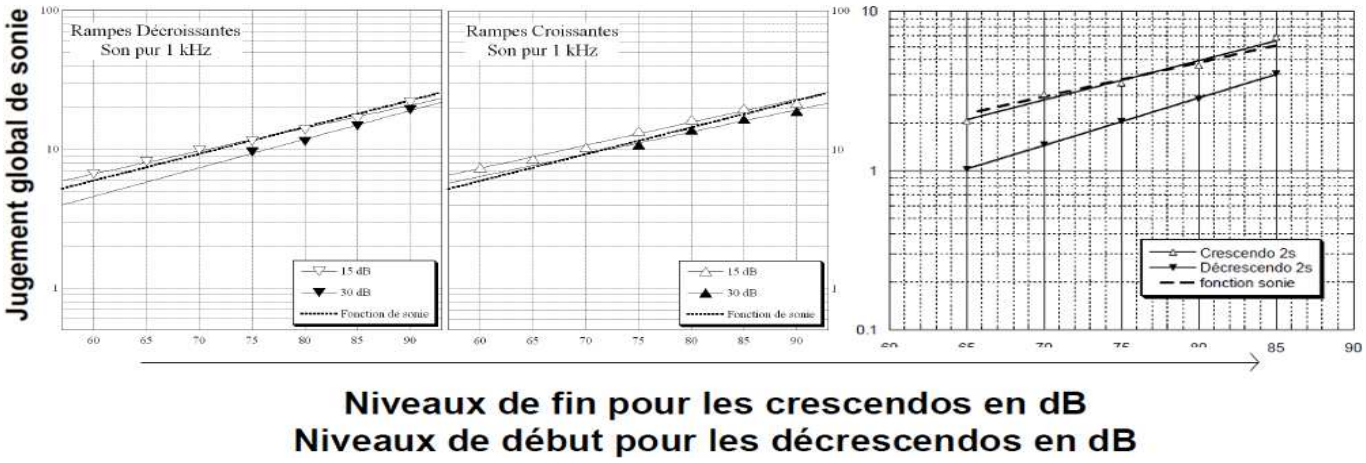


Figure 3.4 – *Comparaison des résultats obtenus par R. Trapeau (les deux de gauche) et ceux d'aujourd'hui (graphique de droite).*

Sur les courbes de R. Trapeau apparaissent les résultats obtenus pour des plages de variations de 15dB et de 30dB. La plage qui nous intéresse est celle de 15dB. On voit que pour les crescendos R. Trapeau trouve que les résultats suivent la fonction de sonie et nous retrouvons le même résultat. En revanche pour les décrescendos nous ne retrouvons pas le même résultat : R. Trapeau trouve qu'encore une fois les jugements suivent la fonction de sonie tandis que dans notre cas ces jugements sont parallèles à la fonction de sonie mais bien en dessous.

Cette différence de résultat peut s'expliquer par une différence de méthode. En effet, R. Trapeau a "mélangé" tous les sons alors que nous avons séparé les crescendos et les décrescendos. Donc il est probable que nous ayons un effet de contexte : les sujets modifient leur échelle lorsqu'ils jugent une série de sons croissants en intensité ou quand ils jugent des décrescendos.

# Chapitre 4

# Modélisation

Grâce aux données obtenues nous pouvons proposer un modèle permettant de relier les propriétés physiques du son (intensité, durée) à la perception de l'intensité sonore globale (i.e. la sonie) des crescendos. Nous avons montré précédemment que le jugement global de sonie sur un crescendo est une intégration du niveau du son sur la fin du signal. Il n'y a pas de modèle proposé pour les décrescendos ici car rien ne nous permet d'affirmer de façon certaine que le jugement global de sonie d'un décrescendo est une intégration du niveau du son sur le début du signal.

## 4.1 présentation du modèle

La méthode utilisée s'appuie sur les travaux effectués par d'Alessandro & al (voir [1]) sur la perception du pitch global de sons dont le pitch varie au cours du temps. Par analogie à ce qu'ils ont fait, nous proposons pour la modélisation de la sonie globale l'expression suivante :

$$S_n = \frac{\int_{t1}^{t2} N_n(t)dt}{\int_{t1}^{t2} dt}$$

Avec :
- $S_n$ la sonie en sones,
- t1 le temps de début de l'intégration,
- t2 la durée totale du signal,
- $N_n(t)$ le niveau du signal.

Cette expression traduit le fait que le jugement global de sonie d'un crescendo est une intégration du niveau du signal sur la fin de celui-ci.

Pour le choix du niveau du signal $N_n(t)$ nous avons proposé deux possibilités :
- Dans un premier temps nous avons supposé que ce niveau correspondait à la sonie calculée avec l'expression de la fonction de sonie ($S = k.P^{\alpha}$),
- Dans un second temps nous avons utilisé la méthode de calcul de sonie instantanée proposée par Moore en 2002 (voir [6]).

La première méthode suppose donc que le niveau ressenti est à chaque instant équivalent au niveau d'un son stationnaire ayant le même niveau, ce qui élimine les effets d'intégration temporelle. Nous prenons donc $N_n = k.P_n^{\alpha}$ en sones, $P_n = 10^{\frac{a_n.t+b_n}{20}}$, $t2 = d$ (fin du crescendo) et $t1 = d - \delta.d$ (début de l'intégration), avec :
- k = 0.173 la constante de la fonction de sonie,
- $\alpha = 0.425$ la pente de la fonction de sonie,
- $a_n$ la pente du crescendo ($I_n(t) = a_n.t + b_n$),
- $b_n$ le coefficient directeur du crescendo,
- $\delta = 0.81$ la durée d'intégration,
- d la durée du crescendo.

En effectuant l'intégration nous obtenons l'expression analytique suivante :

$$S_{\delta\beta}(n) = \frac{20.k}{\alpha.a_n.\delta.d.ln(10)}(10^{\frac{(a_n.d+b_n).\alpha}{20}} - 10^{\frac{(a_n.d.(1-\delta)+b_n).\alpha}{20}}).log(\beta.d)$$

avec $\beta$ et $\alpha$ deux constantes permettant d'ajuster le modèle. Les valeurs de ces constantes ont été ajustées par la méthode des moindres carrés. Le *log* vient du fait que les résultats dépendent de façon logarithmique de la durée.

Pour la seconde méthode, nous ne pouvons pas proposer d'expression analytique car la méthode de calcul de la sonie instantanée de moore se fait de façon numérique. Le programme de calcul de cette sonie instantanée a été développé par un travail de collaboration entre le LMA et la société GENESIS. Ce programme est téléchargeable sur le site Internet de la société GENESIS : http://www.genesis-acoustics.com/.

La figure 4.1 présente le résultat de calcul de la sonie instantanée de Moore sur un son de 0.5 s.

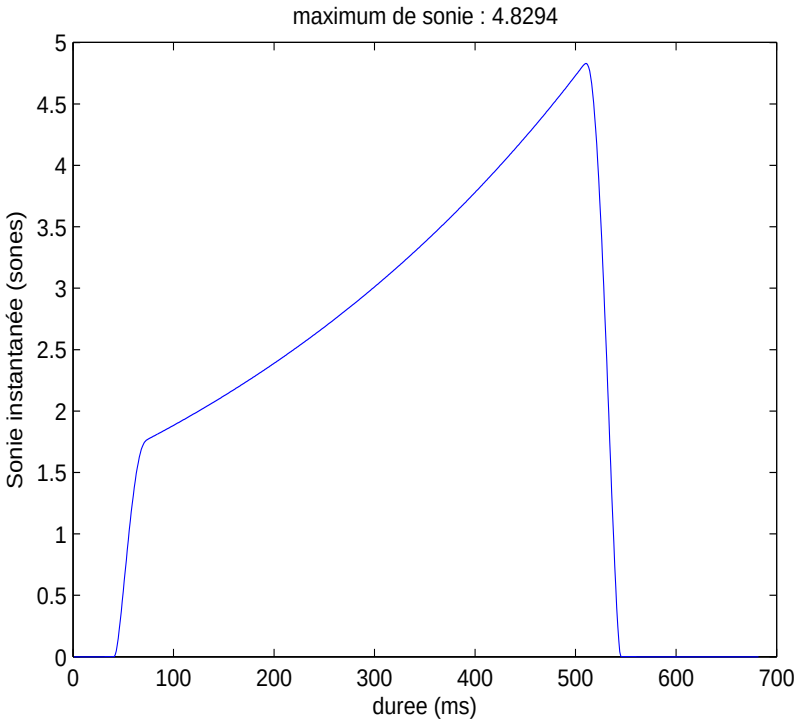


Figure 4.1 – *Résultat de calcul de la sonie instantanée par la méthode de Moore sur un crescendo variant de 50dB à 65dB et d'une durée de 0.5 s.*

## 4.2 Résultats obtenus

La figure 4.2 présente la comparaison des résultats obtenus avec le premier modèle (en prenant une fonction $N_n(t)$ comme la sonie d'un son stationnaire de même niveau) et des réponses des sujets.

La figure 4.2 présente la comparaison des résultats obtenus avec le second modèle (en prenant une fonction $N_n(t)$ comme la sonie instantanée calculée avec le modèle de Moore) et des réponses des sujets. Pour les sons de 10 s le modèle n'a pas pu être exploité car les résultats de calcul de sonie instantanée pour ces sons n'étaient pas satisfaisants. Nous pouvons remarquer que les résultats obtenus avec la seconde méthode sont bien moins bons que ceux obtenus avec la première méthode.

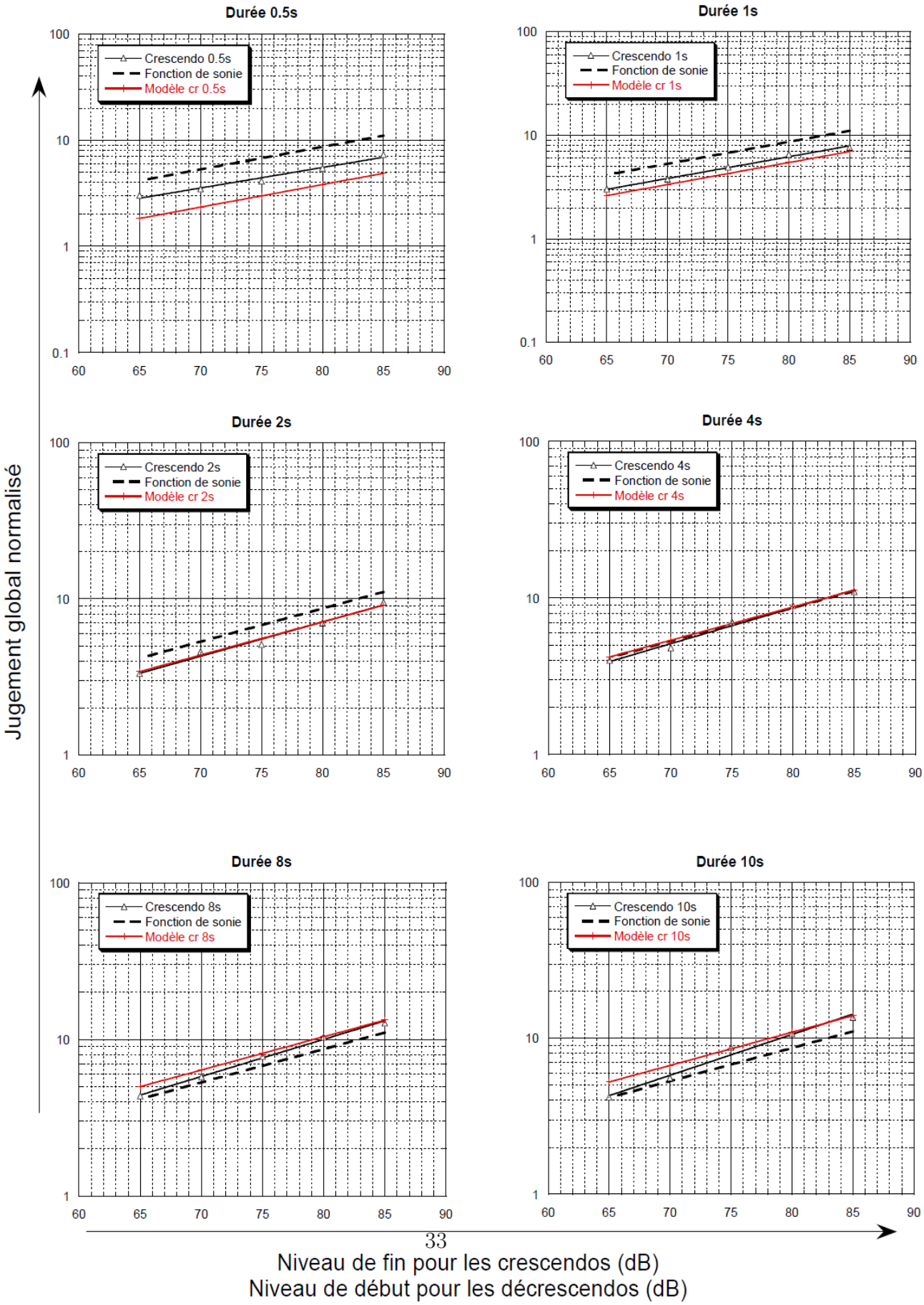




Figure 4.2 – *Comparaison du modèle développé avec la première méthode sur les crescendos (en rouge) et les résultats expérimentaux.*

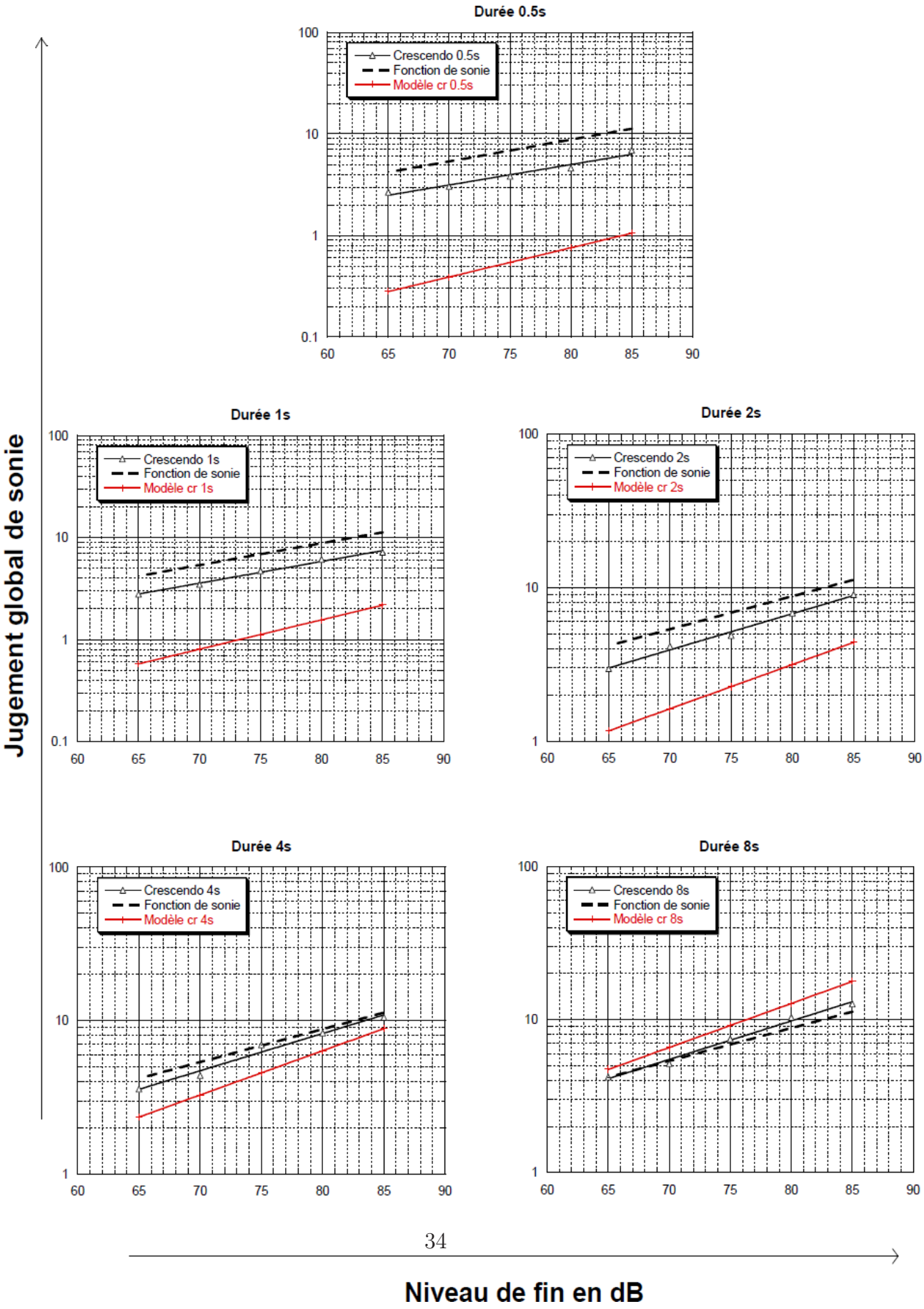




Figure 4.3 – *Comparaison du modèle développé avec la seconde méthode sur les crescendos (en rouge) et les résultats expérimentaux.*

# Conclusion

Il reste encore beaucoup de travail avant de pouvoir poser un micro avec un système d'acquisition sur le bord de la route et de calculer la sonie de la voiture qui passe. En effet, un bruit de voiture est complexe (plusieurs sources de bruit, crescendo puis décrescendo,...) et comme nous l'avons remarqué, les paramètres d'étude des sons dont l'intensité varie au cours du temps sont multiples.

Le modèle proposé lors de cette étude n'a été testé que sur des sons purs à 1 kHz, type de son que l'on ne trouve pas dans la nature. Il serait donc intéressant de le tester sur des sons "naturels" et de chercher à l'améliorer pour pouvoir s'approcher au mieux de la perception des sons de l'environnement. Il serait aussi très important de chercher le modèle correspondant aux décrescendos, mais il faudrait donc tout d'abord connaître la façon dont est influencé le jugement global de sonie des décrescendos.

Le problèmes de mesure de niveau de début sont à régler. Dans ce but, Emmanuel Ponsot effectue un stage à l'IRCAM pour déterminer l'influence des effets de mémorisation sur le jugement (est-ce que l'aasymétrie de jugement observée entre crescendo et décrescendo est due à un effet mémoire ?). Cette étude nous permettra d'en savoir plus sur les paramètres qui influencent le jugement global de sonie des décrescendos.

# Bibliographie


[1] Alessandro C., Rosset S., Rossi J. P., « The pitch of short-duration fundamental frequency glissandos », *Journal of Acoustical Society of America*, **104**(4), pp. 2339–2348, 1998.

[2] Bach D. R., Neuhoff J. G., Perrig W., Seifritz E., « Looming sounds as warning signals : The function of motion cues », *International Journal of Psychophysiology*, **74**, pp. 28-33, 2009.

[3] Canévet G., Teghtsoonian R., Teghtsoonian M., « A Comparison of Loudness Change in Signals that Continuously Rise or Fall in Amplitude », *Acta Acustica United With Acustica*, **89**, pp. 339-345, 2003.

[4] Dittrich K., Oberfeld D., « A comparison of the temporal weighting of annoyance and loudness », *Journal of Acoustical Society of America*, **126**(6), pp. 3168–3178, 2009.

[5] Grassi M., Darwin C. J., « The subjective duration of ramped and damped sounds », *Perception & Psychophysics*, **68**(8), pp. 1382-1392, 2006.

[6] Glasberg B. R., Moore B. C. J., « A model of loudness applicable to time-varying sounds », *Journal of Audio Ingeneering Society*, **50**(5), pp. 331-342, 2002.

[7] Neuhoff J. G., « Perceptual bias for rising tones », *Nature*, **395**, pp. 123-124, 1998.

[8] Neuhoff J. G., « An Adaptive Bias in the Perception of Looming Auditory Motion », *Ecological Psychology*, **13**(2), pp. 87-110, 2001.

[9] Olsen K. N., Stevens C. J. « Perceptual overestimation of rising intensity : Is stimulus continuity necessary ? », *37th Australasian Experimental Psychology Conference (EPC10)*, 2010.

[10] Ries D. T., Schlauch R. S., DiGiovanni J. J., « The role of temporal-masking patterns in the determination of subjective duration and loudness for ramped and damped sounds », *Journal of Acoustical Society of America*, **124**(6), pp. 3772–3783, 2008.

[11] Schlauch R. S., Ries D. T., DiGiovanni J. J., « Duration discrimination and subjective duration for ramped and damped sounds », *Journal of Acoustical Society of America*, **109**(6), pp. 2880–2887, 2001.

[12] Stecker G. C., Hafter E. R., « An effect of temporal asymmetry on loudness », *Journal of Acoustical Society of America*, **107**(6), pp. 3358-3368, 2000.

[13] Susini P., McAdams S., Bennett K. S., « Loudness Asymmetries for Tones with Increasing and Decreasing Levels Using Continuous and Global Ratings », *Acta Acustica United With Acustica*, **93**, pp. 623-631, 2007.

[14] Susini P., Meunier S., Trapeau R., Chatron J., « Comparison between global loudness and loudness change ratings for increasing sounds », $10^{eme}$ *Congrès Français d'Acoustique*, 2010.

[15] Teghtsoonian R., Teghtsoonian M., Canévet G., « Sweep-induced acceleration in loudness change and the "bias for rising intensities" », *Perception & Psychophysics*, **67**(4), pp. 699-712, 2005.

[16] Trapeau R., « Étude perceptive d'une évolution temporelle », *Rapport de stage*, Marseille, 2009.

# ANNEXES

# Annexe A

# Implémentation des tests

Dans ce chapitre nous verrons comment les tests ont été montés et avec quels moyens.

## A.1 Prise en main

Les tests sont créés au moyen d'un système de l'équipe PA au LMA : le système 3 de chez TDT. Ce système est piloté avec des codes DELPHI à travers un RPVD. Georges Canévet, qui a beaucoup utilisé ces systèmes est venu au LMA le 31 mars 2010 pour me montrer le type et le fonctionnement des programmes qu'il avait réalisés. Deux programmes m'intéressent particulièrement :

- un permettant d'estimer la fonction de sonie d'un sujet, nommé Fonction de Sonie VT320 Syspa01,
- un autre permettant d'effectuer de l'estimation de sonie, nommé Estimation de Sonie VT320 Syspa01.

On utilise une VT320 (interace comprenant un clavier et un écran) dans les deux cas pour reccueillir l'estimation du sujet.

## A.2 Développement et adaptation

Les deux programmes de G. Canévet étant presque exactement ce dont j'ai besoin, la tâche est rapide. La principale adaptation que j'ai réalisée est de passer en diotique : aussi bien dans le programme de tracé de la fonction de sonie que dans le programme d'estimation de sonie, G. Canévet les utilisait pour émettre des sons sur une seule oreille.

- *Fonction de Sonie VT320 Syspa01* :

Ce programme fonctionne comme suit :

1. Une procédure nommée montage est appelée : elle permet de communiquer à l'expérimentateur le montage à effectuer sur le TDT. Le montage est le suivant : Sortie Out-1 du RX6 -> Entrée Atténuateur 1 -> Entrée Right du HB7 (gain à -12), Sortie Out-1 du RX6 -> Entrée Atténuateur 2 -> Entrée Left du HB7 (gain à -12), Sortie Phono du HB7 -> Casque HD 280 PRO.
2. Une procédure étalonnage qui permet de lire le fichier d'étalonnage du casque utilisé (afin de régler les atténuateurs du TDT.
3. Une procédure FicheSujet qui permet d'entrer le nom du sujet.
4. Deux procédures d'initialisation : une pour le RPVD et une pour l'interface expérimentateur.
5. Une procédure SauvegardeConditions pour enregistrer les paramètres de départ.
6. Une procédure DepartDuTest qui demande via la VT320 au sujet de taper Enter lorsqu'il est prêt.
7. Deux procédures (OrdreAleatoire et EstimationsDeSonie) sont répétées jusqu'au nombre d'estimations souhaité. OrdreAleatoire permet de choisir le niveau du son à émettre suivant la procédure de Cross et EstimationDeSonie permet de jouer le son et de demander au sujet de rentrer une valeur.
8. Une procédure EstimationsMoyennes permet de réaliser la moyenne sur le nombre d'estimations demandé et une procédure FctSonieDuSujet permet d'estimer la pente de la fonction de sonie du sujet.
9. Enfin, les résultats sont sauvegardés via une procédure SauvegardeResultats dans un fichier texte.

La fonction de sonie du sujet apparaît sur la fenêtre de contrôle de l'expérimentateur en temps réel.

- *Estimation de Sonie VT320 Syspa01* :
  Ce programme fonctionne presque de la même façon que le précédent. Les différences sont les suivantes :
  1. Le montage est différent : Sortie Out-1 du RX6 -> Entrée Atténuateur 1 -> Entrée Left préampli SAMSON, Sortie Out-1 du RX6 -> Entrée Atténuateur 2 -> Entrée Right préampli SAMSON, Sortie 1 préampli SAMSON -> Casque HD 280 PRO.
  2. La procédure EstimationsDeSonie ne vient plus piloter le RPVD directement pour émettre un sinus à niveau constant mais on vient lire un fichier son sous le format BIN pour remplir un buffer du RX6 et le déclencher.
  3. Le programme ne trace bien sûr plus la fonction de sonie en direct et ne calcule pas la pente, mais les résultats des estimations apparaîssent en direct à l'écran de l'expérimentateur.

## A.3 Mise au point et résolution des problèmes

Afin de vérifier le bon fonctionnement des tests, plusieurs manipulations ont été effectuées. Elles sont décrites ci-dessous.

1. **Mesure de la tension de sortie du RX6 :** des sinus purs à 1kHz d'une durée de 40s et à différents niveaux (théoriques) ont été créés. Il est important de signaler ici que les niveaux émis aux oreilles du sujet sont entièrement contrôlés par le nombre de points du fichier son, c'est-à-dire qu'en entrée du RX6 la pleine échelle est codée sur $2^{16} = 2$ x 32768, donc si on envoie en entrée du RX6 un signal dont le nombre points varie entre -32768 et +32768, alors le RX6 délivrera une tension crête à crête de 10V. Sachant la tension qu'il faut envoyer au casque pour avoir un niveau aux tympans donné, on peut alors calculer le nombre de points des fichiers sons et la valeur à appliquer aux atténuateurs. On connaît donc parfaitement la tension théorique qu'il faut en sortie du RX6 pour avoir un niveau donné aux tympans du sujet. Cette première mesure a confirmé la théorie (voir annexe 1 pour les résultats).

2. **Mesure du niveau au microphone.** Avec un microphone Brüel&Kjaer Type 2669 et un préamplificateur NEXUS des mesure ont été effectuées dans la petite salle anéchoïque de l'équipe PA. Un simple montage en champ libre a été réalisé : sur un pied de micro était fixé le microphone et sur un autre pied de micro une oreille du casque était fixée. Le microphone et l'oreille du casque étaient situés à une distance de 2cm l'un de l'autre. Les mesures ont été réalisées pour tous les niveaux de 45dB à 90dB par pas de 5dB. Les résultats sont présentés à l'annexe 2. On peut voir que pour tous les niveaux et pour les deux oreilles les niveaux mesurés sont légèrement plus faible que ceux prédits (entre -1dB et -3dB environ), à part pour les niveaux les plus faibles qui souffrent du bruit. Cet artéfact s'explique par le fait que le casque utilisé est un casque fermé et que la mesure a été effectuée en champ libre, ce qui ne tient pas compte du couplage entre la tête de l'auditeur et le casque lui-même. On peut donc considérer que cette mesure valide la théorie.

3. **Enregistrements via carte son.** Afin de savoir si les signaux envoyés étaient conformes à ce qui était prévu, un enregistrement de ceux-ci a été réalisé. Toujours avec le même microphone que précédemment, le même préamplificateur et avec le même montage, on enregistre le signal via une carte son FOCUSRITE de type Saffire PRO24. Les signaux enregistrés sont présentés en annexe 3. Cette vérification a été salutaire, en effet on peut se rendre compte sur les premiers enregistrements de sons variant au cours du temps que les rampes de variation de niveau ne sont pas linéaires (alors qu'elles étaient sensées l'être). L'erreur provenait de la création des sons et a été corrigée.

4. **Dernière vérification : l'écoute.** Trois personnes se sont dévouées pour effectuer cette vérification : Françoise, Guy et Jacques. Grâce à eux, nous avons pu déceler un problème de phasing dans les sons qui durent longtemps (durée $> 10$s). Ce problème fait que les sons entre l'oreille droite et l'oreille gauche sont décalés dans le temps. Après plusieurs tests, le problème venait du HB7 (préamplificateur casque du TDT). La solution a donc été de remplacer ce préamplificateur par le SAMSON. Afin de s'assurer de retrouver les bons niveaux aux tympans de l'auditeur (qui avaient déjà été mesurés), une mesure du niveau en V à la sortie du HB7 a été effectuée et les gains ont été réglés afin de retrouver le même niveau en sortie du SAMSON.

# Annexe B

# Table ANOVA

Ci-dessous est présenté un tableau récapitulatif de l'analyse ANOVA à mesure répétée effectuée sur les réponses des sujets à l'estimation globale de sonie des crescendos/décrescendos.

Le logiciel STATISTICA fournit des tableaux d'analyse ANOVA très pratiques pour l'analyse des données. En effet, il suffit de rentrer toutes les valeurs obtenues lors de l'expérience sous la forme d'une matrice, d'indiquer au logiciel quels sont les paramètres à étudier et on obtient alors ce tableau dans lequel apparaissent en rouge les paramètres significatifs.

Le tableau ci-dessous présente une analyse de chacun des effets significatifs.

| Effet | Analyse de Variance avec Mesures Répétées (brutes_norm_log<br>Paramétrisation sigma-restreint<br>Décomposition efficace de l'hypothèse<br>SC | Degré de Liberté | MC | F | p |
|---|---|---|---|---|---|
| Ord.Orig. | *8584,762* | *1* | *8584,762* | *423,6302* | *0,000000* |
| {1}GROUPE | 2,217 | 1 | 2,217 | 0,1094 | 0,742670 |
| Erreur | 749,796 | 37 | 20,265 | | |
| {2}SENS | *96,010* | *1* | *96,010* | *22,0988* | *0,000035* |
| SENS*GROUPE | 1,307 | 1 | 1,307 | 0,3007 | 0,586712 |
| Erreur | 160,749 | 37 | 4,345 | | |
| {3}ESTIMATI | 0,352 | 1 | 0,352 | 2,3516 | 0,133658 |
| ESTIMATI*GROUPE | 0,000 | 1 | 0,000 | 0,0031 | 0,955581 |
| Erreur | 5,543 | 37 | 0,150 | | |
| {4}DUREE | *42,517* | *5* | *8,503* | *88,5528* | *0,000000* |
| DUREE*GROUPE | 0,698 | 5 | 0,140 | 1,4544 | 0,206860 |
| Erreur | 17,765 | 185 | 0,096 | | |
| {5}PLAGE | *124,095* | *4* | *31,024* | *320,8059* | *0,000000* |
| PLAGE*GROUPE | 0,552 | 4 | 0,138 | 1,4282 | 0,227433 |
| Erreur | 14,312 | 148 | 0,097 | | |
| SENS*ESTIMATI | 0,032 | 1 | 0,032 | 0,2317 | 0,633088 |
| SENS*ESTIMATI*GROUPE | 0,013 | 1 | 0,013 | 0,0939 | 0,760950 |
| Erreur | 5,122 | 37 | 0,138 | | |
| SENS*DUREE | *0,415* | *5* | *0,083* | *3,3135* | *0,006859* |
| SENS*DUREE*GROUPE | 0,216 | 5 | 0,043 | 1,7224 | 0,131447 |
| Erreur | 4,631 | 185 | 0,025 | | |
| ESTIMATI*DUREE | *0,323* | *5* | *0,065* | *3,4704* | *0,005065* |
| ESTIMATI*DUREE*GROUPE | 0,072 | 5 | 0,014 | 0,7693 | 0,573019 |
| Erreur | 3,439 | 185 | 0,019 | | |
| SENS*PLAGE | *0,956* | *4* | *0,239* | *5,9710* | *0,000176* |
| SENS*PLAGE*GROUPE | 0,144 | 4 | 0,036 | 0,8995 | 0,465988 |
| Erreur | 5,925 | 148 | 0,040 | | |
| ESTIMATI*PLAGE | *0,356* | *4* | *0,089* | *4,4771* | *0,001917* |
| ESTIMATI*PLAGE*GROUPE | 0,178 | 4 | 0,044 | 2,2372 | 0,067744 |
| Erreur | 2,943 | 148 | 0,020 | | |
| DUREE*PLAGE | *1,318* | *20* | *0,066* | *3,6211* | *0,000000* |
| DUREE*PLAGE*GROUPE | 0,568 | 20 | 0,028 | 1,5594 | 0,056273 |
| Erreur | 13,465 | 740 | 0,018 | | |
| SENS*ESTIMATI*DUREE | 0,199 | 5 | 0,040 | 1,9197 | 0,092994 |
| SENS*ESTIMATI*DUREE*GROUPE | 0,058 | 5 | 0,012 | 0,5633 | 0,728077 |
| Erreur | 3,831 | 185 | 0,021 | | |
| SENS*ESTIMATI*PLAGE | *0,185* | *4* | *0,046* | *2,4819* | *0,046312* |
| SENS*ESTIMATI*PLAGE*GROUPE | 0,004 | 4 | 0,001 | 0,0501 | 0,995244 |
| Erreur | 2,763 | 148 | 0,019 | | |
| SENS*DUREE*PLAGE | 0,466 | 20 | 0,023 | 1,4911 | 0,076757 |
| SENS*DUREE*PLAGE*GROUPE | 0,316 | 20 | 0,016 | 1,0119 | 0,444962 |
| Erreur | 11,569 | 740 | 0,016 | | |
| ESTIMATI*DUREE*PLAGE | 0,306 | 20 | 0,015 | 0,9146 | 0,568426 |
| 3*4*5*1 | 0,220 | 20 | 0,011 | 0,6556 | 0,870612 |
| Erreur | 12,399 | 740 | 0,017 | | |
| SENS*ESTIMATI*DUREE*PLAGE | *0,568* | *20* | *0,028* | *1,6314* | *0,040048* |
| 2*3*4*5*1 | 0,300 | 20 | 0,015 | 0,8620 | 0,636807 |
| Erreur | 12,876 | 740 | 0,017 | | |



Figure B.1 – *Analyse ANOVA sur le logarithme des données brutes et sur tous les sujets. Les effets significatifs sont notés en rouge.*

| **Paramètre** | **Analyse** |
|---|---|
| Sens | Ce qui est appelé sens ici est la direction dans laquelle l'intensité varie : crescendo ou décrescendo. Ce paramètre est significatif, ce qui nous permet de dire que les jugements ont été différents si le sujet jugeait de sons d'intensité croissante ou des sons d'intensité décroissante. Cet effet va dans le sens d'un jugement globalement plus fort pour les sons croissants et globalement moins fort pour les décrescendos. |
| Durée | Nous voyons grâce à nos analyses ANOVA que ce paramètre est significatif. De façon générale les sujets ont jugé plus forts les sons les plus longs en temps et moins fort les plus courts. |
| Plage | La plage de variation est un paramètre significatif : plus la plage de variation est élevée en intensité et plus le jugement est important. Cet effet est conforme avec les études menées précédemment. |
| Sens*Plage | Le fait que ce croisement de paramètres soit significatif montre que les sujets ont tendance à juger différemment deux sons qui varient dans la même plage mais qui vont dans un sens différent. Cet effet va dans le sens d'un jugement moins important pour les décrescendos à plage de variation identique. Par exemple un son croissant variant de 65dB à 80dB sera jugé moins fort qu'un son décroissant variant entre 80dB et 65dB. |
| Durée*Plage | Le fait que ce couple de paramètres soit significatif nous montre qu'à plage de variation identique un son plus long sera jugé plus fort qu'un son plus court. |

Figure B.2 – *Tableau récapitulatif des effets significatifs. Merci Qui ? Non, merci Guy.*