



HAL
open science

La sonie des sons impulsionnels : perception, mesures et modèles

Isabelle Boulet

► **To cite this version:**

Isabelle Boulet. La sonie des sons impulsionnels : perception, mesures et modèles. Acoustique [physics.class-ph]. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2005. Français. NNT : . tel-00009870

HAL Id: tel-00009870

<https://theses.hal.science/tel-00009870>

Submitted on 1 Aug 2005

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.

THESE de DOCTORAT
de l'UNIVERSITE de la MEDITERRANNEE AIX-MARSEILLE II

Spécialité :
MECANIQUE

Option :
ACOUSTIQUE

Sujet de la thèse :

**LA SONIE DES SONS IMPULSIONNELS :
PERCEPTION, MESURES ET MODELES**

Présentée par

Isabelle BOULLET

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITE de la MEDITERRANNEE AIX-MARSEILLE II

Soutenue le 17 juin 2005
devant la commission d'examen composée de :

Michel BERENGIER (LCPC, Nantes)
Patrick BOUSSARD (GENESIS, Aix en Provence)
Georges CANEVET (LMA, Marseille)
Sabine MEUNIER (LMA, Marseille)
Etienne PARIZET (INSA, Lyon)
Patrick SUSINI (IRCAM, Paris)
Reinhard WEBER (Université d'Oldenburg, Allemagne)

Président
Directeur de thèse
Co-directrice de thèse
Rapporteur
Rapporteur

Au souvenir de mes grands parents

Remerciements

Ce travail de recherche est le fruit d'une collaboration scientifique entre la société GENESIS et l'équipe APIM du CNRS-LMA.

Je tiens à remercier Patrick Boussard, directeur de la société GENESIS et sans qui cette thèse n'aurait pas eu lieu, de m'avoir amenée vers la psychoacoustique et fait découvrir le monde industriel, riche en enseignements professionnels et personnels.

Je souhaite remercier tout particulièrement Sabine Meunier pour sa confiance, son écoute, son soutien, sa disponibilité et ses lectures critiques.

Je remercie Georges Canévet pour sa générosité scientifique et aussi pour ses lectures critiques.

Je tenais aussi à remercier Etienne Parizet et Reinhard Weber pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail de thèse. Un grand merci s'adresse aussi à Michel Bérengier pour avoir présider le Jury ainsi qu'à Patrick Susini d'avoir accepté de faire partie du Jury.

J'aimerais remercier Mélanie Cortinovis, Florence Demirdjian, Benoit Jacquier, Florent Jaillet, Mathieu Lavandier, Valérie Lefebvre, Gregory Pallone, Guy Rabau, Fabrice Gagneux, Michèle Laurent, Xavier Régal et Alain Marchioni, qui m'ont accompagnée, à GENESIS ou au sein de l'équipe APIM, pour tous les échanges scientifiques, administratifs et personnels qui ont été enrichissants et chaleureux.

Je remercie tout particulièrement Jeremy Marozeau pour son aide et son soutien durant les derniers mois de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes qui ont pris de leur temps pour venir passer les nombreux tests.

Un grand merci aussi à toutes celles et à tous ceux qui m'ont écoutée, encouragée, soutenue, supportée et amusée : Bruno, Alena, Valé, Laurent, le petit Théo, Sand, Jo, le petit Johan, Ute, Nath, Flo, à tout le dea2k (un clin d'œil à ma binôme), Nico mon frère, la Peñã, les fêtards de Villeveyrac, avec un merci tout spécial à Monisa.

Un grand merci s'adresse à mes parents qui, non seulement m'ont laissée libre de mes choix et de choisir ma voie, mais m'ont aussi aidée à les réaliser, à me réaliser.

Enfin, merci à ma bonne étoile qui m'a permis d'être entourée de gens formidables...

Résumé

La sonie, intensité subjective d'un son est un paramètre psychoacoustique primordial dans l'évaluation de la gêne et dans les études sur la qualité sonore. Il existe à l'heure actuelle des modèles qui estiment bien la sonie de sons stationnaires, tels ceux de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997). D'autres modèles (Zwicker et Fastl (1999) et Glasberg et Moore (2002)) existent pour calculer la sonie en fonction du temps mais présentent certaines limites pour donner la sonie globale de sons non stationnaires et en particulier de sons impulsionnels. Le but de ce travail de thèse est d'étudier la sonie de sons impulsionnels afin de pouvoir en proposer un estimateur pour éviter de mettre en œuvre des tests psychoacoustiques longs et onéreux, seul moyen aujourd'hui de connaître précisément la sonie de tels sons. L'originalité de ce travail a été de s'intéresser à des sons impulsionnels possédant une attaque rapide, pas de palier et une décroissance de forme exponentielle. Le choix de ces sons est basé sur l'observation de sons naturels que nous avons pu recenser dans notre environnement sonore. Un premier algorithme (ESI) a été proposé pour calculer la sonie à partir de caractéristiques physiques du signal telles que l'énergie et le temps de descente. Nous avons déterminé les lignes isosoniques, les fonctions de sonie et l'intégration temporelle de sons impulsionnels pour, non seulement déterminer les relations entre la sonie et les paramètres physiques du signal (fréquence, niveau et durée), mais aussi tester les modèles et en déterminer les domaines d'application. Les résultats de nos recherches étant en partie dédiés au domaine industriel et à la métrologie, nous nous sommes principalement intéressés au niveau d'isotonie, exprimé en phones. En effet, cette unité est plus pratique car elle est plus proche du niveau de pression, exprimé en dB SPL ou en dB(A), utilisé plus fréquemment. Nous avons donc déterminé la méthode de mesure du niveau d'isotonie la mieux adaptée à nos types de sons. Ainsi, la méthode d'ajustement a été retenue parmi quatre autres méthodes, pour sa fiabilité, sa stabilité et sa rapidité. Toutes ces données ont contribué à déterminer des domaines d'application et des limites des modèles de sonie déjà proposés et de notre nouvel estimateur ainsi qu'à proposer un nouvel indice (Nimp), calculé à partir du modèle de Zwicker et Fastl (1999), pour donner une première approximation du niveau d'isotonie de sons impulsionnels.

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
RESUME	6
TABLE DES MATIERES	7
I- INTRODUCTION	11
II- LA SONIE : DE QUELS FACTEURS DEPEND-ELLE ? COMMENT LA MESURE-T-ON ?	15
II-1 LA SONIE DES SONS STATIONNAIRES	16
II-1.1 <i>Sonie en fonction de l'intensité</i>	16
II-1.2 <i>Sonie en fonction de la fréquence</i>	19
II-1.3 <i>La sonie en fonction de la durée</i>	20
II-2 LA SONIE DES SONS IMPULSIONNELS	20
II-2.1 Définition	20
II-2.2 Facteurs influençant la sonie des sons impulsionnels	20
II-3 SONIE DES SONS STATIONNAIRES ET NON STATIONNAIRES DE DUREE MOYENNE OU LONGUE	25
II-3.1 <i>Adaptation de sonie</i>	25
II-3.2 <i>Sonie de séquences sonores (effet de mémoire)</i>	26
II-3.3 <i>Décrutement</i>	26
II-4 MESURE DE LA SONIE	26
II-5 CONCLUSION	28
III- LES MODELES DE SONIE	31
III-1 DESCRIPTION DES MODELES DE SONIE.....	31
III-1.1 <i>Sonie des sons stationnaires</i>	31
III-1.2- <i>Sonie des sons non stationnaires</i>	40
III-2 COMPARAISON DES MODELES DE SONIE SUR DES SONS DE L'ENVIRONNEMENT.....	43
III-2.1 <i>Sons stationnaires</i>	43
III-2.2 <i>Sons non stationnaires et impulsionnels de l'environnement (bruits de chantier)</i>	45
III-2.2.1 Enregistrements des bruits de chantier	45
III- 2.2.2 Mesure du niveau d'isotonie	46
III-2.2.3 Comparaison des niveaux d'isotonie mesurés et calculés	48
III-3 INTRODUCTION DES INDICES UTILISES POUR EVALUER LES MODELES DE SONIE.....	50
III-4 CONCLUSION	51
IV- UN ESTIMATEUR DE SONIE POUR LES SONS IMPULSIONNELS	53
IV-1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SONS IMPULSIONNELS.....	53
IV-2 ESTIMATEUR DE SONIE DE SONS IMPULSIONNELS	55
IV-2.1 <i>Stimuli</i>	55
IV-2.2 <i>Auditeurs</i>	56
IV-2.3 <i>Dispositif expérimental</i>	57
IV-2.4 <i>Procédure</i>	57
IV-2.5 <i>Résultats</i>	57
IV-3 INFLUENCE DE LA DUREE DE DECROISSANCE EN FONCTION DU NIVEAU ET DE LA FREQUENCE.....	60

IV-3.1 Stimuli	60
IV-3.2 Résultats	61
IV-4 TEST DE L'ESTIMATEUR DE SONIE D'IMPULSION	64
IV-4.1 Stimuli	64
IV-4.2 Auditeurs	64
IV-4.3 Dispositif expérimental	64
IV-4.4 Procédure	64
IV-4.5 Résultats	65
IV-5 CONCLUSION	67
V- COMPARAISON DE METHODES DE MESURE DU NIVEAU D'ISOSONIE POUR DES SONS STATIONNAIRES, DES SONS IMPULSIONNELS ET DES TRAINS D'IMPULSIONS	69
V-1 METHODE	69
V-1.1- Stimuli	69
V-1.2- Auditeurs	71
V-1.3- Dispositif expérimental	71
V-1.4- Procédures	71
V-1.5- Analyse des données	74
V-2 RESULTATS ET DISCUSSION	74
V-2.1 Cohérence des méthodes	75
V-2.2 Précision des méthodes	77
V-2.3 Fiabilité de la méthode d'ajustement	80
V-3 CONCLUSION	81
VI- LIGNES ISOSONNIQUES ET FONCTIONS DE SONIE DE SONS IMPULSIONNELS	83
VI-1 LIGNES ISOSONNIQUES DE SONS IMPULSIONNELS	83
VI-1.1 Stimuli	84
VI-1.2 Dispositif expérimental	85
VI-1.3 Auditeurs	85
VI-1.4 Procédure	85
VI-1.5 Résultats et discussion	86
VI-1.6 Conclusion sur l'étude des lignes isosoniques de sons impulsionnels	89
VI-2 FONCTIONS DE SONIE DE SONS IMPULSIONNELS : INFLUENCE DE LA DUREE ET DE LA FREQUENCE	89
VI-2.1 Stimuli	90
VI-2.2 Dispositif expérimental	90
VI-2.3 Auditeurs	90
VI-2.4 Procédure	90
VI-2.5 Résultats et discussion	91
VI-2.5.1 Influence de la durée	91
VI-2.5.2 Influence de la fréquence	93
VI-2.5.3 Conclusion sur l'étude des fonctions de sonie de sons impulsionnels	94
VI-3 CONCLUSION GENERALE	95
VII- INTEGRATION TEMPORELLE DE LA SONIE EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA FORME DU DECOURS TEMPOREL	97
VII-1 PREMIERE EXPERIENCE : INFLUENCE DE LA FREQUENCE ET DU DECOURS TEMPOREL	97
VII-1.1 Stimuli	97

<i>VII-1.2 Auditeurs</i>	99
<i>VII-1.3 Procédure</i>	99
<i>VII-1.4 Dispositif expérimental</i>	99
<i>VII-1.5 Résultats et discussion</i>	99
<i>VII-1.6 Conclusion</i>	101
VII-2 DEUXIEME EXPERIENCE : DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA DUREE CRITIQUE DE CRENEAUX ET D'IMPULSIONS.....	102
<i>VII-2.1 Stimuli</i>	102
<i>VII-2.2 Auditeurs</i>	102
<i>VII-2.3 Procédure</i>	103
<i>VII-2.4 Dispositif expérimental</i>	103
<i>VII-2.5 Résultats et discussion</i>	103
VII-2.5.1 Intégration temporelle de la sonie de créneaux.....	104
VII-2.5.2 Intégration temporelle de la sonie d'impulsions.....	105
VII-3 CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE SUR L'INTEGRATION TEMPORELLE DE CRENEAUX ET D'IMPULSIONS.....	107
VIII- DOMAINE D'APPLICATION DES MODELES ET ESTIMATEURS DE SONIE	109
VIII-1 ETUDE DES MODELES DE SONIE SUR DES DONNEES EXPERIMENTALES DE LA LITTERATURE POUR DES SONS STATIONNAIRES.....	110
<i>VIII-1.1 Fonctions de sonie de sons stationnaires</i>	110
<i>VIII-1.2 Lignes isosoniques de sons stationnaires</i>	113
<i>VIII-1.3 Influence de la largeur de bande de sons stationnaires</i>	117
VIII-2 ETUDE DES MODELES DE SONIE SUR LES DONNEES EXPERIMENTALE DU TRAVAIL DE THESE.....	119
<i>VIII-2.1 Lignes isosoniques de sons impulsionnels</i>	119
<i>VIII-2.2 Intégration temporelle</i>	122
<i>VIII-2.3 Domaine d'application des modèles de sonie en fonction du type de sons</i>	133
VIII-3 CONCLUSION.....	136
IX- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	139
RÉFÉRENCES	145
ANNEXE I : VALORISATION DE LA THESE	151
ANNEXE II : PUBLICATIONS PERSONNELLES	153
SUMMARY	156

I

INTRODUCTION

Bruits de transport, bruits de voisinage, bruits liés aux activités industrielles et commerciales... de nombreuses sources de bruit nous entourent. Le bruit est une des principales nuisances dont se plaignent les Français. A l'heure actuelle, un des moyens pour quantifier la gêne perçue est de déterminer le niveau de pression acoustique d'un signal, mesuré en décibels (Sound Pressure Level en anglais, d'où la notation de dB SPL qui sera fréquemment utilisée dans ce document). Mais si l'on s'intéresse au niveau sonore réellement perçu par l'être humain, alors cette mesure physique ne suffit plus. En effet, lorsqu'on entend un bruit, plusieurs phénomènes physiologiques, réalisés au niveau de notre système auditif (voir chapitre II), contribuent à cette intensité sonore que nous percevons et qui s'appelle la sonie.

La sonie est une grandeur subjective et s'exprime en sones. On parlera aussi dans ce qui suit de niveau d'isotonie dont l'unité est le phone. L'échelle des phones est basée sur une échelle physique (voir paragraphe II-1).

En tant que grandeur subjective, la sonie est mesurée par des méthodes psychoacoustiques qui seront exposées dans le chapitre II. Pour évaluer la sonie, des grandeurs physiques ont été utilisées, comme le dB(A), en tenant compte des variations de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence. Le dB(A) ne tient pas compte d'autres phénomènes physiologiques, comme le masquage fréquentiel ou le fonctionnement de l'oreille comme un banc de filtres, et reste insuffisant pour estimer correctement la sonie. Il n'existe malheureusement pas à ce jour de modèle scientifique validé pour calculer la sonie globale de n'importe quel type de son, en particulier s'il est impulsionnel.

La détermination de la sonie, intensité subjective d'un son, est essentielle pour évaluer la gêne de signaux acoustiques. En effet, plusieurs études ont été recensées sur l'importance de la sonie dans l'évaluation de la gêne (Berglund, 1990 ; Parizet et coll., 1996 ; Meunier et Marchioni, 1998 ; Bouillet et Boussard, 2001). Parmi elles, celles réalisées sur des types de bruits spécifiques tels que des bruits de voisinage, des bruits de chantier ou encore des bruits de transport (trafic routier ou ferroviaire) ont confirmé que le niveau de gêne s'explique essentiellement par l'intensité perçue du bruit (Lévy-Leboyer, 1988). En ce qui concerne les signaux sonores impulsionnels, la sonie est encore admise comme un des facteurs importants du désagrément (Cops et Myncke, 1976). Nous donnons ici, à titre d'exemple, un résultat obtenu dans le cadre d'une étude que nous avons réalisée avec la société GENESIS (financée par l'ADEME pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) sur la gêne des bruits de chantier. Cette étude aussi a montré que la sonie est un facteur prédominant dans l'évaluation de la gêne.

Lors de cette étude, trente auditeurs ont réalisé deux types de tests dans la salle anéchoïque du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) du CNRS à Marseille. Le premier était une

mesure de la gêne par une méthode de catégories sur une échelle continue à sept points (Guski, 1997). La tâche de l'auditeur était d'estimer la gêne occasionnée par un bruit de chantier en déplaçant un curseur sur une échelle continue allant de 1 à 7. Pour chaque bruit, le curseur était initialement placé sur 4 (la position 4 traduisait une position moyennement gênante). Le second test était une mesure de la sonie, par une méthode d'ajustement avec un son de comparaison de sonie connue (bande de bruit centrée sur 1 kHz de largeur 160 Hz). Dans ce test, l'auditeur entendait successivement le bruit de chantier (son test) dont le niveau restait fixe et le son de comparaison dont il pouvait modifier le niveau. La tâche de l'auditeur consistait à ajuster le deuxième son (bande de bruit) pour qu'il ait la même sonie que le bruit de chantier. Ce test a aussi eu lieu dans l'autre sens, c'est-à-dire que ce n'était plus la bande de bruit qui avait un niveau variable (contrôlé par l'auditeur) mais le bruit de chantier, qui était alors présenté en second. La bande de bruit était présentée au niveau correspondant à celui du bruit de chantier estimé lors du premier test. Le niveau d'isotonie était la moyenne des niveaux d'isotonie obtenus pour chaque ordre de présentation.

La figure I-1 représente la gêne estimée en fonction du niveau d'isotonie de chacun des trente bruits de chantier. Le coefficient de corrélation entre la gêne estimée et le niveau d'isotonie mesuré par les auditeurs est de 0,95 (figure I-1). Cela montre que, pour les bruits de chantier, le niveau d'isotonie est un bon estimateur de la gêne.

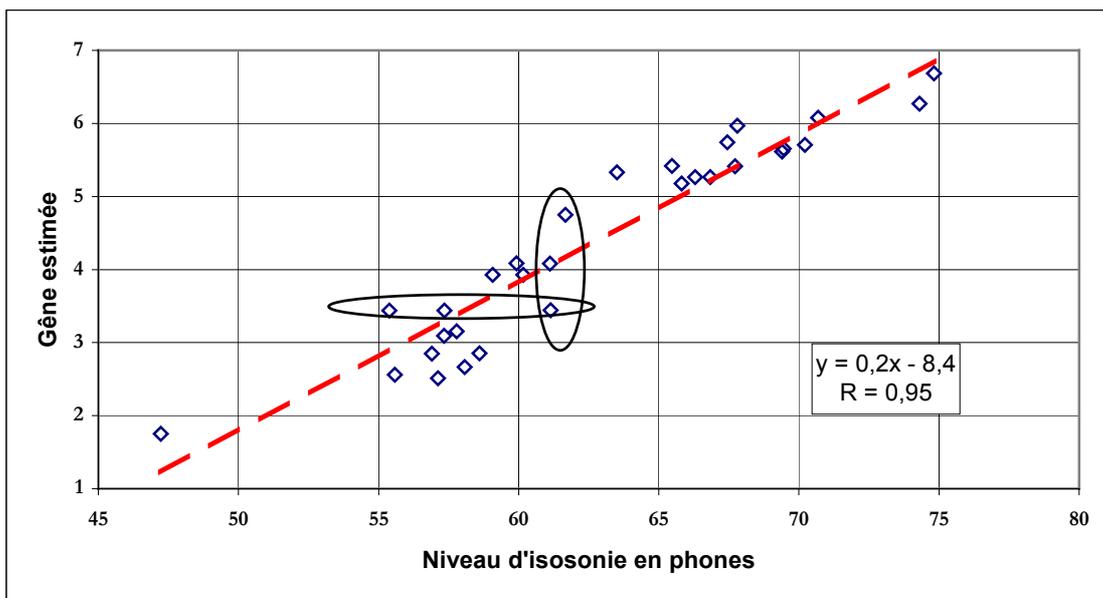


Figure I-1 : Chaque losange représente la gêne estimée en fonction du niveau d'isotonie mesuré d'un bruit de chantier. L'échelle de la gêne est une échelle continue (1 correspondait à « pas du tout gênant » et 7 : « extrêmement gênant ») (Boullet et Boussard, 2001).

Cependant, d'autres indicateurs psychoacoustiques entrent en jeu lors de l'évaluation de la gêne. Par exemple, sur la figure I-1, les points entourés par l'ellipse « verticale » correspondent à des signaux de sonies voisines mais ayant procuré une gêne différente. Pour les bruits de même sonie, le plus gênant correspond à un bruit aigu (scie circulaire), celui du milieu (coups de marteaux) est un bruit riche en basses fréquences et le moins gênant (entonnoir en fer pour couler le béton) est un bruit qui présente une énergie spectrale riche dans les moyennes fréquences. Ceci semblerait confirmer que, pour des bruits de sonies voisines, plus un bruit est aigu plus il est gênant d'une part, et que les sons graves sont moins gênants que les sons aigus mais plus gênants que les sons médiums d'autre part (Meunier et Marchioni, 1998). La gêne est cependant complexe à

déterminer et dépend, en plus de la sonie, d'autres facteurs comme le timbre (acuité, rugosité), l'évolution temporelle (rythme de répétition d'impulsions) et la représentation cognitive d'un son.

La sonie est aussi un indicateur très influent dans les études sur la qualité sonore (Fastl, 1997 ; Ohta et coll., 1999). Par exemple, si on teste la qualité d'enceintes acoustiques, la sonie est une des dimensions mise en évidence lors d'un jugement de dissemblance (Gabrielson et Sjögren, 1979). Pour une analyse plus fine des dimensions reflétant une différence qualitative, il est important de réaliser des tests à sonie égalisée. Il est donc nécessaire de connaître la sonie des signaux testés.

La sonie a fait l'objet de nombreuses études, d'une part pour connaître les processus auditifs de sa formation et savoir de quels facteurs physiques elle dépend, d'autre part pour déterminer des procédures expérimentales pour la mesurer et enfin pour pouvoir la calculer à partir d'algorithmes. Ces études ont, pour la plupart, été réalisées principalement sur des sons stationnaires et quasi stationnaires et des modèles de sonie ont été proposés pour ces types de sons. Ces vingt dernières années, l'intérêt des auteurs s'est porté plus particulièrement sur les sons non stationnaires et les recherches se sont intensifiées sur ce sujet avec la croissance des études sur la qualité sonore. Il existe aujourd'hui des modèles permettant de calculer la sonie en fonction du temps (Zwicker (1977) actualisé par Zwicker et Fastl (1999) et Galsberg et Moore (2002)) en tenant compte du masquage temporel. Ces auteurs préconisent aussi l'utilisation d'indices statistiques pour approcher la sonie globale, mais ces indicateurs ont aussi montré certaines limites (voir paragraphe III-2.2). En ce qui concerne les sons de très courtes durées, cas particulier de sons non stationnaires, les études restent rares et il n'existe pas à ce jour de modèle de sonie validé pour ce type de sons pourtant très présents dans notre environnement sonore.

Mon travail de thèse a pour but de caractériser la perception du niveau sonore de sons de courtes durées (sons impulsionnels) et de contribuer à l'élaboration d'outils permettant le calcul fiable et rapide de la sonie.

Pour mener à bien ce projet nous nous appliquerons à faire un état de l'art (chapitre II) pour synthétiser les connaissances sur la sonie des sons impulsionnels et orienter nos axes de recherche. Par ailleurs, une description et une comparaison des modèles de sonie existants nous permettront de cerner les limites de ces modèles et ainsi de fixer ce que nous pourrions améliorer pour une meilleure estimation de la sonie des sons non stationnaires et en particulier des sons impulsionnels (chapitre III).

Après avoir caractérisé d'un point de vue physique la forme générale des sons impulsionnels, nous introduirons un modèle de sonie pour ce type de sons que nous comparerons aux modèles existants (chapitre IV). Quatre méthodes de mesure de la sonie seront ensuite comparées pour différents types de sons (stationnaires, impulsionnels et train d'impulsions) pour déterminer celle qui présentera la variabilité la plus faible (chapitre V). La méthode ainsi retenue sera utilisée pour étudier les phénomènes bien connus en ce qui concerne la sonie des sons stationnaires, mais beaucoup moins concernant les sons impulsionnels, tels les fonctions de sonie, les lignes isosoniques (chapitre VI) et l'intégration temporelle (chapitre VII). Enfin, il s'agira de faire une synthèse des modèles de sonie et de déterminer leurs domaines d'application selon différents critères qui pourraient être la durée, le niveau, la fréquence des sons ou encore le type de son (chapitre VIII).

II

LA SONIE : DE QUELS FACTEURS DEPEND-ELLE ? COMMENT LA MESURE-T-ON ?

D'après la norme ISO 532 B (1975), la sonie est la désignation numérique de la force d'un son, en sones, proportionnelle à sa grandeur subjective estimée par des observateurs normaux. En d'autres termes, c'est le niveau sonore perçu d'un son. La sonie dépend essentiellement du niveau de pression sonore mais aussi de la fréquence et de la durée. La sonie d'un son est ainsi liée au fonctionnement de l'oreille. La figure II-1 représente le schéma du système auditif périphérique humain.

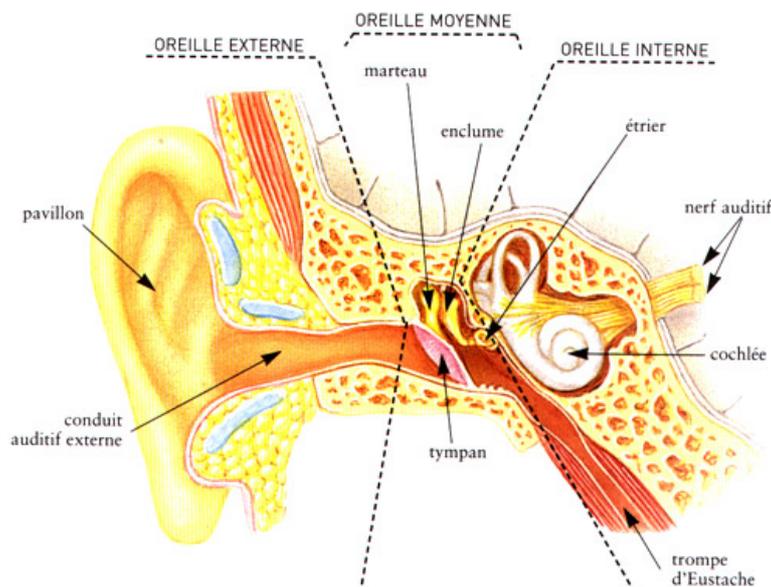


Figure II-1 : Schéma du système auditif périphérique. Le tympan est la limite entre l'oreille externe et l'oreille moyenne. La fenêtre ovale, sur laquelle s'appuie l'étrier, sépare l'oreille moyenne de l'oreille interne.

Un son est tout d'abord transmis à l'oreille externe. Le pavillon et le conduit auditif agissent sur l'amplitude de la vibration sonore (gain acoustique). Le son est filtré et chaque fréquence du spectre est plus ou moins amplifiée. Ce signal acoustique est ensuite transformé en vibrations mécaniques à l'intérieur de l'oreille moyenne (tympan, osselets, fenêtre ovale) qui joue le rôle d'adaptateur d'impédance pour éviter de trop grandes pertes d'énergie au passage dans l'oreille interne (cochlée). Ces vibrations sont alors transmises à l'intérieur de la cochlée jusqu'à la membrane basilaire, jouant le rôle d'analyseur spectral, où se passent des phénomènes responsables du masquage fréquentiel. La vibration mécanique est ensuite transformée en

impulsions nerveuses à l'intérieur de l'organe de Corti par les cellules ciliées internes et externes. Cet influx nerveux est enfin transmis par le nerf auditif au cerveau et décodé par ce dernier.

Après ce rapide aperçu des différentes étapes parcourues par un son au travers du système auditif pour que nous l'entendions, nous allons nous appliquer à faire le point des connaissances sur la sonie. Dans un premier temps, un rapide rappel sera fait concernant les facteurs influençant la sonie des sons stationnaires. Ensuite, un point plus détaillé portera sur la sonie des sons impulsionnels. On abordera aussi la sonie de sons de durées supérieures à quelques secondes. Et enfin nous décrirons les principales méthodes de mesure de la sonie.

II-1 La sonie des sons stationnaires

Depuis les années 1950, la sonie des sons stationnaires a fait l'objet de nombreuses études. Dans cette partie, nous allons en rappeler les principaux résultats.

La sonie s'exprime en sones, unité basée sur une échelle sensorielle établie à partir de méthodes directes (Stevens, 1956) qui consistent à demander aux auditeurs de choisir des nombres proportionnels à la sonie des sons présentés. Par convention, la valeur de 1 sone est la sonie d'un son pur de 1000 Hz à 40 dB SPL. Un son de 2 sones est perçu deux fois plus fort qu'un son de 1 sone. On peut aussi mesurer la sonie d'un son test par comparaison à un son pur de référence de 1000 Hz. On obtient alors le niveau d'isotonie en phones, qui est le niveau en dB SPL que doit avoir le signal de référence pour que les deux sons (son test et son de référence) aient la même sonie. L'échelle des phones, établie à partir de méthodes de comparaison (Fletcher et Munson, 1933), coïncide avec l'échelle des dB SPL pour un son pur de 1000 Hz (voir II-1.1).

II-1.1 Sonie en fonction de l'intensité

La sonie dépend essentiellement de l'intensité acoustique. La relation entre l'intensité et la sonie est appelée fonction de sonie. Elle a été établie expérimentalement par Stevens, en faisant estimer la sonie d'un son de 1000 Hz à différents niveaux de pression acoustique. La relation entre la sonie (S) en sones et la pression (P) en Pascals, ou l'intensité (I) ($I=P^2/\rho c$: avec ρ la densité de l'air et c la célérité du son dans l'air) en watts par mètre carré, est une simple fonction puissance pour des niveaux supraliminaires (relation II-1).

L'équation de la fonction de sonie d'un son pur de 1000 Hz, pour des niveaux d'isotonie supérieurs à 30 phones, est :

$$S \text{ (sones)} = k P^{0,6} = \ell I^{0,3} \quad (\text{II-1})$$

Pour déterminer k, on pose S=1 sone à 40 dB SPL. Nous obtenons alors, si P est en micropascal, $k = 1 / (20 * 10^{40/20})^{0,6}$, soit k = 0,01.

La relation II-1 permet de calculer le niveau d'isotonie à partir de la sonie. En effet, en prenant le logarithme de la sonie, multiplié par 20, nous pouvons écrire :

$$20 \log(S) = 20 \log(kP^{0,6}) \quad (\text{a})$$

Si on considère P_0 la pression acoustique de référence et S_0 la sonie équivalente à cette pression, on obtient :

$$20 \log(S_0) = 20 \log(kP_0^{0,6}) \quad (b)$$

Soit, si on soustrait (b) à (a) :

$$20 \log(S) - 20 \log(S_0) = 0,6 * 20 \log((P/P_0)) \quad (a)-(b)=(c)$$

$$\text{or } 20 \log((P/P_0)) = L$$

avec L le niveau de pression acoustique, égal au niveau d'isotonie pour un son pur de 1000 Hz.

Si $L=40$ dB SPL alors $S=1$ sone alors (par convention). La relation (c) devient :

$$20 \log(S_0) = - 0,6 * 40$$

En introduisant la valeur de S dans la relation (c), on obtient :

$$20 \log(S)/0,6 + 40 = L \quad (d)$$

Si on pose 0,3 environ égal à $\log(2)$, la relation (d) devient :

$$10 \log(S)/\log(2) + 40 = L$$

$$\text{soit } \mathbf{L = 40 + 10 \log_2(S)} \quad (II-1')$$

Pour des niveaux d'isotonie inférieurs à 30 phones, la sonie d'un son pur de 1000 Hz croît plus rapidement avec le niveau de pression acoustique que pour des niveaux supérieurs à 30 phones. La relation entre la sonie et la pression (ou l'intensité) dépend de la valeur de pression P_0 à partir de laquelle la sonie commence à croître. La relation II-1 a ainsi été proposé (Scharf, 1978) :

$$\mathbf{S \text{ (sones)} = k (P-P_c)^{0,6} = \ell (I-I_c)^{0,3}} \quad ; \quad (II-2)$$

Les constantes k et ℓ dépendent de la fréquence. P_c est la valeur de la pression à partir de laquelle la sonie commence à augmenter effectivement (égal à 45 μ Pa à 1 kHz).

L'exposant de la fonction de sonie, étant égal à 0,6, une augmentation de 10 dB du niveau provoque un doublement de la sonie. Par exemple, si la sonie à 40 dB est de 1 sone, elle est de 2 sonas à 50 dB, de 4 sonas à 60 dB etc.

Pour des sons purs de fréquences différentes de 1000 Hz, la fonction de sonie diffère de celle définie par II-1. Par exemple, les fonctions de sonie de sons purs à 100 et 250 Hz commencent pour des niveaux plus élevés, puisque le seuil d'audition est plus élevé à ces fréquences, que la fonction de sonie à 1 kHz et rejoignent celle-ci pour des niveaux supérieurs à 80 dB SPL. Pour les sons purs de fréquences supérieures à 1000 Hz, les fonctions de sonie sont quasi parallèles à celle du son pur à 1000 Hz mais avec des seuils différents (voir figure II-2).

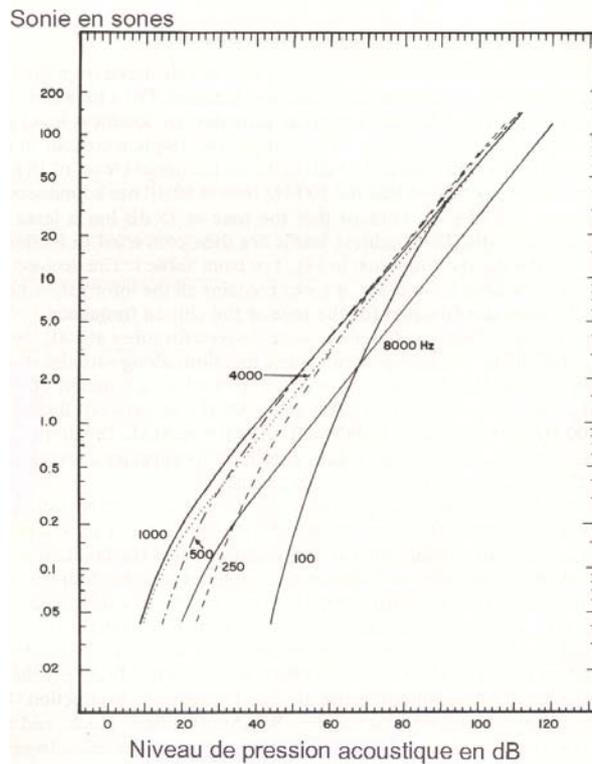


Figure II-2 : Fonctions de sonie de sons purs de plusieurs fréquences : 100, 250, 500, 1000, 4000 et 8000 Hz (D'après Scharf, 1978).

Pour des sons plus complexes, un bruit blanc par exemple, la fonction de sonie n'est pas une fonction puissance du niveau en dB SPL (voir figure II-3). Pour des niveaux faibles, la sonie du bruit blanc croît plus vite que celle d'un son pur de 1 kHz, alors que pour des niveaux supérieurs à 60 dB SPL elle croît moins vite en fonction du niveau en dB SPL.

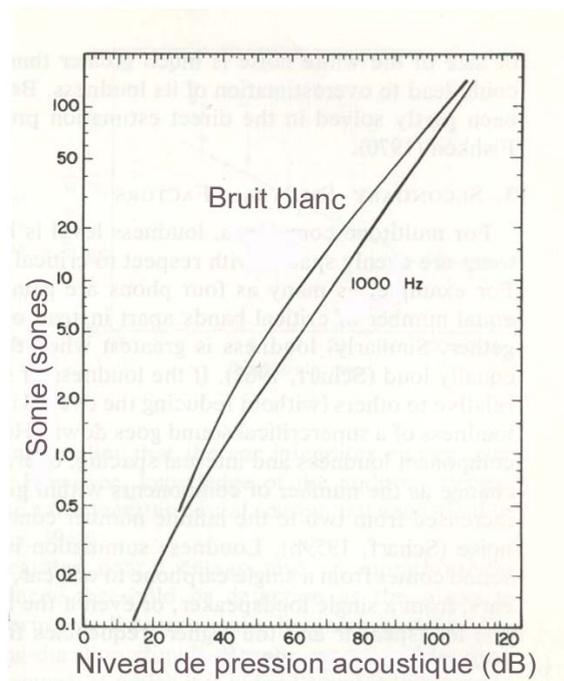


Figure II-3 : Fonctions de sonie d'un son pur de 1000 Hz et d'un bruit blanc (D'après Scharf, 1978).

II-1.2 Sonie en fonction de la fréquence

Les variations de la sonie avec la fréquence peuvent être observées sur la figure II-4. La courbe en pointillés représente la courbe du seuil d'audition en champ libre. Chaque ligne représente le niveau que doit avoir un son pur pour conserver une sonie constante en fonction de la fréquence. Par exemple, un son pur à 100 Hz de 50 dB a la même sonie qu'un son pur de 1 kHz à 40 dB, soit un niveau d'isophonie de 40 phones.

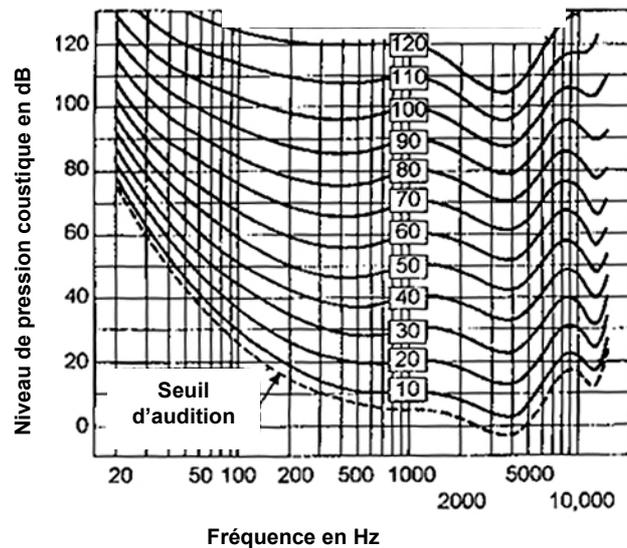


Figure II-4 : Lignes isophoniques (Robinson et Dadson, 1956). L'échelle des phones coïncide avec l'échelle des dB SPL pour un son de 1000 Hz.

Dans le cas des sons complexes, la sonie dépend aussi de la largeur spectrale du son. À intensité constante, la sonie augmente avec la largeur spectrale. Mais cette augmentation n'apparaît que lorsque la largeur dépasse une certaine valeur dépendant de la fréquence. Cette largeur spectrale est appelée bande critique. La notion de bande critique modélise le mécanisme de filtrage de l'oreille interne. La figure II-5 illustre à ce sujet un résultat classique de Zwicker et Feldtkeller (1981) sur la sonie d'une bande de bruit en fonction de sa largeur spectrale.

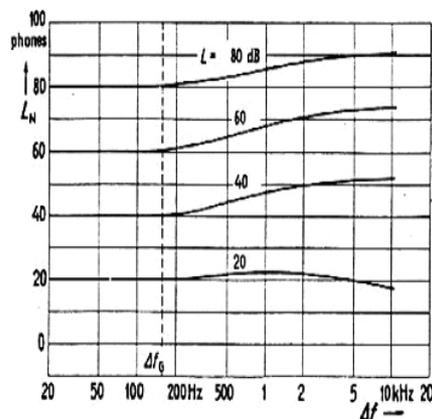


Figure II-5 : Niveaux d'isophonie de bandes de bruit centrées sur 1 kHz, en fonction de leurs largeurs spectrales et pour diverses valeurs du niveau de pression acoustique global L . La ligne verticale en pointillés situe la limite d'une bande critique à 1 kHz (Zwicker et Feldtkeller, 1981) et correspond à 160 Hz.

Cette notion de filtrage auditif a été revue par Moore et Glasberg (1983). Au lieu d'utiliser le modèle de bandes critiques, ils introduisent la notion de filtre rectangulaire équivalent (ERB), dont la largeur dépend aussi de la fréquence (voir pour plus de détails le paragraphe III-1.1(a)).

II-1.3 La sonie en fonction de la durée

La sonie augmente régulièrement lorsque la durée du son augmente, de quelques millisecondes jusqu'à une valeur critique, appelée durée critique, qui varie de 50 à 400 ms selon les auteurs. Ce phénomène est appelé intégration temporelle (voir paragraphe II-2.2-a et chapitre VII). Au-delà de cette durée critique et jusqu'à des durées de plusieurs secondes, la sonie reste constante. Au-delà de plusieurs secondes, on pourra observer, dans certains cas, une diminution de la sonie avec la durée pour des sons d'amplitude constante. Ce phénomène est appelé adaptation simple (voir II-3.1).

II-2 La sonie des sons impulsionnels

II-2.1 Définition

La norme NF (S31-010, décembre 1996) définit un bruit impulsionnel comme un "bruit consistant en une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique, ayant chacune une durée inférieure à environ 1 s et séparée(s) par des intervalles de temps de durée supérieure à 0,2 s". Cette définition reste imprécise et est encore discutée. Une description de sons impulsionnels « naturels » dans le chapitre IV permettra d'affiner cette définition. Le terme « son impulsionnel naturel » est opposé à « son impulsionnel de synthèse ».

II-2.2 Facteurs influençant la sonie des sons impulsionnels

Pour des sons de durée inférieure à la durée critique, la sonie augmente avec la durée des sons. Cela peut s'expliquer par le fait que l'oreille se comporte comme un intégrateur d'énergie. Cependant des expériences ont montré qu'à énergie constante, il peut aussi apparaître des variations de sonie. La sonie d'un son impulsionnel peut être différente d'un autre son impulsionnel plus long mais de même énergie. Il faut donc, en plus de la quantité d'énergie, s'attacher à rechercher ce qui, dans la forme, modifie la perception des bruits impulsionnels (Rumeau M., 1980). D'autres facteurs sont alors à prendre en compte pour le calcul de la sonie des bruits impulsionnels. On présente dans cette partie une synthèse des travaux réalisés sur les facteurs qui influencent la sonie des sons impulsionnels.

a) Influence de la durée

L'intégration temporelle de la sonie a été étudiée par un grand nombre d'auteurs. Tous sont d'accord pour dire que la sonie augmente avec la durée du stimulus, à amplitude constante, pour des durées inférieures à la durée critique.

En dessous de la durée critique et selon certains auteurs, la relation entre la sonie et la durée peut être décrite par une fonction exponentielle (Pedersen et coll., 1977). Plomb et Bouman (1959) ont proposé une équation pour décrire la relation entre l'intensité d'un son bref et l'intensité d'un son long (relation II-3) pour maintenir une sonie constante lorsque la durée du son court varie (figure II-6) :

$$I(t) = I_{\infty} / (1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{II-3})$$

où $I(t)$ est l'intensité sonore d'un son bref nécessaire pour maintenir une sonie constante lorsque la durée varie, I_{∞} l'intensité asymptotique d'un son de durée longue, t la durée du stimulus et τ la constante de temps qui caractérise le processus d'intégration.

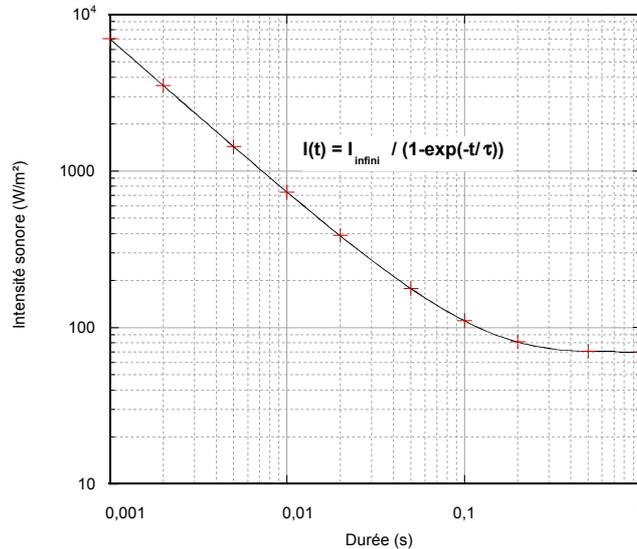


Figure II-6 : Représentation graphique de la relation II-3. En ordonnée est représentée l'intensité sonore que doit avoir un son court pour maintenir une sonie constante en fonction de la durée. Les valeurs de l'intensité sonore sont arbitraires. La durée varie de 0 à 1 seconde. Ici τ vaut 0,1 seconde.

D'autres auteurs ont modélisé l'intégration temporelle par trois fonctions puissance dont l'exposant change selon l'intervalle de temps ($m=1,5$ pour $t < 20$ ms ; $m=1$ pour $20 \text{ ms} < t < 100$ ms et $m=0,5$ pour $t > 100$ ms, selon Green et coll. (1957)) :

$$I(t) \cdot t^m = C \quad (\text{II-4})$$

où $I(t)$ et t ont la même signification que précédemment, C est une constante et m est l'exposant de la fonction puissance qui caractérise la décroissance de l'intensité avec la durée pour maintenir une sonie constante (Green et coll., 1957).

Des différences entre les résultats apparaissent quand il s'agit de déterminer la constante de temps τ et la durée critique, durée à partir de laquelle la sonie d'un son d'amplitude constante ne dépend plus de sa durée. En effet, les valeurs de la constante de temps diffèrent de 23 ms (Niese, 1959) à 120 ms (Boone, 1973). La durée critique, quant à elle, est comprise entre 15 ms (Small et coll., 1962) et 500 ms (Ekman et coll., 1966) selon les auteurs (voir Scharf, 1986). Pour comprendre les écarts entre les valeurs, d'une étude à l'autre, de la constante de temps et de la durée critique, il est important de savoir comment ces deux constantes ont été calculées, par quelle méthode la sonie a été mesurée, quels stimuli ont été testés et avec combien d'auditeurs les tests ont été réalisés.

Une première méthode pour estimer la durée critique consiste à ajuster deux droites. Une des droites correspond à l'ajustement des points expérimentaux pour lesquels la sonie décroît avec la durée, et l'autre correspond à la droite asymptotique correspondant à la sonie d'un son long. La figure II-7 représente le niveau que doit avoir un signal bref, selon sa durée, pour être de même sonie qu'un signal long de référence de 60 dB (Port, 1963). On comprendra que l'ajustement des

droites n'est pas toujours très rigoureux si la valeur asymptotique de la sonie n'est pas clairement atteinte et cela peut entraîner des différences dans l'évaluation de la durée critique.

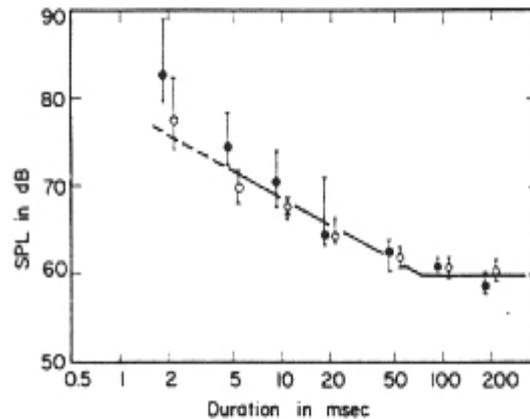


Figure II-7 : Variation du niveau de pression d'une bande de bruit de 1/3 d'octave nécessaire pour maintenir une sonie constante en fonction de la durée du bruit (Port, 1963). Les niveaux d'isosonie ont été obtenus par une méthode d'ajustement. Les ronds pleins représentent un ajustement du son court par rapport au son long (bruit bande étroite de 1,2 s) et les cercles un ajustement du son long pour avoir la même sonie que le son court. La durée critique est ici de 70 ms.

Une autre manière d'étudier l'intégration temporelle est de calculer la constante de temps τ (inférieure à la durée critique) en ajustant les données expérimentales par une fonction exponentielle (relation II-3). Par contre, la relation entre la durée critique et la constante de temps n'est pas clairement définie par les auteurs. En effet, ces derniers utilisent soit la durée critique soit la constante de temps pour décrire l'intégration temporelle, sans préciser ce qu'ils entendent exactement par ces deux termes. Il est donc difficile de préciser, d'après la littérature, le rapport qu'il existe entre les deux. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre VII.

Une divergence des résultats pourrait s'expliquer, selon certains auteurs (Stephens, 1974 ; Florentine et coll., 1996), par l'utilisation de méthodes différentes pour la mesure de la sonie. Les principales méthodes utilisées sont la méthode d'ajustement, la méthode d'estimation directe et la méthode des limites. Cependant, nous pensons que les différences des valeurs de la sonie mesurée, selon la méthode, changeront éventuellement en valeurs absolues mais ne changeront que très peu en valeurs relatives (voir chapitre V). La grande divergence des résultats ne peut donc sans doute pas s'expliquer de manière significative par l'utilisation de plusieurs méthodes de mesure de la sonie mais peut être plus par des conditions expérimentales différentes.

D'après Pedersen et ses collaborateurs (1977), il est difficile de comparer les sonies d'un son bref et d'un son long car leurs timbres peuvent être très différents. Reichardt (1970) a proposé que la durée du son de comparaison soit au plus égale à deux fois la durée du son test.

Un des points important qui différencie les études les unes par rapport aux autres est le type de signaux étudiés. Notons d'une part que l'ensemble des stimuli testés par les différents auteurs avaient des durées comprises entre 0,5 ms et 1s. Cependant, les durées étudiées ne variaient pas toujours entre les mêmes valeurs. Le nombre de points expérimentaux, pour lesquels la sonie ne varie plus avec la durée à amplitude constante, peut alors influencer l'ajustement de la droite asymptotique et entraîner une mesure différente de la durée critique. D'autre part, l'enveloppe temporelle de la quasi-totalité des sons de synthèse étudiés était en forme de créneaux. Cependant, pour une même fréquence testée, l'enveloppe temporelle (voir figure II-8) pouvait

avoir des temps de descente et de montée plus ou moins courts, selon les études (de 0 ms à plusieurs centaines de ms). La forme de l'enveloppe temporelle, et en particulier la forme de l'attaque et de la décroissance, peut entraîner un étalement spectral avec l'apparition de transitoires, pour des durées d'attaque très courtes, et produire ainsi une augmentation de la sonie pour une même structure fine (Garner, 1949). Ceci est un paramètre important à prendre en compte dans le jugement de la sonie de sons d'amplitude constante en fonction de la durée. C'est aussi un facteur de divergence dans les résultats obtenus pour la mesure de la durée critique et le calcul de la constante de temps.



Figure II-8 : Enveloppe temporelle en créneaux avec un temps de montée et de descente en forme de demi-fenêtre de Hanning sur la figure de gauche et un temps de montée et de descente très courts sur la figure de droite.

Un autre paramètre pouvant expliquer les différentes valeurs de la durée critique et de la constante de temps est le nombre de sujets ayant réalisé les tests (trois d'après Miller (1948) et jusqu'à trois cent quatre-vingt-un d'après Pedersen et ses collaborateurs (1977)). Reichardt (1965) a montré qu'il y avait effectivement une grande variabilité interindividuelle. Reichardt et Niese (1970) ont réalisé des tests avec un groupe de cinquante sujets qu'ils ont ensuite divisé en six groupes de dix dont deux étaient communs à chaque groupe. La constante de temps variait alors pour les six groupes de 30 ms à 100 ms et était de 50 ms pour le groupe des cinquante sujets. Garner (1949) a observé, en plus d'une variation interindividuelle, que pour certains sujets il n'y avait pas d'effet significatif de la durée sur la sonie d'un son pur de 1000 Hz dont la durée variait de 10 à 500 ms. La différence avec un autre groupe (avec les mêmes conditions expérimentales), pour lequel la sonie augmentait avec la durée, était d'autant plus marquée que le niveau de pression acoustique était plus élevé. Il n'y a pas d'explication précise de l'auteur sur ce phénomène. On peut supposer que certains auditeurs se basent sur la sonie maximum, correspondant à l'amplitude crête (constante), pour ajuster le niveau du son comparaison.

Malgré toutes ces variabilités, on peut synthétiser quelques résultats. Il a été établi que la durée critique dépend de la fréquence et de l'intensité. D'après Stephens (1974), la durée critique diminue pour des sons de haute fréquence et pour des niveaux élevés. Mais, si cette influence a souvent été montrée dans le cas d'études pour des niveaux proches du seuil, elle ne l'a pas été systématiquement pour des niveaux supraliminaires (Watson et Gengel, 1969 ; Cavé et Chocholle, 1979).

Tous ces paramètres tels que l'enveloppe temporelle, la méthode de mesure de la sonie, la durée du son de comparaison, la variabilité interindividuelle, la méthode de calcul de la constante de temps ou la mesure de la durée critique sont autant de facteurs entraînant une grande divergence concernant la valeur de la constante de temps et de la durée critique.

b) Influence de l'énergie totale d'une impulsion

Les résultats d'études concernant l'influence de l'énergie (intensité \times temps) sur la sonie sont divergents. Scharf (1978) a résumé les résultats obtenus sur seize études.

Selon les études, on trouve que la sonie est constante lorsque la durée augmente jusqu'à la durée critique quand :

- (1) l'énergie est constante (l'intensité décroît de façon inversement proportionnelle à la durée)
- (2) l'énergie diminue (l'intensité décroît plus vite que la durée)
- (3) l'énergie augmente (l'intensité décroît moins vite que la durée)

C'est-à-dire que l'intensité décroît plus ou moins rapidement avec la durée, jusqu'à la durée critique, pour maintenir une sonie constante.

En d'autres termes, pour des sons d'énergie constante, la sonie de sons dont la durée augmente peut, soit être constante (cas 1), soit augmenter (cas 2), soit diminuer (cas 3). Ces différents résultats sont contradictoires et peuvent dépendre des conditions expérimentales. Meunier et Rabau (2002) ont montré qu'à faible niveau, la relation entre la sonie et l'énergie correspond au cas (3) et à fort niveau au cas (1). Cette partie sera développée dans le chapitre IV.

c) Influence du temps de montée

A amplitudes crêtes égales, la sonie des sons dépend de leur temps de montée : les sons semblent moins forts lorsque le temps de montée est plus long. L'influence du temps de montée ne se fait sentir qu'à partir de durées supérieures ou égales à 0,3 ms selon Ross et al. (1968), et 1,5 ms pour Gustaffson (1974). La durée du temps de montée influe sur la largeur spectrale du signal. Plus le temps de montée est court, plus la largeur spectrale s'étale et la sonie est plus forte. L'augmentation de la sonie avec la largeur spectrale pourrait être due à la multiplicité des contributions nerveuses à la réponse auditive. Une baisse d'environ 3 phones a été observée lorsque le temps de montée varie de 0,025 à 1 s pour des sons large bande (Vigran et coll. 1964). Takeshima et coll. (1988) ont trouvé une diminution de 3 phones lorsque le temps de montée augmente de 0 à 100 ms.

d) Influence du niveau crête

On a vu que l'oreille se comporte comme un intégrateur d'énergie ayant une certaine constante de temps, qui serait comprise entre 23 et 120 ms selon les études. C'est pour cela que la sonie de sons courts augmente régulièrement lorsque leur durée croît. Le niveau crête a une influence, due à l'inertie du système auditif, sur la durée nécessaire à l'établissement complet de la réponse auditive (50 à 150 ms) lorsque le seuil d'audibilité est nettement dépassé (Rumeau, 1980). C'est-à-dire que le temps d'intégration de l'oreille est plus petit lorsque le seuil d'audibilité est nettement dépassé.

e) Influence du contenu spectral

De la même manière que pour les sons stationnaires, la fréquence est un paramètre important dont la sonie dépend.

Plusieurs auteurs ont déterminé les lignes isosoniques pour des sons de 20 ms (Chocholle et Saulnier, 1976 ; Kato et coll., 1993 et Masaoka et coll., 2001). Ces auteurs ont trouvé une similarité de ces lignes isosoniques avec l'allure générale de celles de sons stationnaires. Cependant, pour Chocholle, le niveau d'un son impulsionnel doit être plus élevé pour avoir la même sonie qu'un son stationnaire. Masaoka et coll. (2001) ont observé que l'augmentation du niveau de pression des sons impulsionnels par rapport aux niveaux de pression de sons

stationnaires, pour un même niveau d'isotonie, varie avec la fréquence. On peut noter un écart d'environ 10 dB, entre le niveau de pression d'un son impulsionnel et d'un son stationnaire, pour les sons de haute fréquence (supérieure à 12,5 kHz). Nous développerons dans le chapitre VI l'influence du contenu spectral pour des sons impulsionnels.

Le problème avec l'étude des sons impulsionnels est que, pour des très courtes durées, ils ont un spectre large. D'un point de vue acoustique, il serait important que la durée du son permette l'établissement d'au moins une période. Cela voudrait dire que si on veut étudier l'influence de la fréquence à partir de 20 Hz, il ne serait pas souhaitable de travailler avec des sons de durées inférieure à 50 ms. Inversement, si on veut étudier des sons de durée très courte, 10 ms par exemple, la fréquence la plus basse devrait être de 100 Hz pour que le signal acoustique soit constitué d'au moins une période (Chocholle et Saulnier, 1976). Mais ce n'est pas aussi simple d'un point de vue du traitement du signal. La largeur spectrale dépend de l'enveloppe du signal temporel. Par exemple, si l'enveloppe temporelle est une fenêtre de Hanning de 20 ms, la largeur spectrale à -31 dB est d'environ 187 Hz. On notera que cette valeur est supérieure à la largeur d'une bande critique à 1 kHz (Masaoka et coll., 2001). La sonie de sons courts est plus faible que celle de sons de même fréquence mais de durée plus longue (intégration temporelle). Cependant, l'élargissement spectral au-delà de la bande critique, pour des signaux de 20 ms (fenêtre de Hanning) dont la structure fine est un son pur de fréquence inférieure à 1 kHz, rend le signal plus perceptible. On pourrait alors observer un aplatissement des lignes isotoniques pour des sons très courts de fréquences inférieures à 1 kHz (voir chapitre VI). Il sera important, dans l'étude de sons impulsionnels, de connaître précisément l'enveloppe temporelle et de pouvoir déterminer l'élargissement spectral (par rapport à la structure fine de remplissage) qu'elle peut entraîner.

D'après les études que nous avons pu recenser, les principaux facteurs influençant la sonie des sons impulsionnels sont donc la durée, l'énergie, le contenu fréquentiel, le niveau crête, le temps de montée.

II-3 Sonie des sons stationnaires et non stationnaires de durée moyenne ou longue

Ce paragraphe ne fera pas l'objet d'un développement très approfondi, mais il était toutefois important de citer trois phénomènes qui caractérisent la sonie des sons stationnaires de plusieurs secondes (adaptation de sonie) et des sons évolutifs dans le temps (effet de mémoire, décrutement).

II-3.1 Adaptation de sonie

Pour des sons d'intensité constante, dont la durée dépasse largement la durée critique (de plusieurs secondes), la sonie peut décroître dans le temps. Ce phénomène n'a lieu que dans certaines conditions. Le niveau du son doit être proche du seuil, environ 30 dB SL ou moins. On utilise le dB SL (Sensation Level) pour donner le nombre de dB au-dessus du seuil d'audition. Le phénomène d'adaptation est d'autant plus marqué que la fréquence des sons est plus élevée (Canévet et coll., 1981). Ce phénomène s'appelle l'adaptation simple et dépend du niveau, de la fréquence mais aussi de l'âge de l'auditeur. Par exemple, pour un son pur de 4000 Hz à 10 dB SL la sonie (pour des auditeurs adultes) diminue environ de moitié après 20 s d'écoute et peut être dix fois plus petite après 70 s d'écoute.

II-3.2 Sonie de séquences sonores (effet de mémoire)

En ce qui concerne les sons non stationnaires de plusieurs secondes (ambiances sonores urbaines par exemple), la sonie globale dépend du décours temporel des variations de la sonie instantanée. Des études ont été réalisées sur des séquences sonores pour développer des méthodes d'évaluation continue de la sonie (Kuwano et Namba (1985), Weber (1991) et Susini et McAdams (2000)). Susini (1999) met en avant que la sonie dépend alors des émergences d'événements sonores dans une séquence et d'un effet de mémoire à court terme. Une séquence sonore aura une sonie globale d'autant plus élevée que les pics de sonie seront situés plus près de la fin de la séquence.

Pour calculer la sonie globale d'une séquence sonore, il faudra prendre en compte non seulement les émergences de niveau (Kuwano et Namba (1985), Fastl (1991)), mais aussi leur position dans la séquence et leur durée (Susini et coll., 2002).

II-3.3 Décrutement

Les sons non stationnaires peuvent varier en amplitude de différentes manières. Un cas particulier concerne les sons continûment croissants ou décroissants. Ce type de signaux pourrait correspondre à des sons d'instruments de musique (amortissement de la corde de piano), des sons industriels (différentes vitesses d'exécution de machines) ou encore une montée (ou une descente) en régime d'un moteur. Pour ce type de sons, la sonie varie au cours du temps. Cependant, la sonie finale d'un son variant de x dB à $x-n$ dB est moins élevée que la sonie d'un son à $x-n$ dB. Ce phénomène est appelé décrutement (Canévet et coll., 2003).

Le phénomène inverse, appelé surcrutement, peut aussi se produire mais la différence de sonie est moins importante que pour le décrutement.

II-4 Mesure de la sonie

Plusieurs méthodes sont utilisées couramment et maîtrisées depuis de nombreuses années pour mesurer la sonie des sons stationnaires. Parmi les méthodes de mesure de la sonie existantes, nous allons présenter les plus fréquemment utilisées :

- a) la méthode d'estimation de grandeur sans référence (Stevens, 1955)
- b) la méthode d'ajustement décrite par exemple par Gescheider (1985)
- c) la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles (2AFC-2I) du type 2down-1up et 2up-1down (Jestead, 1980)
- d) la méthode adaptative à poursuites multiples (Buus et coll., 1997).

a) Méthode d'estimation de grandeur

La méthode d'estimation de grandeur sans référence consiste à demander aux auditeurs d'estimer la sonie d'un son en donnant un nombre (réel positif) de son choix proportionnel à la sonie. Le sujet se fixe alors sa propre échelle, souvent liée à la sonie du premier son présenté.

Plusieurs estimations d'un même son, présenté aléatoirement dans une séquence de plusieurs sons, peuvent être demandées. Cela permet de vérifier la cohérence des réponses. Le fait de

présenter les sons dans un ordre aléatoire différent pour chaque sujet permet d'atténuer un biais dû à l'effet du son qui précède le son jugé. C'est-à-dire que si le son n-1 est plus fort que le son n, le sujet aura tendance à juger la sonie du son n plus grande que si le son n-1 était moins fort.

Dans certains cas on donne au sujet un son de référence. Cette référence est le premier son de la série, auquel est attribuée une valeur, 10 par exemple. Si le son suivant paraît 2 fois plus fort alors le sujet attribuera 20 comme estimation de la sonie de ce son. Tous les autres sons seront (en principe) jugés par rapport à cette référence.

b) Méthode d'ajustement

La méthode d'ajustement consiste à présenter en alternance un son de comparaison et le son dont on cherche à mesurer la sonie (son test). L'auditeur doit ajuster le niveau du son de comparaison, à l'aide d'un potentiomètre par exemple, de manière à ce qu'il ait la même sonie que le son test. Le son de comparaison est fréquemment un son pur de 1 kHz ou une bande de bruit centrée sur 1 kHz de largeur inférieure à 160 Hz car leur niveau en dB SPL est égal au niveau d'isotonie en phones.

Le niveau du son de comparaison, au départ du test, est fixé aléatoirement au-dessus ou au-dessous du niveau d'isotonie probable du son test. Ceci évite un biais dû à une approche ascendante ou descendante systématique du niveau d'isotonie du son test.

L'ajustement a lieu avec deux sens de présentation (son test suivi du son de comparaison et son de comparaison suivi du son test), permettant de s'affranchir d'une erreur systématique due à un ajustement unilatéral. En effet, il peut y avoir une surestimation ou une sous-estimation (Scharf, 1961) lorsque l'on présente les deux sons toujours dans le même ordre. Ainsi, une fois le son test est présenté en premier, une autre fois c'est le son de comparaison qui est présenté en premier.

La moyenne des deux ajustements du niveau du son de comparaison permet de connaître directement le niveau d'isotonie en phones du son test.

c) Méthode adaptative

Lors d'une mesure du niveau d'isotonie par une méthode adaptative, l'auditeur entend le son test suivi du son de comparaison ou l'inverse, avec une probabilité égale. La tâche est alors d'indiquer lequel des deux sons est le plus fort. La variation du niveau du son de comparaison dépend de la réponse de l'auditeur lors de l'essai précédent. Une méthode adaptative se caractérise par des inversions successives de variation du niveau du son de comparaison, variations dites up-down dans la littérature de langue anglaise. L'un des critères d'inversion le plus fréquemment utilisé pour la méthode adaptative (critère « 2down-1up ») consiste à réduire le niveau du son de comparaison après deux réponses consécutives identiques (par exemple, son de comparaison plus fort) et à le relever après que l'auditeur ait répondu que le son test est plus fort. Les pas de réduction ou d'augmentation du niveau sont au départ assez grand (en général 5 dB) puis diminuent (2 dB) après la deuxième inversion du niveau.

Cette méthode fait converger le niveau du son de comparaison vers une valeur pour laquelle il est jugé plus fort que le son test dans 71 % des essais (Levitt, 1971). Ainsi, la procédure fournit une estimation du niveau pour lequel le son de comparaison est perçu « juste plus fort » que le son test (Schlauch et Wier, 1987). Une séquence s'arrête au bout de n inversions (six en général) et le seuil est calculé en faisant la moyenne des niveaux aux x dernières inversions (quatre le plus

souvent). On peut réaliser pour chaque son plusieurs mesures de seuil (3 dans la plupart des cas). Le niveau d'isotonie « juste plus fort » est alors la moyenne des trois valeurs des seuils obtenus.

Le principe de la procédure 1down–2up est le même que celui de la méthode adaptative à choix forcé du type 2down–1up mais les règles de variation du niveau du son de comparaison sont inversées. Cette méthode permet d'obtenir le niveau d'isotonie « juste moins fort ».

En faisant la moyenne des valeurs du niveau d'isotonie obtenues avec les méthodes 2down–1up et 1down–2up on obtient le niveau d'isotonie. Obtenir le niveau d'isotonie par cette méthode permet d'obtenir un résultat plus stable que si on utilisait la méthode adaptative 1down–1up (Gelfand, 1998).

d) Méthode adaptative à poursuites multiples

Le principe de la méthode adaptative à poursuites multiples (Buus et coll., 1997) est le même que celui de la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles du type 2down–1up et 2up–1down mais au lieu de suivre une seule séquence (pour un seul son), plusieurs séquences sont mélangées (correspondant aux différents sons tests).

A chaque essai, la paire de sons est choisie aléatoirement parmi une des séquences. De manière générale, la fin d'une séquence a lieu après la sixième inversion. Une moyenne sur les quatre dernières inversions est alors calculée. Buus et ses collaborateurs proposent de renouveler cette opération trois fois.

De même que pour la méthode adaptative « à poursuite unique », la moyenne des valeurs du niveau d'isotonie obtenues avec les méthodes 2down–1up et 1down–2up permet d'obtenir le niveau d'isotonie.

Les quatre méthodes que nous venons de présenter brièvement sont couramment utilisées pour mesurer la sonie de sons stationnaires. Elles le sont aussi pour mesurer la sonie de sons impulsionnels. Cependant, ces méthodes ont montré leurs limites pour les sons non stationnaires de durées longues (Fastl, 1991 ; Susini, 1999). Nous ne développerons pas ici les méthodes élaborées pour ce type de signaux (voir Susini, 1999 et Susini et coll., 2002).

II-5 Conclusion

Nous avons présenté quelques points importants des recherches sur la sonie des sons stationnaires et non stationnaires de plusieurs secondes de manière générale et sur la sonie des sons impulsionnels de manière plus précise. La sonie dépend essentiellement du niveau mais aussi de la durée ou du contenu spectral des sons.

En ce qui concerne la sonie des sons impulsionnels, ces facteurs sont toujours présents et importants mais l'énergie, le temps de montée ou encore le niveau crête interviennent aussi. La plupart des études sur les sons impulsionnels ont été réalisées sur des stimuli dont l'enveloppe temporelle était en forme de créneau. On a pu observer des divergences importantes dans les résultats concernant la mesure de la durée critique et le calcul de la constante de temps. Des comparaisons entre les résultats obtenus pour des sons stationnaires et des sons impulsionnels concernant les lignes isotoniques ont aussi été faites et les auteurs ne sont pas non plus unanimes.

Pour des sons de durée plus longue dont le niveau varie continûment au cours du temps, des effets particuliers ont été montrés comme le phénomène de décrutement. Les expériences réalisées sur le décrutement indiquent que la sonie globale est plus grande pour les sons de niveau croissant que pour les sons de niveau décroissant. Sur des séquences sonores de plusieurs secondes, dans lesquelles le niveau varie au cours du temps, des effets de mémoire ont aussi été démontrés, ainsi qu'une influence de la position d'émergences du niveau sur le jugement global de la sonie.

A l'heure actuelle, le seul moyen de connaître précisément la sonie est de réaliser des tests psychoacoustiques. Il existe cependant des modèles pour la calculer et s'en approcher. Quels sont ces modèles, quels en sont les principes et estiment-ils correctement la sonie pour n'importe quel type de son ? C'est ce que nous allons développer dans le chapitre suivant.

III

LES MODELES DE SONIE

La sonie est étudiée depuis de nombreuses années pour les sons stationnaires et plusieurs algorithmes de calcul s'appuyant sur des modèles élaborés du système auditif périphérique en procurent une bonne estimation (Zwicker, 1958 ; Moore et coll., 1997). En revanche, les recherches sont plus rares pour les bruits fortement non stationnaires. Ces derniers ont des propriétés très spécifiques qui ne permettent pas toujours d'utiliser les méthodes développées pour les sons stationnaires.

Pour les sons non stationnaires, deux modèles connus permettent de calculer la sonie en fonction du temps (Zwicker et Fastl, 1999 et Glasberg et Moore, 2002). Ces auteurs préconisent des indices statistiques pour estimer la sonie globale de sons évoluant dans le temps. Ces indicateurs sont selon Zwicker et Fastl (1999) le N4 ou le N5 (sonie dépassée 4 ou 5 % du temps) et selon Glasberg et Moore (2002), le STLmax ou le LTLmax (maximum de la sonie à court terme et maximum de la sonie à long terme).

En ce qui concerne les bruits impulsionnels, les modèles sont quasi inexistantes. Cependant, en 1995 Blommer et ses collaborateurs ont développé une procédure de calcul de la sonie, basée sur celle de Zwicker, pour des bruits impulsionnels particuliers (fermeture de portière, fermeture centralisée de voiture). Deux tests psychoacoustiques ont été mis en place pour valider cette procédure. Un seul des deux tests (méthode de Levitt/Jestead) a confirmé les prédictions faites par cet estimateur. Ce modèle ne sera donc pas développé dans ce chapitre. Une étude de la sonie sur une plus grande sorte de bruits impulsionnels mérite alors d'être entamée.

Nous allons, dans ce chapitre, décrire les différents modèles pour estimer la sonie et les comparer sur plusieurs types de sons.

III-1 Description des modèles de sonie

III-1.1 Sonie des sons stationnaires

A l'heure actuelle, deux méthodes -celle de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997)-, permettent le calcul de la sonie de sons stationnaires. C'est la méthode de Zwicker qui est utilisée le plus souvent car elle a fait l'objet d'une norme (ISO532 B).

Le principe de base du modèle de Zwicker est le calcul de l'excitation de la membrane basilaire par bandes critiques, en prenant en compte diverses pondérations modélisant les filtrages de l'oreille externe et de l'oreille moyenne, le calcul du masquage fréquentiel et l'intégration de la sonie spécifique sur les vingt-quatre bandes critiques.

Le principe du modèle de Moore et coll. (1997) est le même que celui de Zwicker (1958) à trois différences près qui sont le mode de calcul des filtres, les corrections de champ et le mode de calcul de l'excitation.

La figure III-1 représente les principales étapes dans le calcul de la sonie pour les deux modèles.

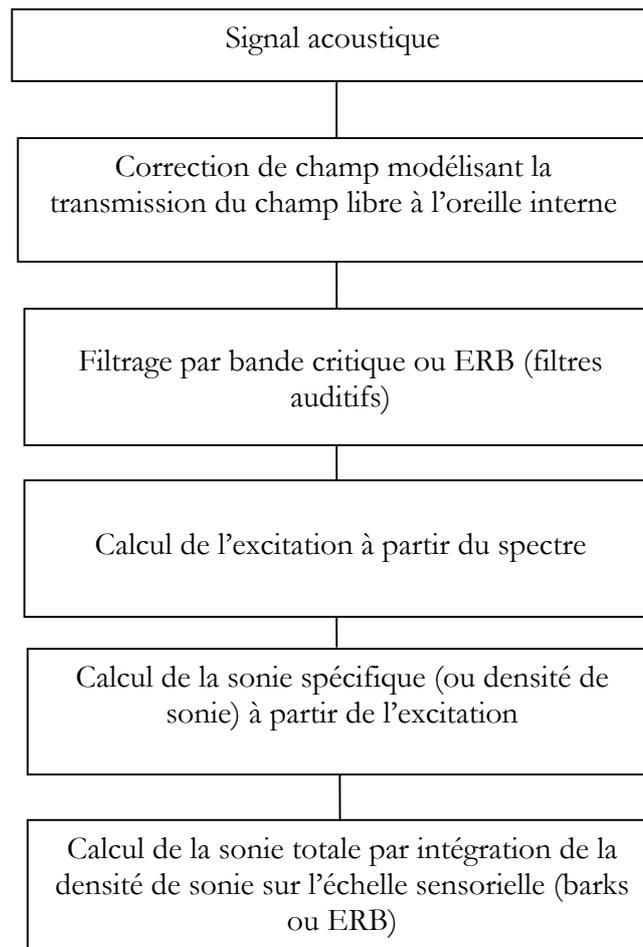


Figure III-1 : Schéma représentant le principe de calcul de la sonie des sons stationnaires.

Nous allons détailler dans ce qui suit les principes de chacun des modèles.

a) Corrections de champ : transmission de l'oreille externe et de l'oreille moyenne

Les deux modèles de sonie prennent en compte la fonction de transfert de l'oreille externe et de l'oreille moyenne en introduisant des facteurs de correction.

Zwicker introduit un facteur de transmission, exprimé en dB à la figure III-2, qui est à soustraire au niveau du signal enregistré. Ce facteur dépend de la fréquence. Au-dessus de 1000 Hz, la fonction de transfert a la forme de la courbe de seuil absolu mais inversée. En dessous de

1000 Hz, Zwicker suppose que la transmission du champ libre à l'oreille interne est uniforme et de gain 1. Il suppose aussi que l'augmentation du seuil pour les basses fréquences est uniquement due au bruit interne de l'oreille.

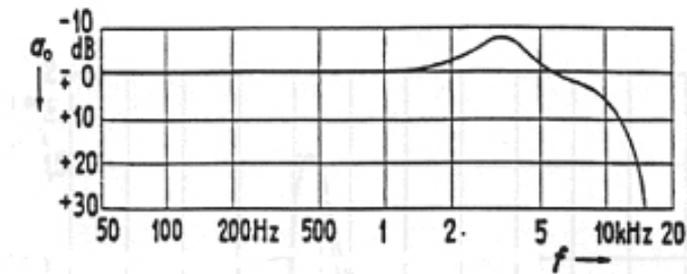


Figure III-2 : Variations avec la fréquence du facteur de transmission α_0 entre le champ libre et l'oreille interne (Zwicker et Feldtkeller, 1981, p. 111). En champ diffus, ce facteur est modifié et il faut introduire une autre correction.

Moore et coll. (1997), quant à eux, n'associent pas l'augmentation du seuil en basse fréquence au seul bruit interne. En effet, des données physiologiques (mentionnées dans Moore et coll., 1997), laissent penser que d'autres phénomènes, en plus du bruit interne, peuvent expliquer l'augmentation du seuil en basse fréquence. Ils utilisent dans leur modèle une correction dite ELC (Equal Level Contour). Elle est basée sur deux hypothèses : 1) Au-dessus de 1000 Hz, l'oreille interne a la même sensibilité à toutes les fréquences. Ainsi, la variation du seuil absolu avec la fréquence n'est due qu'au filtrage de l'oreille externe et moyenne. Le facteur de transmission varie donc avec la fréquence de manière inverse au seuil absolu. La correction correspondante, appelée MAF (Minimum Audible Field), est la même que celle utilisée par Zwicker ; 2) Au-dessous de 1000 Hz, comme nous l'avons déjà écrit, le bruit interne ne peut pas à lui seul rendre compte de la courbe de seuil. La fonction de transfert est alors modélisée par une fonction dont la forme est celle de la ligne isosonique à 100 phonses mais inversée. La correction totale est appelée ELC (figure III-3).

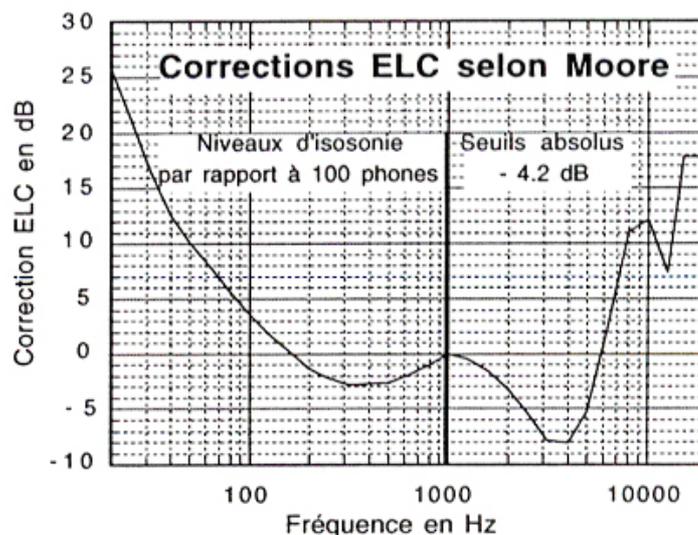


Figure III-3 : Corrections ELC utilisées pour rendre compte de la transmission des sons depuis le champ libre jusqu'à l'oreille interne selon le modèle de Moore.

b) *Modélisation et calcul des filtres auditifs*

La sonie est liée à la répartition de l'excitation, provoquée par un stimulus, le long de la membrane basilaire (Zwicker, 1958). Par conséquent, on représente le fonctionnement de l'oreille ou plus précisément de la membrane basilaire, comme celui d'un banc de filtres.

Ces filtres « physiologiques » sont modélisés selon Zwicker par des bandes critiques ; ce sont des bandes spectrales adjacentes dont l'unité est le bark. La largeur des bandes critiques est constante (100 Hz) en dessous de 500 Hz. Au-dessus de 500 Hz, cette largeur augmente avec la fréquence (voir tableau III-1 et figure III-4).

Moore et coll. (1997) proposent une autre représentation de la faculté de filtrage du système auditif, proche des bandes critiques. La notion d'ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) remplace alors la notion de bande critique. Les largeurs de ces bandes sont indiquées sur la figure III-4.

Numéro de la bande	Fréquence centrale en Hz	Largeur de la bande critique en Hz	Fréquence de coupure supérieure en Hz
1	50	80	100
2	150	100	200
3	250	100	300
4	350	100	400
5	450	110	510
6	570	120	630
7	700	140	770
8	840	150	920
9	1000	160	1080
10	1170	190	1270
11	1370	210	1480
12	1600	240	1720
13	1850	280	2000
14	2150	320	2320
15	2500	380	2700
16	2900	450	3150
17	3400	550	3700
18	4000	700	4400
19	4800	900	5300
20	5800	1100	6400
21	7000	1300	7700
22	8500	1800	9500
23	10500	2500	12000
24	13500	3500	15500

Tableau III-1 : Tableau définissant les 24 bandes critiques selon Zwicker (Zwicker et Feldtkeller (1981), p. 71). Pour chaque bande sont recensées la fréquence centrale (Hz), la largeur de la bande critique (Hz) et la fréquence de coupure supérieure (Hz).

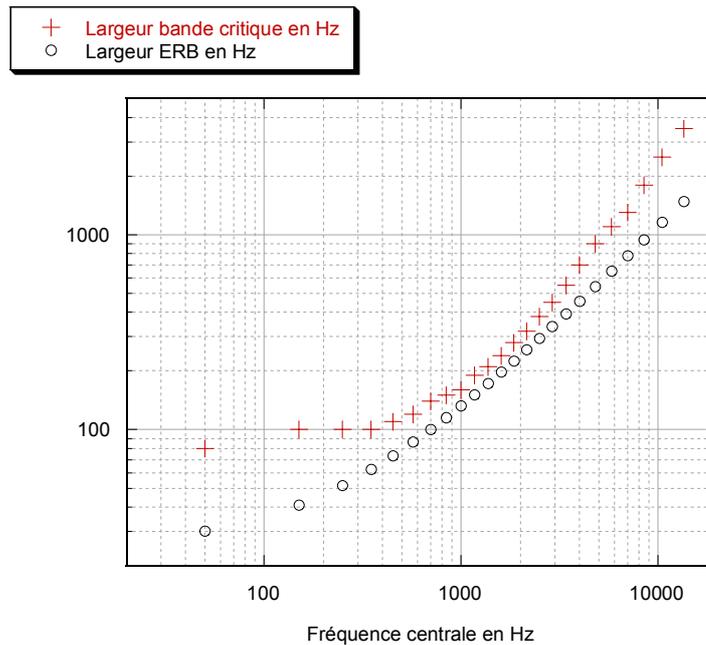


Figure III-4 : Largeur des bandes critiques (croix) et des ERB (cercles) en fonction de la fréquence centrale en Hz. Les valeurs des largeurs des bandes critiques sont tirées d'un tableau donné par Zwicker (1961). La largeur des ERB en Hz est égale à $24,7(4,37f+1)$ où f est la fréquence centrale du filtre exprimée en kHz (Moore, 1997).

b) Calcul de l'excitation

Le diagramme d'excitation induit par un son est calculé à partir du niveau de ce son dans chaque filtre (bande critique ou ERB) après avoir tenu compte des facteurs de transmission à travers l'oreille externe et l'oreille moyenne. L'amplitude de sortie de chaque filtre correspondant à un son donné, appelée diagramme d'excitation, est tracée en fonction des fréquences centrales des filtres. Le calcul du diagramme d'excitation est une partie importante des modèles de sonie et diffère selon la méthode utilisée (Zwicker ou Moore).

Selon Zwicker, le diagramme d'excitation reflète le diagramme de masquage d'un son pur masqué par un bruit à spectre étroit. Zwicker suppose en effet que les diagrammes d'excitation ont la même forme que les courbes de seuils de détection masquée. Les courbes de masquage traduisent la sélectivité de l'oreille et dépendent de la fréquence centrale et du niveau du signal d'entrée (figure III-5).

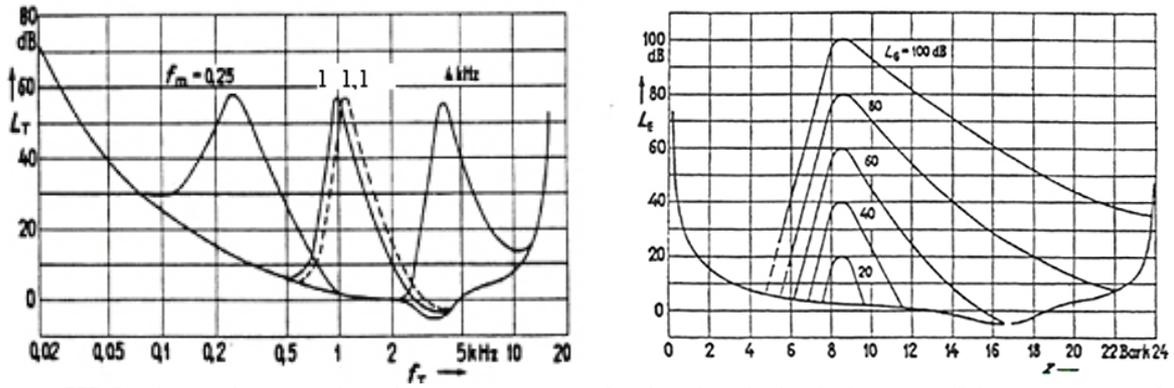


Figure III-5 : A gauche : courbes de masquage par des bandes de bruit à quatre fréquences centrales différentes (250 Hz, 1 kHz, 1,1 kHz et 4 kHz). Les courbes correspondent aux seuils de détection mesurés en présence de ces bandes de bruits (de largeur spectrale égale à une bande critique) émises à un niveau de pression de 60 dB ;
 A droite : diagramme d'excitation produit par un bruit centré sur 1 kHz et de 160 Hz de largeur spectrale. Le niveau de pression de la bande de bruit est noté L_g et vaut successivement 20, 40, 60, 80 et 100 dB (Zwicker et Feldtkeller, 1981).

Selon Moore, le diagramme d'excitation est calculé à partir de la sortie des filtres auditifs centrés sur les fréquences composant le son. Prenons par exemple, un son pur excitant à 1 kHz. Le diagramme supérieur de la figure III-6 montre les courbes de réponse de filtres centrés dans le voisinage de 1 kHz. Le trait vertical en pointillé représente la fréquence du son pur excitant. Sur le diagramme inférieur, les abscisses correspondent aux fréquences centrales des filtres voisins (cf. diagramme supérieur), et les ordonnées représentent la réponse à 1 kHz de ces filtres. Le diagramme d'excitation est ainsi constitué par la ligne qui joint les points, pour chaque fréquence centrale des filtres voisins.

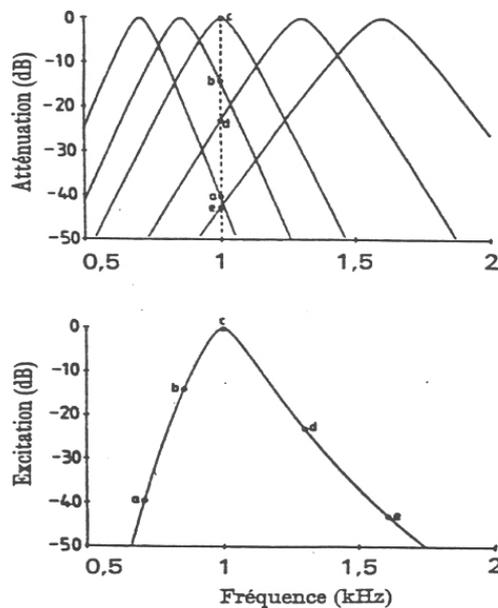


Figure III-6 : Principe de la détermination du diagramme d'excitation d'un son pur à 1 kHz selon le modèle de Moore.

Pour un son complexe, le diagramme d'excitation est obtenu en répétant l'opération décrite ci-dessus pour toutes les fréquences du signal. Le diagramme d'excitation final est la somme des excitations partielles.

c) *Calcul de la densité de sonie et de la sonie totale*

Zwicker et Moore calculent la densité de sonie (N'), ou sonie spécifique, à partir du diagramme d'excitation (E) dans chaque bande de fréquence. Selon la loi de Stevens, la relation entre l'excitation et la densité de sonie est une fonction puissance (relation III-1) :

$$N' = c \cdot E^\alpha \quad (\text{III-1})$$

où c est une constante déterminée par ajustements successifs à partir de données expérimentales. L'exposant α , inférieur à 1, permet de tenir compte de la relation non linéaire et compressive entre le niveau d'excitation et la densité de sonie.

Zwicker calcule la densité de sonie à partir du diagramme d'excitation. Dans chaque bande critique est calculé le niveau d'excitation, noté excitation de cœur. L'allure du flanc supérieur est globalement conservé et dépend du niveau et de la bande critique. L'allure du flanc inférieur sera transformé en une verticale de façon à ce que l'aire des courbes reste la même. Le calcul de la densité de sonie est donc décomposé en un calcul, à partir du niveau d'excitation de cœur, de la sonie de cœur et de la sonie de flanc (figure III-7).

La sonie de cœur est calculée à partir de l'équation ci-dessous, tirée de Zwicker et Fastl (1999):

$$N' = c \cdot (E_{\text{Thq}})^\alpha \cdot [0,5 + 0,5 \cdot (E_{\text{Stimulus}}/E_{\text{Thq}})]^{\alpha - 1} \quad (\text{III-2})$$

L'exposant α (égal à 0,23) est celui de la droite correspondant à la fonction de sonie d'un bruit uniformément excitant (courbe du haut en tirets-points de la figure III-8). E_{Stimulus} est l'excitation produite par le stimulus et E_{Thq} , donnée par Zwicker, est l'excitation au seuil dans le silence, produite par un bruit interne physiologique.

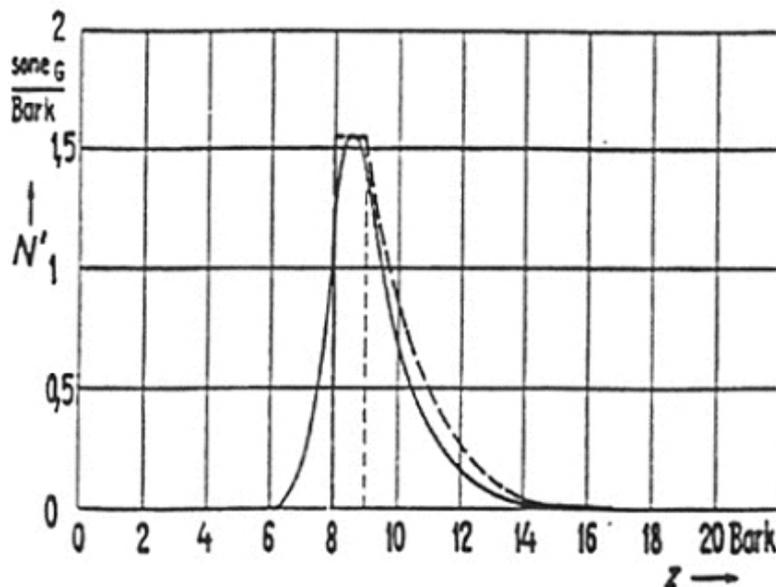


Figure III-7 : Courbe de densité de sonie, en fonction de la tonie en barks, d'un son pur de 60 dB à 1 kHz. La courbe en traits-tirets représente l'approximation du modèle, décomposée en une partie rectangulaire (sonie de cœur) et une partie courbe décroissante (sonie de flanc), utilisée pour le calcul de la sonie globale (Zwicker et Feldtkeller, 1981).

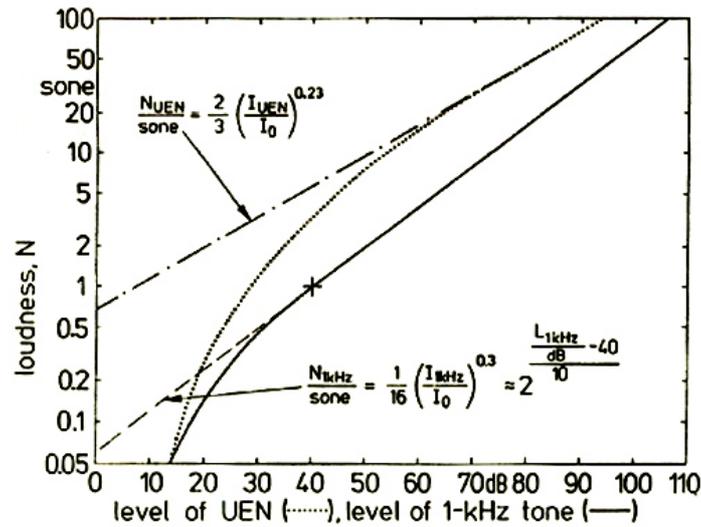


Figure III-8 : Fonctions de sonie d'un son pur à 1 kHz (courbe du bas, en trait plein) et d'un bruit uniformément excitant ou UEN (courbe du haut, en pointillés). Les droites approchent les fonctions de sonie, suivant une loi de puissance, d'un son pur à 1 kHz (en tirets) et d'un bruit uniformément excitant (tirets-points). La sonie est représentée en fonction du niveau de pression des signaux (Zwicker et Fastl, 1999).

Le calcul de la sonie de flanc par Zwicker est plus laborieux, car il n'existe pas de relation mathématique pour les courbes de seuils masqués. Les courbes des sonies de flanc des diagrammes patrons (figure III-9), utilisés autrefois, ont été approximées pour les programmes de calcul par des lignes brisées (figure III-10). Les segments de droite de la ligne brisée sont délimités par des lignes horizontales. Ces lignes horizontales correspondent à différents échelons de densité de sonie dépendant du niveau d'excitation. En effet, plus le niveau d'excitation est élevé, et donc la densité de sonie, plus la pente du premier segment de la ligne brisée est raide.

La densité de sonie est alors la succession dans chaque bande critique des sonies de cœur et/ou des sonies de flanc. En effet, si la sonie de cœur d'une bande critique n se situe au-dessous de la sonie de flanc de la bande critique précédente $n-1$, alors la sonie de cœur de la bande critique n est masquée. Ce sera alors la sonie de flanc de la bande critique précédente $n-1$ qui sera prise en compte pour déterminer la densité de sonie dans la bande critique n (voir figure III-9).

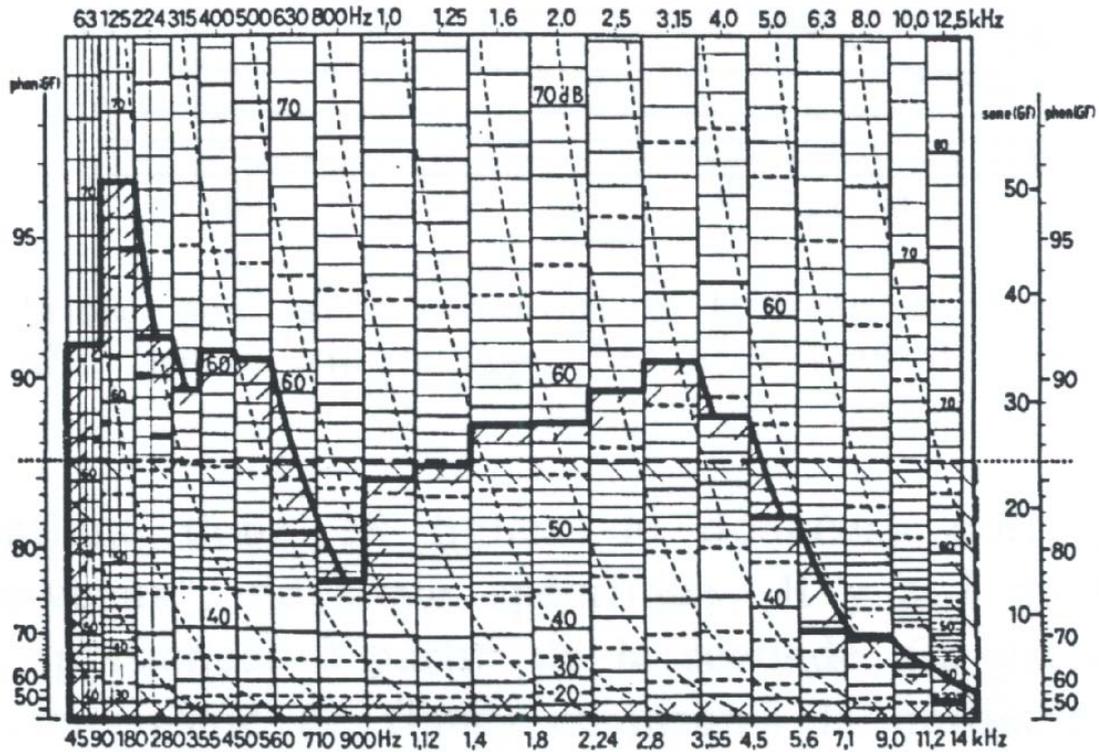


Figure III-9 : Exemple de distribution des niveaux par bandes critiques en fonction de la fréquence d'un bruit de machine. La sonie de cœur calculée dans chaque bande critique est représentée par les traits épais horizontaux. La sonie de flanc, modélisant le masquage fréquentiel, est représentée sur la même figure par les courbes descendantes en trait épais déterminées d'après les diagrammes patrons (courbes en pointillés). La sonie globale est repérée par la ligne horizontale en traits-tirets. Le niveau d'isonie correspondant est de 86 phones.

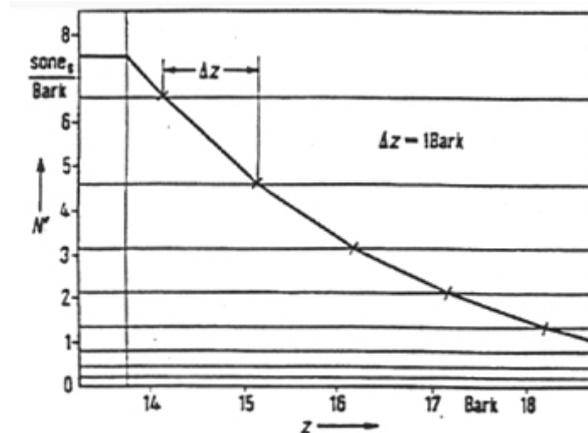


Figure III-10 : Exemple de ligne brisée utilisée pour approximer la sonie de flanc induite par une bande située à 2 kHz ayant une sonie de cœur de 7,5 phones/Bark.

Pour calculer la sonie totale, la densité de sonie est alors intégrée sur les 24 bandes critiques (somme de sonie) : c'est l'aire représentée sous la ligne en trait plein épais de la figure III-9 .

Le principe de calcul de la densité de sonie est légèrement différent de celui de Zwicker. En effet, Moore ne décompose pas la densité de sonie en sonie de cœur et sonie de flanc. La densité de sonie est calculée à partir du diagramme d'excitation (voir figure III-6).

Moore et coll. (1997) supposent aussi que le bruit de fond auditif est inaudible. Ils modélisent ce phénomène en soustrayant la densité de sonie produite par le bruit interne à la densité de sonie du stimulus (relation III-3) :

$$N' = N'_{\text{Stimulus}} - N'_{\text{BruitInterne}} = c \cdot (E_{\text{Stimulus}})^\alpha - c \cdot (E_{\text{Thq}})^\alpha$$

$$N' = c \cdot [(E_{\text{Stimulus}})^\alpha - (E_{\text{Thq}})^\alpha] \quad (\text{III-3})$$

Dans le cas où l'excitation E_{Stimulus} produite par le stimulus serait plus faible que l'excitation au seuil, la densité de sonie, ne pouvant être négative, est supposée nulle.

La sonie totale est aussi calculée comme la somme des sonies spécifiques.

III-1.2- Sonie des sons non stationnaires

Zwicker et Fastl (1999) ont travaillé à l'élaboration d'un modèle de calcul de la sonie de sons non stationnaires. Le principe de base de ce modèle est le même que pour les sons stationnaires, mais on tient compte du masquage temporel et la sonie est calculée en fonction du temps. En effet un signal peut être masqué (ou difficile à détecter) s'il est précédé de près dans le temps par un autre signal (masquage postérieur). Un signal peut aussi être masqué par un son qui le suit de près dans le temps (masquage antérieur ou rétroactif), cependant Zwicker n'en tient pas compte dans son modèle.

Zwicker utilise un quadripôle (figure III-11) pour modéliser le masquage temporel postérieur en fonction de l'intensité du signal et de sa durée. En effet, selon la durée du signal, le masquage s'étendra sur une portion plus ou moins longue après la fin du signal. Le masquage temporel est modélisé par une décharge de condensateurs.

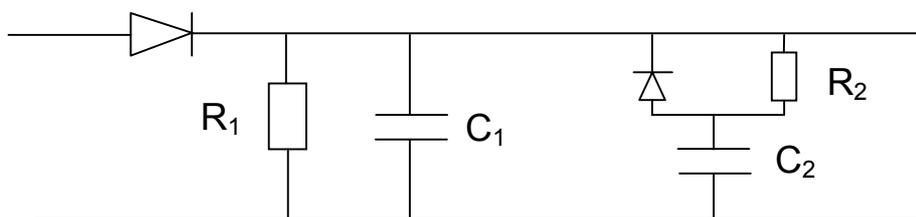


Figure III-11 : Circuit RC du quadripôle servant à modéliser le masquage temporel postérieur. $R_1=35\text{k}\Omega$; $C_1=0,7 \mu\text{F}$; $R_2= 20 \text{k}\Omega$; $C_2=1 \mu\text{F}$ (Zwicker, 1984).

Les charges et décharges des condensateurs dépendent des tensions d'entrée et de sortie. Supposons que la tension du signal d'entrée soit un créneau. C_1 est chargé instantanément et C_2 se charge avec une constante de temps $T_2= R_2 \cdot C_2$ égale à 20 ms. C_2 est considéré comme chargé après une durée comprise entre $3 \cdot T_2=60\text{ms}$ (condensateur chargé à 95%) et $5 \cdot T_2=100 \text{ms}$ (condensateur chargé à 99%).

Lorsque le signal est interrompu, les condensateurs se déchargent selon deux cas :

- 1) Le signal d'entrée dure moins de 100 ms :

Le condensateur C_2 n'a pas eu le temps de se charger complètement. C_1 se décharge alors dans R_1 et charge C_2 par R_2 .

- 2) Le signal d'entrée dure plus de 100 ms :

Les condensateurs C_1 et C_2 sont complètement chargés, le système est en équilibre. C_1 et C_2 se déchargent alors dans R_1 . La décharge, se faisant avec une constante de temps égale à $R_1(C_1 + C_2)$, est plus lente que dans le cas (1).

Par exemple, sur la figure III-12, on peut observer le masquage temporel occasionné par des créneaux de sons purs de 5 kHz et de durée 10 ms et 100 ms. Le modèle de Zwicker décrit ci-dessus, permet de calculer la sonie en fonction du temps (figure III-12 (c)), par contre on ne sait pas comment les auditeurs jugent la sonie globale de sons variant dans le temps. Zwicker et Fastl (1999) préconisent le calcul des indices statistiques N10, N5 ou N4 (sonie dépassée 10, 5 ou 4% du temps) pour estimer la sonie globale d'un son non stationnaire.

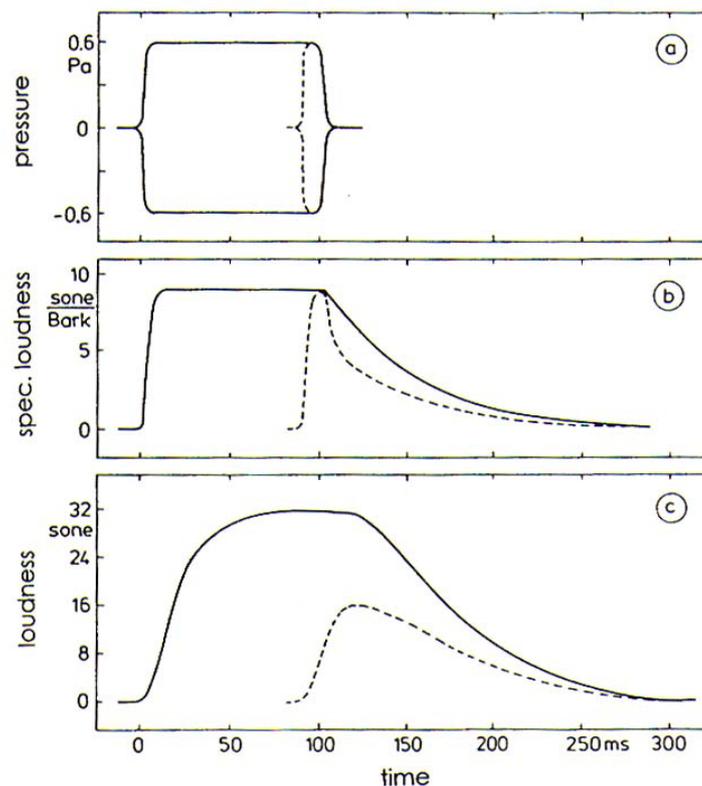


Figure III-12 : Etablissement de la sonie de créneaux à 5 kHz de 100 ms (trait plein) et 10 ms (pointillés). (a) Enveloppe temporelle des deux créneaux, (b) Densité de sonie correspondant aux deux créneaux dans la bande de bark 19, (c) Sonie en fonction du temps (Zwicker et Fastl 1999).

Glasberg et Moore (2002) ont aussi développé un modèle de sonie pour des sons variant dans le temps. De la même manière que les modèles précédents, ce modèle s'affranchit de la transmission à travers l'oreille externe et l'oreille moyenne, mais cette fois en utilisant un filtre à

réponse impulsionnelle finie (FIR). La fonction de transfert du filtre (FIR) simulant la transmission du champ libre à l'oreille interne est donnée sur la figure III-13.

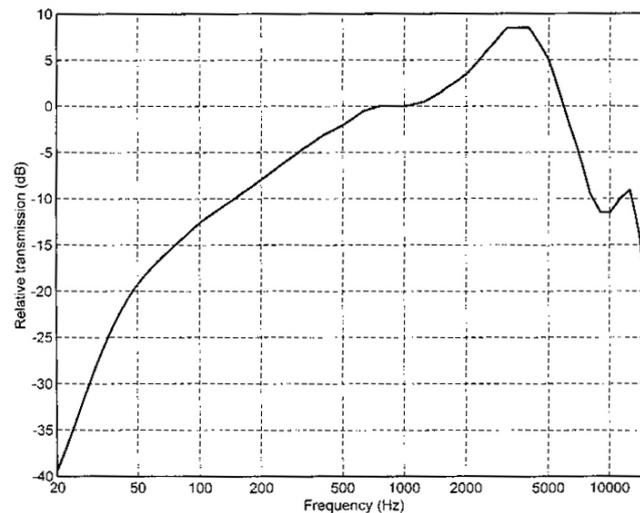


Figure III-13 : Fonction de transfert du filtre numérique à réponse impulsionnelle finie utilisée pour simuler les effets de l'oreille externe et de l'oreille moyenne. Le gain est calé pour être de 0 dB à 1000 Hz (Glasberg et Moore, 2002).

La cochlée est censée fonctionner comme un banc de filtres passe-bande dont les fréquences centrales sont étalées de 50 à 15000 Hz. La largeur des filtres augmente avec leurs fréquences centrales. Par exemple, pour un filtre centré sur 100 Hz, la largeur de bande rectangulaire équivalente (ERB) est de 35 Hz. Pour une fréquence centrale de 10 kHz, la largeur de bande rectangulaire est de 1100Hz.

La forme des filtres dépend du niveau. En effet, les pentes des filtres à basse fréquence deviennent moins raides quand le niveau augmente. La courbe donnant l'amplitude de sortie de chaque filtre, pour un son donné, est censée modéliser le diagramme d'excitation.

La méthode utilisée par Moore pour calculer le diagramme d'excitation est basée sur une analyse spectrale. Pour obtenir une résolution à basse fréquence comparable à celle du système auditif, l'analyse se fait sur des segments relativement longs (64 ms). Cependant pour les hautes fréquences les fenêtres d'analyse seront plus courtes (2 ms). Ainsi, 6 FFT sont effectuées en parallèle dont les durées sont 64, 32, 16, 8, 4, et 2 ms pour des intervalles de fréquences qui sont respectivement 20-80 Hz, 80-500 Hz, 500-1250 Hz, 1250-2540 Hz, 2540-4050 Hz et 4050-15000 Hz. Le diagramme d'excitation est calculé à partir du spectre toutes les 1 ms, il y a donc recouvrement.

L'étape suivante du modèle est de calculer ce que Glasberg et Moore (2002) appellent la sonie « instantanée ». Les auteurs supposent que la sonie instantanée n'est pas quelque chose de conscient dans la perception. Elle correspondrait à l'activité totale dans le nerf auditif mesurée sur un intervalle de temps très court, de l'ordre de la milliseconde. Le calcul de la sonie instantanée se fait à partir du diagramme d'excitation, de la même manière que dans le modèle stationnaire (Moore et coll., 1997). Le diagramme d'excitation est transformé en sonie spécifique et l'aire sous le diagramme de sonie donne la sonie instantanée. Ce calcul vaut pour une écoute monaurale. Pour une écoute binaurale, la sonie instantanée est sommée sur les 2 voies pour donner la sonie instantanée globale.

Glasberg et Moore (2002) calculent ensuite la sonie à court terme à partir de la sonie instantanée. La sonie instantanée est lissée, par un filtrage passe-bas, pour tenir compte de l'intégration temporelle (la constante de temps n'est pas donnée par l'auteur mais elle semble être de l'ordre de 100 ms, voir paragraphe VIII-2) et du masquage temporel (décroissance de la sonie après la fin du stimulus). La sonie à court terme représente la sonie perçue à chaque instant. Les auteurs préconisent de prendre le maximum de la sonie à court terme comme valeur de la sonie globale d'un son court.

A partir de la sonie à court terme, la sonie à long terme peut être calculée en utilisant aussi une sorte d'intégration temporelle. La sonie à long terme traduirait le fait que la sonie globale d'un son est gardée en mémoire après la fin de ce dernier pendant quelques secondes et en l'absence de nouveau stimulus.

Après une description des différents modèles de sonie nous allons les tester sur différents types de sons.

III-2 Comparaison des modèles de sonie sur des sons de l'environnement

Le but de ce paragraphe n'est pas de faire une comparaison précise des domaines d'application de tous les modèles de sonie. En effet, ce travail fera l'objet du chapitre VIII. Nous allons uniquement ici comparer les résultats des principaux modèles de sonie aux mesures de la sonie par des auditeurs sur des sons stationnaires, non stationnaires et impulsionnels de l'environnement pour définir leurs limites.

III-2.1 Sons stationnaires

Nous avons, dans un premier temps, comparé les deux modèles de sonie (Moore et coll., 1997 et ISO532B) pour des sons stationnaires de l'environnement. Les données des niveaux d'isotonie mesurés ont été obtenues lors d'une étude réalisée en 1998 au CNRS-LMA (Voir tableau III-2) que je décris brièvement ci-dessous. Les sons, dans le tableau III-2, sont classés par ordre croissant du niveau d'isotonie mesuré.

Les enregistrements des bruits ont été faits à l'aide d'un microphone omnidirectionnel Bruel&Kjaer, un préamplificateur Bruel&Kjaer (Nexus) et un DAT (Tascam) sur une seule voie. Le microphone était positionné à la hauteur de la source à une distance de 1 mètre environ. La restitution était effectuée par une enceinte Genelec (type 1013A) dans la salle anéchoïque du laboratoire. Les sons étaient filtrés par la réponse inverse du haut-parleur par un filtre FIR pour une restitution plus fidèle à la réalité. La conversion numérique/analogique était faite par une carte Oros. Le système de restitution était étalonné à l'aide d'un son pur à 1 kHz de 94 dB SPL.

La mesure de la sonie a été réalisée par vingt-quatre auditeurs par une méthode d'ajustement. Tous les sons avaient une durée de 1 seconde. Le son de comparaison était un son pur de 1 kHz. Les niveaux d'isotonie mesurés sont représentés sur la figure III-14 en abscisses.

Le niveau d'isotonie a ensuite été calculé par les modèles de Zwicker (carrés sur la figure III-14) et de Moore (triangles sur la figure III-14). Le niveau d'isotonie calculé est comparé aux niveaux d'isotonie mesurés. Nous avons représenté la dispersion des données expérimentales par des segments non pas horizontaux mais verticaux afin de comparer plus facilement les niveaux d'isotonie calculés et mesurés. La ligne en trait plein est une droite « idéale », correspondant à l'égalité des niveaux d'isotonie calculés et mesurés.

Description	N° son	Niveau d'isotonie mesuré en phones	Ecart type en phones	Niveau d'isotonie calculé (Zwicker 1958)	Niveau d'isotonie calculé (Moore 1997)
papier froissé	9	48,2	7,5	46,4	53,3
disque dur externe	15	51,5	6,1	47,9	54,3
moteur au ralenti, voiture	21	59,1	4,7	53	57,9
moto au ralenti	28	59,3	6,2	58	63,7
voyelle U tenue par une femme	22	62,1	4,0	53,1	54,6
perceuse	31	62,1	5,6	63,95	69,5
note de flûte	4	63,7	3,4	61,7	66,2
voyelle A tenue par un homme	23	66,7	6,8	62,8	67
vélo en roue libre	19	69,4	5,1	69,7	75,3
téléphone	17	71,0	5,5	74,2	79,5
harmonica synthé	7	72,3	4,3	75,9	80,1
moteur au ralenti, moto	29	73,3	6,4	74,3	79,2
téléphone	16	73,4	6,8	76,8	81,6
perceuse	32	74,9	5,1	78,6	83,1
guitare synthé	5	77,1	5,6	79,1	83,3
flûte	25	77,1	3,7	76,3	80
chalumeau	2	77,4	5,3	81,95	85,9
vélo en roue libre	20	78,0	5,7	79,35	83,8
moteur au ralenti, moto	8	86,1	4,6	88,4	91
flûte	26	86,3	4,8	89	90,9
perceuse	10	87,5	4,7	92,2	94,1

Tableau III- 2 : Récapitulatif et descriptif des sons stationnaires enregistrés. La durée des sons était de 1s.

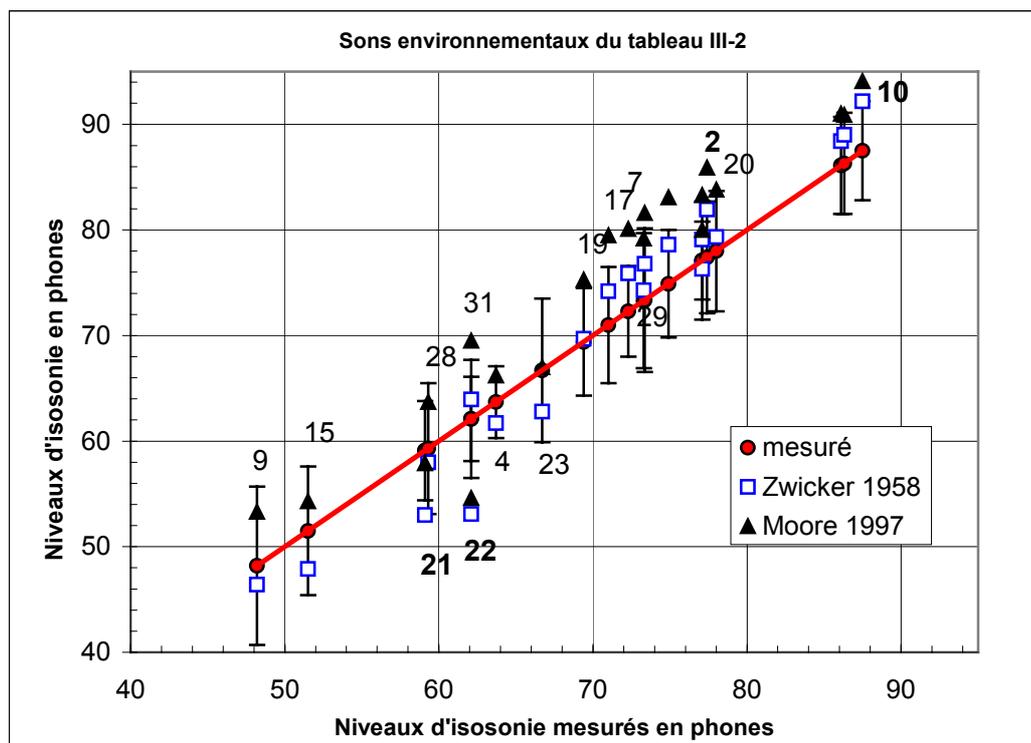


Figure III-14 : Comparaison de modèles de sonie sur des mesures de sons stationnaires de l'environnement. Les numéros correspondent aux sons décrits dans le tableau III-2. En ordonnée, sont portées les niveaux d'isotonie calculés par deux modèles de sonie : Zwicker 1958 (carrés) et Moore 1997 (triangles) et le niveau d'isotonie mesuré (ronds pleins) avec l'écart type (segments verticaux). Les niveaux d'isotonie mesurés par les auditeurs sont en abscisse. Le trait plein correspond à la diagonale, c'est-à-dire au niveau d'isotonie que devrait calculer le modèle pour prédire correctement le niveau d'isotonie mesuré.

Le modèle de Zwicker (1958) fournit des niveaux d'isotonie à moins de 4 phons des valeurs mesurées, à l'exception de quatre sons (2, 10, 21, 22). Les spectres de ces quatre sons présentent des caractéristiques différentes. Le son 2 (chalumeau) a un large spectre dont l'énergie est plus concentrée autour de 1,8 et 5 kHz. Le son 10 (perceuse) est un bruit très large bande dont l'énergie est répartie entre 1 et 12 kHz. Le son 21 (moteur de voiture au ralenti) a aussi un large spectre mais l'énergie se répartit autour de 240 Hz. Le son 22 (voyelle U tenue par une femme) est composé d'harmoniques dont la fréquence fondamentale se situe autour de 230 Hz. Il est difficile de trouver une caractéristique commune à ces quatre sons qui pourrait expliquer pourquoi le modèle de Zwicker (1958) ne calcule pas précisément le niveau d'isotonie de ces sons. De plus, le son 21 (moteur de voiture) présente les mêmes caractéristiques spectrales que le son 29 (moteur de moto au ralenti) dont le niveau d'isotonie est correctement calculé. Le seul paramètre qui change est leur niveau.

Globalement, le modèle de Zwicker (1958) donne des niveaux d'isotonie proches de ceux mesurés.

Le modèle de Moore et coll. (1997) donne des résultats éloignés de la droite "idéale" à forts niveaux. Il donne des écarts de plus de 4 phons par rapport au niveau d'isotonie mesuré. Cependant, pour les sons 21 et 23 (ralenti de voiture et voyelle A tenue par un homme) le modèle de Moore et coll. (1997) donne des niveaux d'isotonie proches de ceux mesurés. Ces sons correspondent à des sons dont le spectre se situe dans les basses fréquences (entre 100 et 500 Hz), mais il est aussi difficile de conclure sur une limite du modèle de Moore et coll. (1997) par rapport au spectre des signaux. Par contre, on observe aussi une surestimation du modèle pour des niveaux d'isotonie supérieurs à 70 phons.

Les modèles de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997) estiment assez bien les niveaux d'isotonie de sons stationnaires. Cependant, on a pu constater que la précision des modèles semble dépendre du niveau. En particulier, le modèle de Moore surestime le niveau d'isotonie lorsque ceux-ci dépassent 70 phons.

Après cette comparaison rapide des deux modèles de sonie pour les sons stationnaires nous allons tester les modèles de Zwicker et Fastl (1999) et de Galsberg et Moore (2002) pour les sons non stationnaires.

III-2.2 Sons non stationnaires et impulsions de l'environnement (bruits de chantier)

Les modèles de sonie pour des sons de niveau variable dans le temps ont été testés sur des bruits de chantier dont le niveau d'isotonie a été mesuré par trente auditeurs avec une méthode d'égalisation lors d'une étude que nous avons réalisée pour le ministère de l'environnement, financée par l'ADEME. Avant de tester les modèles sur ces bruits, nous allons décrire l'enregistrement et le traitement des signaux ainsi que la mesure des niveaux d'isotonie.

III-2.2.1 Enregistrements des bruits de chantier

Nous nous sommes intéressés aux bruits transmis à l'intérieur d'une habitation à proximité d'un chantier. La différence de niveau entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitation, à 1 mètre de la fenêtre, que nous avons mesurée au sonomètre Bruel & Kjaer était de 30 dB(A).

a) Enregistrements de proximité

Pour pouvoir travailler plus précisément sur l'influence des sources individuelles du chantier, nous avons fait un enregistrement à proximité de chacune d'entre elles, avec un microphone omnidirectionnel.

Pour réaliser cela nous avons utilisé le matériel décrit ci-dessous :

- Un microphone omnidirectionnel Schoeps CMC 6 -- U
- Un magnétophone numérique DAT DAP1 Tascam
- Un pré-ampli MCN Audio U1126
- Un pistonphone (calibrator type 423, B&K) qui donne 94 dB à 1000 Hz
- Un sonomètre Bruel & Kjaer

Le microphone avait une réponse en fréquence plate de 50 à 16000 Hz. Le microphone, lors de l'enregistrement, était situé en conformité avec la norme internationale ISO 1996/1-1982 (F), c'est-à-dire à 1,4 m au-dessus du sol et à 4 m de toute structure réfléchissante. Les sources étaient en moyenne à 5 m du microphone.

Avant chaque enregistrement, un signal étalon (pistonphone : 1000 Hz, 94 dB) était enregistré avec le microphone omnidirectionnel pour pouvoir restituer ultérieurement les bruits de chantier à leur niveau réel. Vingt-huit bruits de chantier ont été ainsi enregistrés de manière individuelle.

b) Enregistrements en appartement

Le matériel utilisé était le même que celui employé pour les enregistrements de proximité. L'enregistrement a été fait dans une pièce dont la paroi extérieure était face au chantier, à quelques dizaines de mètres de celui-ci, fenêtres fermées, fenêtres entre-ouvertes et fenêtres ouvertes. Ces trois conditions d'ouverture de la fenêtre nous ont semblé balayer les situations usuelles d'un riverain dans son habitation. Le niveau du bruit de fond résiduel, en l'absence d'événement sonore émergent, était de 35 dB(A).

III- 2.2.2 Mesure du niveau d'isozonie

a) Stimuli

Les tests psychoacoustiques ont été effectués sur les bruits enregistrés en appartement. Mais nous avons aussi travaillé à partir des enregistrements de proximité en simulant une écoute en appartement. Ces bruits ont alors été traités pour pouvoir simuler cette écoute.

Les bruits enregistrés à l'intérieur de l'appartement ont été présentés aux sujets à leur niveau réel. Mais les enregistrements extérieurs, effectués à proximité des sources ont été traités pour simuler, d'une part l'atténuation due à la propagation aérienne sur 30 mètres (distance moyenne entre la source sonore du chantier et la paroi du bâtiment) et, d'autre part, l'atténuation due à l'isolation de l'habitation par rapport aux sources de bruits extérieures.

Nous avons ainsi retenu trente sons représentant bien les différentes sources de bruit d'un chantier telles qu'elles seraient perçues par un riverain dans son habitation. Treize bruits sont issus d'enregistrements à l'intérieur de l'appartement et les dix-sept autres sont issus des

enregistrement à proximité des sources. Le tableau III-3 décrit chaque bruit et donne le niveau en dB(A) des bruits utilisés pour des tests psychoacoustiques.

Nom	Description	Position de la fenêtre	Niveau en dB(A)
chant01	Scie électrique	Fermée	40
chant02	Marteau sur bois	Fermée	52
chant03	Marteau sur fer	Entrouverte	57
chant04	Ferrailles	Entrouverte	53
chant05	Coulage de béton	Ouverte	51
chant06	Scie circulaire	Ouverte	52
chant07	Coups de marteaux	Fermée	48
chant08	Vibreux+compresseur	Entrouverte	66
chant09	Klaxon grue	Entrouverte	55
chant10	Ambiance chantier	Ouverte	53
chant11	Marteau-piqueur	Ouverte	52
chant12	Marteau-piqueur + marteaux	Ouverte	54
chant13	Marteau + fer	Ouverte	57
chant14	Camion benne	Isolation simulée	34
chant15	Brise roche hydraulique	Isolation simulée	65
chant16	Coulage de béton	Isolation simulée	36
chant17	Entonnoir en fer	Isolation simulée	36
chant18	Grue	Isolation simulée	34
chant19	Klaxon grue (un seul coup)	Isolation simulée	36
chant20	Marteau sur grillage	Isolation simulée	21
chant21	Marteau sur bois	Isolation simulée	28
chant22	Marteau	Isolation simulée	35
chant23	Marteau sur béton	Isolation simulée	50
chant24	Marteau sur coffrage	Isolation simulée	36
chant25	Avertisseur de recul	Isolation simulée	38
chant26	Scie circulaire	Isolation simulée	43
chant27	Coulage de béton	Isolation simulée	31
chant28	Toupie	Isolation simulée	33
chant29	Tractopelle	Isolation simulée	38
chant30	Vibreux	Isolation simulée	45

Tableau III-3 : Récapitulatif et descriptif des bruits de chantiers.

b) Auditeurs

Trente auditeurs ont réalisé les expériences. Douze d'entre eux n'avaient jamais participé à des tests d'écoute auparavant. Tous les sujets ont passé un audiogramme de Békésy pour vérifier qu'ils n'avaient pas de déficience auditive marquée, hormis une légère presbycusie acceptable et normale avec l'âge pour certains. Les auditeurs étaient âgés de 22 à 61 ans et la moyenne d'âge était de 34 ans.

c) Procédure

Nous avons mesuré le niveau d'isotonie par une méthode d'ajustement. Les tests ont été réalisés dans une salle anéchoïque.

Le test consistait à égaliser la sonie d'un bruit de chantier (son test) avec un son de comparaison qui durait une seconde et dont la sonie était, en principe, connue. Le son de comparaison était une bande de bruit centrée sur 1000 Hz et de largeur 120 Hz.

Dans un premier test, l'auditeur entendait successivement le bruit de chantier dont le niveau restait fixe suivi du son de comparaison dont le niveau pouvait être modifié. La tâche de l'auditeur consistait à ajuster le deuxième son (bande de bruit) pour qu'il ait la même sonie que le bruit de chantier. Lorsque les sonies des deux sons étaient jugées égales par le sujet, il validait son estimation et passait au bruit de chantier suivant. Cette opération a eu lieu sur les trente bruits de chantier. Le niveau d'isotonie est le niveau de pression du son de comparaison (bande de bruit).

Dans un deuxième test, le son de comparaison et le son test étaient inversés. C'est-à-dire que ce n'était plus la bande de bruit (son de comparaison dans le premier test) qui avait un niveau variable mais le bruit de chantier, qui était alors présenté en second. Le niveau de la bande de bruit était fixé à la valeur ajustée par le sujet lors du premier test. Le niveau d'isotonie est alors égal au niveau de pression de la bande de bruit fixé lors du premier test ajouté à l'écart entre le niveau de pression original du son test et son niveau de pression ajusté pour que les deux sons aient la même sonie. Présenter les sons dans l'autre sens permet de s'affranchir d'un biais consistant à juger le plus souvent le son présenté en second plus fort.

Le niveau d'isotonie final était la moyenne des niveaux ajustés lors des deux tests.

d) Dispositif expérimental

Le signal de sortie de la carte son Oros passait à travers deux portes électroniques Coulbourn dont les temps de montée et de descente étaient de 100 ms. La restitution était effectuée par deux enceintes Genelec (type 1013A) et un caisson de basse (type 1092A) dans la salle anéchoïque du LMA. Les trente bruits étaient présentés dans un ordre aléatoire, différent pour chaque auditeur.

Avant de réaliser le test de mesure de la sonie, le système de restitution était étalonné à l'aide d'un signal de 1000 Hz à 94 dB.

III-2.2.3 Comparaison des niveaux d'isotonie mesurés et calculés

Dans ce paragraphe sont comparés les résultats du test d'estimation du niveau d'isotonie par la méthode d'ajustement (tableau III-4) et les résultats obtenus par des modèles de sonie élaborés pour des sons non stationnaires. La deuxième colonne du tableau correspond à la moyenne des estimations du niveau d'isotonie des trente sujets (deux estimations par sujet) pour chacun des 30 bruits de chantier. Les deux modèles testés sont ceux de Zwicker et Fastl (1999) et de Glasberg et Moore (2002).

Nom	Niveau d'isotonie en phones	Ecart type en phones	Nom	Niveau d'isotonie en phones	Ecart type en phones
chant01	57,4	5,5	chant16	57,3	5,9
chant02	66,3	5,2	chant17	61,1	4,9
chant03	70,7	5,7	chant18	58,1	3,9
chant04	65,8	5,5	chant19	58,6	6,8
chant05	66,8	6,2	chant20	47,2	8,7
chant06	65,5	5,3	chant21	56,9	5,3
chant07	61,1	5,3	chant22	59,1	6,1
chant08	74,8	5,7	chant23	67,7	5,1
chant09	67,5	5,6	chant24	59,9	4,8
chant10	69,5	4,9	chant25	55,4	5,8
chant11	69,4	5,3	chant26	61,7	5,8
chant12	67,8	5,0	chant27	57,1	4,5
chant13	70,2	4,9	chant28	55,6	5,1
chant14	57,8	5,1	chant29	60,2	4,5
chant15	74,3	6,0	chant30	63,5	5,9
Moyenne écart type = 5,5 phones					

Tableau III-4 : Tableau récapitulatif donnant le niveau d'isotonie mesuré sur trente auditeurs et les écarts types en phones pour les trente bruits de chantier.

Le modèle Zwicker et Fastl (1999) permet de calculer la sonie en fonction du temps mais ne permet pas de calculer la sonie globale d'un son. Zwicker préconise pour estimer le niveau d'isotonie global d'un son variant dans le temps de calculer le niveau d'isotonie dépassé 4, 5 ou 10% du temps (N4, N5 ou N10). Nous avons choisi de tester la variable N4 sur les bruits de chantier étudiés.

Glasberg et Moore (2002) préconisent de calculer le niveau d'isotonie à court terme maximum (STLmax) pour estimer le niveau d'isotonie global de son court.

Sur la figure III-15 sont reportés le niveau d'isotonie dépassé 4% du temps (N4) et le maximum du niveau d'isotonie à court terme (STLmax) en fonction des niveaux d'isotonie mesurés (valeurs du tableau III-4). Nous avons aussi choisi de représenter le niveau d'isotonie mesuré avec la dispersion (segments verticaux) en fonction de lui-même. Cela est représenté par la ligne en trait plein correspondant à une droite « idéale », c'est-à-dire à une droite pour laquelle il y a égalité des niveaux d'isotonie calculés et mesurés.

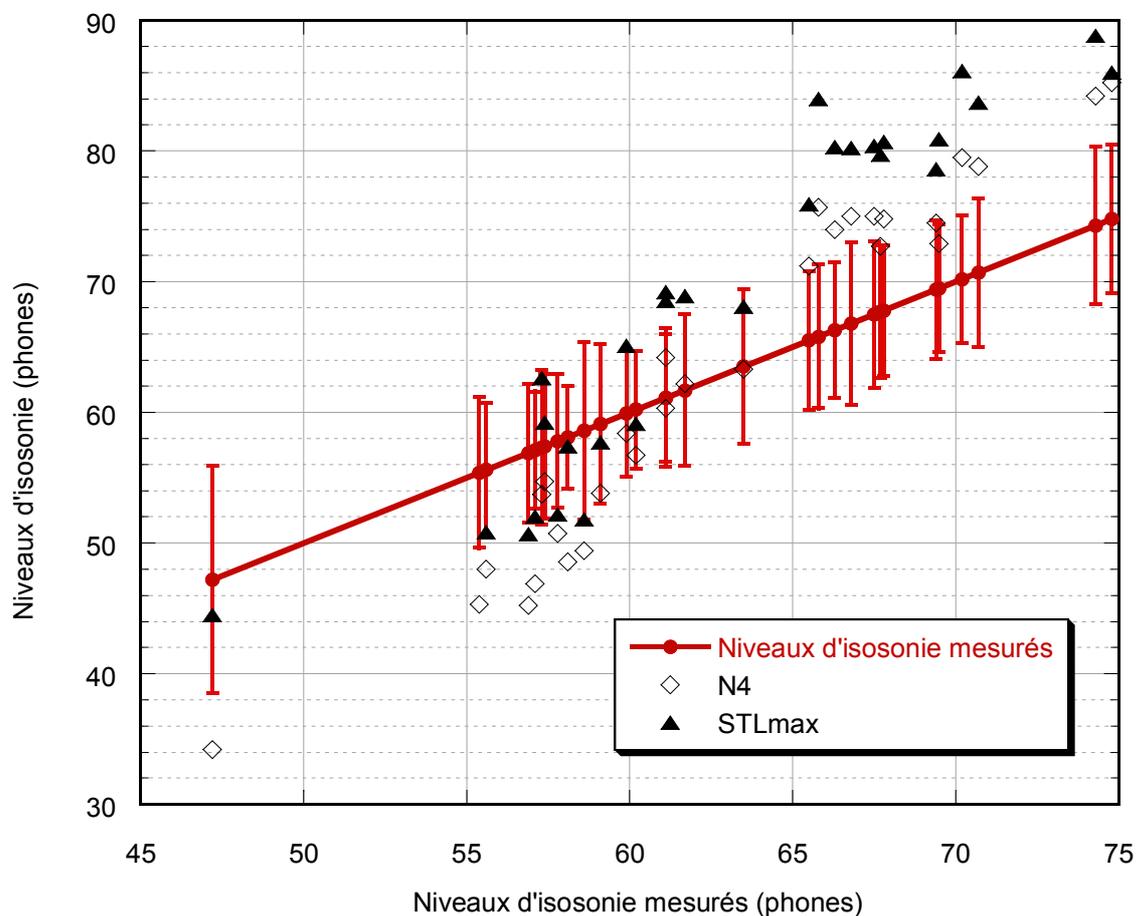


Figure III-15 : Comparaison des niveaux d'isotonie calculés par le modèle de Zwicker et Fastl 1999 (N4, losanges) et par le modèle de Glasberg et Moore de 2002 (STLmax, triangles) par rapport aux niveaux d'isotonie mesurés par trente sujets (cercles). Les lignes verticales représentent les écarts types à la moyenne obtenus par la méthode d'ajustement.

Les deux indicateurs surestiment les niveaux d'isotonie pour des niveaux élevés et sous-estiment les niveaux d'isotonie pour des sons de niveaux faibles. Cependant, le STLmax, pour des niveaux inférieurs à 60 dB SPL, se situe à l'intérieur des écarts types. On retrouve ainsi les limites des modèles de sonie pour les sons stationnaires.

Nous ne rentrons pas ici dans le détail des limites des modèles actuels. L'important était de souligner ici leur insuffisance pour calculer le niveau d'isotonie de n'importe quel type de son.

III-3 Introduction des indices utilisés pour évaluer les modèles de sonie

Dans les prochains chapitres, plusieurs indices pourront être utilisés afin de pouvoir comparer les différents modèles de sonie.

Le premier indice est le MAR (Mean Absolute Residual). Il a été utilisé par Gerken et coll. (1990) pour comparer différentes fonctions mathématiques permettant de mieux caractériser l'intégration temporelle. Le MAR est défini comme la moyenne des valeurs absolues de la différence entre le niveau d'isotonie calculé ($L_{\text{calculé}}$) et le niveau d'isotonie mesuré ($L_{\text{mesuré}}$) :

$$MAR = \frac{\sum_{i=1}^n |L_{i \text{ calculé}} - L_{i \text{ mesuré}}|}{n} \quad \text{où } n \text{ représente le nombre de stimuli testés.}$$

Cet indice permet de déterminer si l'estimateur donne, en moyenne, de bonnes prédictions du niveau d'isotonie.

Le deuxième indice est le Rmax. C'est le maximum de la valeur absolue des différences entre le niveau d'isotonie calculé ($L_{\text{calculé}}$) et le niveau d'isotonie mesuré ($L_{\text{mesuré}}$) :

$$Rmax = \max(|L_{i \text{ calculé}} - L_{i \text{ mesuré}}|)$$

Cet indice permet de déterminer la plus grande erreur effectuée par le modèle ou l'estimateur pour prédire le niveau d'isotonie. Il permet en quelque sorte de tester la robustesse de l'estimateur.

Le troisième indice est noté Rmean. C'est la moyenne des différences entre le niveau d'isotonie calculé ($L_{\text{calculé}}$) et le niveau d'isotonie mesuré ($L_{\text{mesuré}}$) :

$$Rmean = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{i \text{ calculé}} - L_{i \text{ mesuré}})}{n}$$

Cet indice permet de savoir si les erreurs commises par l'estimateur se répartissent uniformément autour d'une valeur moyenne. Par exemple, si la valeur de Rmean est petite, proche de zéro, alors la répartition des erreurs est uniforme autour de la valeur de la mesure. Par contre, si la valeur du Rmean est grande, positive ou négative, alors la répartition des erreurs est le plus souvent au-dessus ($Rmean > 0$) ou au-dessous ($Rmean < 0$) de la valeur de la mesure. Il permet de vérifier que le modèle ou l'estimateur ne possède pas de biais systématique. En effet, si le modèle avait un biais systématique le MAR et le Rmean auraient la même valeur au signe près.

Enfin, le dernier indice est le Rstd. C'est l'écart type des différences entre le niveau d'isotonie calculé et le niveau d'isotonie mesuré.

$$Rstd = std(L_{i \text{ calculé}} - L_{i \text{ mesuré}})$$

Cet indicateur permet de connaître si l'estimateur comporte un biais systématique. Si le Rstd est nul, il y a effectivement un biais constant. Une fois le biais annulé, l'estimateur doit donc donner des résultats parfaits.

III-4 Conclusion

Les modèles de sonie actuels estiment assez bien la sonie de sons stationnaires de l'environnement même si le modèle de Moore et coll. (1997) surestime de plus de 4 phons le niveau d'isophonie des sons testés. Un des points mis en avant dans ce chapitre est la sous-estimation du niveau d'isophonie obtenu par le modèle de Zwicker pour des sons de niveaux faibles et sa surestimation pour des sons de niveaux élevés. Une explication possible de cette divergence serait que ce modèle prend un même exposant de la fonction de sonie quels que soient la fréquence et le niveau.

En ce qui concerne les sons non stationnaires et impulsionnels, nous avons montré que les modèles ne permettent pas d'estimer correctement la sonie globale. Ceci conforte donc notre volonté d'étudier la sonie des sons impulsionnels.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier les différentes caractéristiques physiques influençant la sonie des sons impulsionnels et ainsi tenter d'établir un modèle mathématique simple pour estimer la sonie pour ce type de signaux.

IV

UN ESTIMATEUR DE SONIE POUR LES SONS IMPULSIONNELS

Le but de mon travail de thèse est de proposer des outils permettant le calcul de la sonie des sons impulsionnels. Pour cela, il nous faut dans un premier temps, déterminer les caractéristiques physiques de ce type de son. En effet, les sons construits sur la base d'une enveloppe temporelle rectangulaire ne sont pas totalement représentatifs des sons que l'on peut trouver dans notre environnement. Ceux-ci présentent plutôt des enveloppes à décroissance exponentielle sans partie entretenue. Nous nous sommes donc attachés à définir les caractéristiques physiques des sons impulsionnels que nous souhaitons étudier. Dans un deuxième temps, notre objectif est d'établir des corrélations entre ces caractéristiques physiques et la sonie des sons impulsionnels, afin de proposer un estimateur de sonie d'impulsion que l'on notera ESI. Nous utilisons le terme d'estimateur, et non celui de modèle, car le calcul de la sonie ne se base pas ici sur une modélisation du système auditif, mais sur la recherche de paramètres physiques qui influent sur la sonie.

IV-1 Caractéristiques physiques des sons impulsionnels

La première étape de notre étude a été d'enregistrer un panel de sons représentatifs des sons impulsionnels afin d'en déterminer les caractéristiques physiques types. C'est donc avec des percussions, des pierres, des barres de fer, des ballons, des pétards et autres objets que nous avons généré vingt-quatre sons impulsionnels « réels » (voir tableau IV-1). L'enregistrement des sons a eu lieu en salle anéchoïque avec le matériel suivant :

- Un microphone Bruel & Kjaer type 2669 ;
- Un amplificateur Bruel & Kjaer « Nexus » ;
- Un magnétophone numérique DAT DAP1 Tascam.

Le déroulement temporel de chacun des sons impulsionnels enregistrés peut être caractérisé par une attaque rapide ne dépassant pas 5 ms, pas de palier au maximum d'amplitude et un temps de descente plus ou moins long (voir figure IV-1).

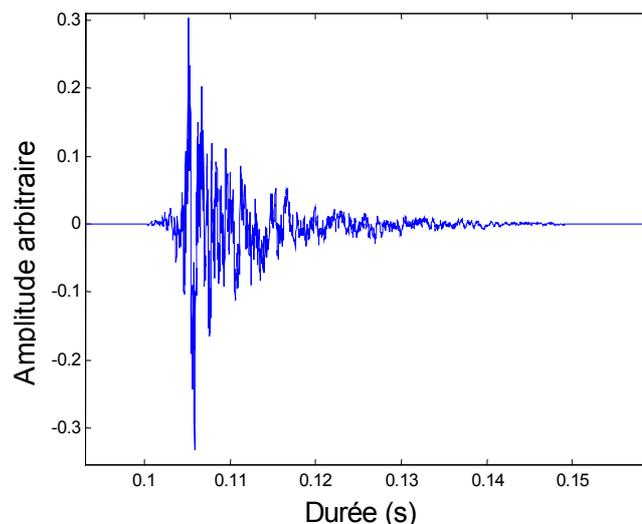


Figure IV-1 : Allure d'un son impulsionnel représentatif des signaux étudiés.

La figure IV-2 montre une façon de modéliser le dérouls temporel de ce type de signaux impulsionnels. L'attaque est modélisée par une fonction linéaire croissante et la décroissance par une fonction exponentielle décroissante (figure IV-1). L'enveloppe temporelle ainsi définie permet de synthétiser des sons impulsionnels, dont chaque caractéristique sera contrôlée (voit tableau IV-2), pour une meilleure analyse de l'influence de chaque paramètre physique sur la sonie.

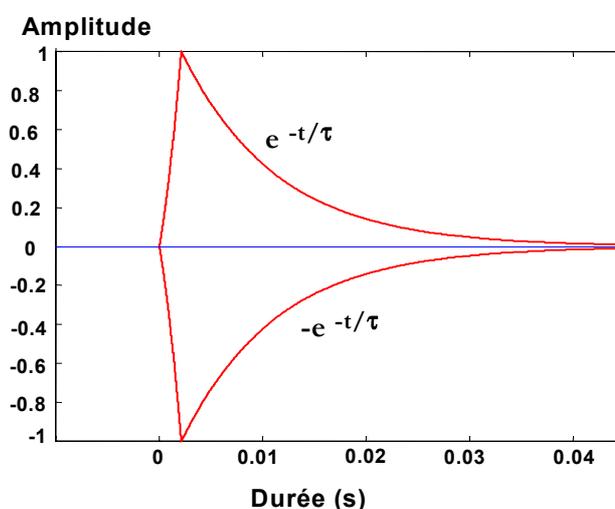


Figure IV-2 : Modèle d'enveloppe temporelle utilisée dans cette étude pour synthétiser des sons impulsionnels.

Les caractéristiques physiques d'un son impulsionnel que nous pouvons extraire sont, le temps de montée, le niveau crête, le temps de descente et l'énergie (tableaux IV-1 et IV-2).

Nous avons défini le temps de montée par le temps mis pour passer de 10 à 90 % du maximum d'amplitude du signal. Le temps de descente est le temps mis pour passer de 90 à 10 % du maximum d'amplitude. Cette définition, inspirée de l'électronique, est aussi utilisée par Scharf et Buus (1986) pour définir ces paramètres temporels. Le calcul du temps de montée et du temps de descente est basé sur le calcul de l'enveloppe temporelle du signal.

Il faut noter que la difficulté ici était de faire un choix d'extraction d'enveloppe valable pour n'importe quel type de signaux complexes. Nous n'avons pas utilisé la méthode de la transformée de Hilbert, mieux adaptée pour extraire l'enveloppe de signaux harmoniques. Notons aussi que le but de l'extraction d'enveloppe temporelle était de pouvoir calculer le temps de montée et le temps de descente. La méthode que nous avons choisie pour déterminer l'enveloppe est basée sur le filtrage passe-bas sur le signal redressé. C'est-à-dire que tant que l'amplitude du signal augmente l'enveloppe suit exactement l'évolution temporelle du signal redressé. Lorsque l'amplitude du signal décroît, l'enveloppe décroît de manière exponentielle mais avec une décroissance moins raide que celle du signal (Zölzer, 1997). Cette décroissance est posée de telle manière que l'on respecte un bon compromis entre la durée du signal et l'obtention d'une enveloppe lissée.

Le niveau crête est le niveau en dB SPL de l'échantillon correspondant à la valeur maximale prise par l'amplitude (correspondant à la valeur maximale de la pression instantanée) pendant la durée totale du signal.

L'énergie est définie comme l'intégrale, sur toute la durée du signal, de l'amplitude au carré du signal.

IV-2 Estimateur de sonie de sons impulsionnels

Après avoir déterminé les différentes caractéristiques physiques, nous avons mis en place une expérience pour mesurer la sonie de quarante sons impulsionnels, aussi bien enregistrés que synthétisés. Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire les stimuli étudiés.

IV-2.1 Stimuli

Nom	CGS (Hz)	Niveau crête (dB)	Temps de montée (ms)	Temps de descente (ms)	Energie (W.m ² .s)	Description
bimp01	2123	90	0,1	5,4	9,5	2 pierres
bimp02	1829	79	0,1	3,2	0,9	Pétard
bimp03	601	88,9	0,45	7,2	26,5	Ballon crevé
bimp04	600	78,1	0,1	3,7	1,1	Beachball
bimp05	764	78,5	1,1	18,3	6,1	Claquement de doigt dans la bouche
bimp06	2541	71,2	0,4	3,5	0,3	Claquement de langue
bimp07	895	91,6	1,7	8,9	64,5	Débouchage d'un bouchon de vin
bimp08	751	84,55	0,1	20,6	21,3	Débouchage d'un bouchon de champagne
bimp09	5665	86,25	0,1	3,2	2,5	Jouet clic-clac
bimp10	6420	87,4	0,4	9,3	17,2	Fer sur fer
bimp11	1615	81	2,2	3,5	2,7	Claquement de mains
bimp12	1932	85	0,2	5,5	6,3	Marteau sur bois
bimp13	798	71,7	1,4	54,4	2,2	Marteau sur carreau
bimp14	6535	88,8	0,9	10,9	18,8	Marteau sur fer
bimp15	2409	78,6	0,3	3,3	1,1	Marteau sur pierre
bimp16	2345	83,3	0,2	5,3	3,1	Ping pong1
bimp17	1461	86	0,2	8,3	10,5	Ping pong2
bimp18	643	90,2	4,2	7,1	58,7	Sac éclaté
bimp19	1449	87,15	1,45	5,7	11,4	Tambourin
bimp20	13717	88,9	0,1	42,1	37,0	Triangle
bimp21	3959	90,3	0,1	3,8	12,1	Verre cassé
bimp22	2445	86,2	0,51	9,7	16,7	Wood-block manche
bimp23	2675	83,75	0,7	12,7	10,6	Wood-block
bimp24	2445	82,3	0,6	20,8	5,3	Xylophone

Tableau IV-1 : Caractéristiques des vingt-quatre sons impulsionnels enregistrés.

Une partie des sons étudiés étaient les sons que nous avons enregistrés. Nous avons reporté dans le tableau IV-1 certaines de leurs caractéristiques physiques, telles que le centre de gravité spectral en Hz (CGS), le niveau crête en dB SPL, les temps de montée et de descente en ms et l'énergie. La nature de la source est indiquée à la dernière colonne.

Les sons que nous avons synthétisés, pour une analyse plus fine, ont été construits sur le modèle de la figure IV-2. L'enveloppe était ensuite multipliée par la structure fine du signal (figure IV-3). La structure fine était soit un son pur de 1 kHz (sons 25 à 28 du tableau IV-2) soit un bruit blanc (sons 29 à 40 du tableau IV-2).

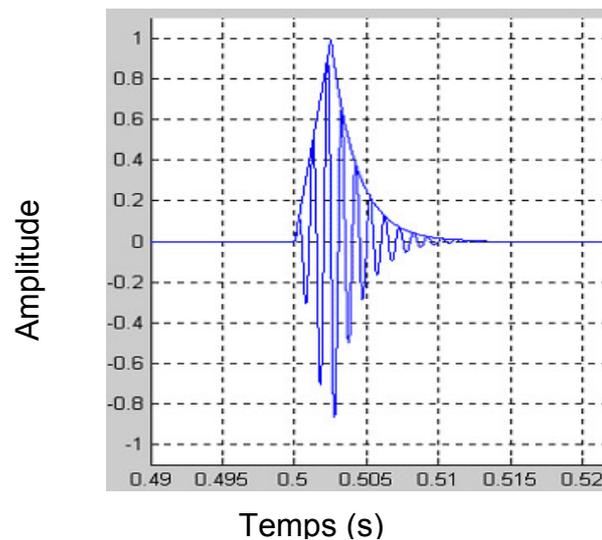


Figure IV-3 : Exemple d'enveloppe et d'un son synthétisé (enveloppe multipliée par la structure fine)

Le tableau IV-2 regroupe certaines des caractéristiques physiques des sons de synthèse.

	Description	Niveau crête (dB)	Temps de montée (ms)	Temps de descente (ms)	Energie (W.m ⁻² .s)
bimp25	Son pur 1 kHz	88,7	0,5	3,2	12,4
bimp26	Son pur 1 kHz	92,0	0,5	24,7	119,7
bimp27	Son pur 1 kHz	91,3	2,0	24,7	125,6
bimp28	Son pur 1 kHz	90,8	2,0	5,2	30,3
bimp29	Bruit blanc	91,5	0,2	24,4	68,5
bimp30	Bruit blanc	88,2	0,2	4,0	9,3
bimp31	Bruit blanc	90,6	0,3	66,8	208,3
bimp32	Bruit blanc	88,9	0,3	9,6	30,4
bimp33	Bruit blanc	89,7	0,5	4,3	13,4
bimp34	Bruit blanc	91,7	0,4	71,0	208,2
bimp35	Bruit blanc	89,4	0,3	9,7	30,8
bimp36	Bruit blanc	93,1	0,5	24,6	83,6
bimp37	Bruit blanc	91,3	1,5	24,1	75,3
bimp38	Bruit blanc	90,5	1,9	3,8	13,8
bimp39	Bruit blanc	92,3	1,8	71,0	210,0
bimp40	Bruit blanc	89,9	1,6	10,0	32,7

Tableau IV-2 : Caractéristiques physiques des seize sons impulsifs synthétisés.

IV-2.2 Auditeurs

Quinze auditeurs otologiquement normaux ont participé aux tests. Les auditeurs étaient des étudiants ou faisaient partie du personnel du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille. Ils étaient âgés de 20 à 50 ans.

IV-2.3 Dispositif expérimental

L'interface numérique/analogique était une carte son Oros. Différentes atténuations pouvaient être appliquées aux signaux avec des atténuateurs programmables Wilsonics (model PAT1). Les signaux étaient restitués via une enceinte amplifiée Genelec 1031A dans la salle anéchoïque du laboratoire.

La mesure des niveaux se faisait par l'intermédiaire d'un microphone Bruel & Kjaer (type 2669) situé à la place de la tête de l'auditeur en l'absence de celui-ci.

IV-2.4 Procédure

La sonie a été mesurée en utilisant une méthode d'estimation de grandeur sans référence (voir chapitre II-4-a). La tâche de l'auditeur consistait à estimer la sonie d'un son en donnant un nombre (réel positif) de son choix proportionnel à la sonie. Les sons étaient répétés 3 fois chacun et étaient présentés dans un ordre aléatoire, différent pour chaque auditeur. La sonie d'un son pour un auditeur est la moyenne géométrique de ses trois estimations.

La valeur finale de la sonie est la moyenne géométrique des estimations des 15 auditeurs.

IV-2.5 Résultats

Les valeurs de la sonie mesurée par la méthode d'estimation de grandeur pour des sons impulsionnels enregistrés et synthétisés, sont données dans le tableau IV-3.

Sons réels	Sonie		
		bimp21	14,6
bimp01	14,3	bimp22	10,6
bimp02	6,1	bimp23	8,4
bimp03	17,5	bimp24	8,6
bimp04	8,6	Sons de synthèse	Sonie
bimp05	10,3	bimp25	9,4
bimp06	4,3	bimp26	18,7
bimp07	16,4	bimp27	14,6
bimp08	16,8	bimp28	10,1
bimp09	4	bimp29	24,2
bimp10	19,3	bimp30	16,6
bimp11	9,3	bimp31	42,4
bimp12	9,4	bimp32	14,7
bimp13	9,9	bimp33	13,6
bimp14	14,2	bimp34	43,4
bimp15	6,5	bimp35	21,9
bimp16	9,1	bimp36	29,0
bimp17	15,1	bimp37	25,4
bimp18	21,2	bimp38	10,9
bimp19	13,05	bimp39	40,9
bimp20	16,1	bimp40	18,7

Tableau IV-3 : Tableau récapitulatif des valeurs de la sonie mesurée avec la méthode d'estimation de grandeur par quinze auditeurs pour des sons impulsionnels enregistrés et des sons impulsionnels de synthèse.

D'après la loi psychophysique de Stevens (1957), on s'attend à obtenir une relation de puissance entre la sonie (intensité subjective) et l'intensité physique (Energie / temps). On notera que pour les sons impulsionnels que nous étudions, l'intensité varie dans le temps, la sonie donc aussi.

Nous avons donc réalisé une régression linéaire sur les valeurs logarithmiques des caractéristiques physiques et de la sonie pour calculer les corrélations entre les différents paramètres (tableau IV-4).

Matrice de corrélations	Nc	Log(Tm)	Log(Td)	Log(E)	Log(S)
Nc	1	0,14	0,24	0,86	0,70
Log(Tm)	0,14	1	0,16	0,29	0,15
Log(Td)	0,24	0,16	1	0,66	0,68
Log(E)	0,86	0,29	0,66	1	0,88
Log(S)	0,70	0,15	0,68	0,88	1

Tableau IV-4 : Matrice de corrélations entre le niveau crête Nc, le logarithme du temps de montée (Tm), le logarithme du temps de descente (Td), le logarithme de l'énergie (E) et le logarithme de la sonie (S).

On constate tout d'abord une bonne corrélation entre la sonie et l'énergie (R=0,88). Sur la figure IV-4, nous avons donc tracé le logarithme de la sonie (S) en fonction du logarithme de l'énergie (E). En pointillés est représentée la droite de régression entre ces deux paramètres (R=0,88). L'équation de cette droite est :

$$\text{Log}(S) = 0,3 \text{ Log}(E) + 0,78 \quad (\text{IV-1})$$

soit :

$$S = 6 \cdot E^{0,3} \quad (\text{IV-2})$$

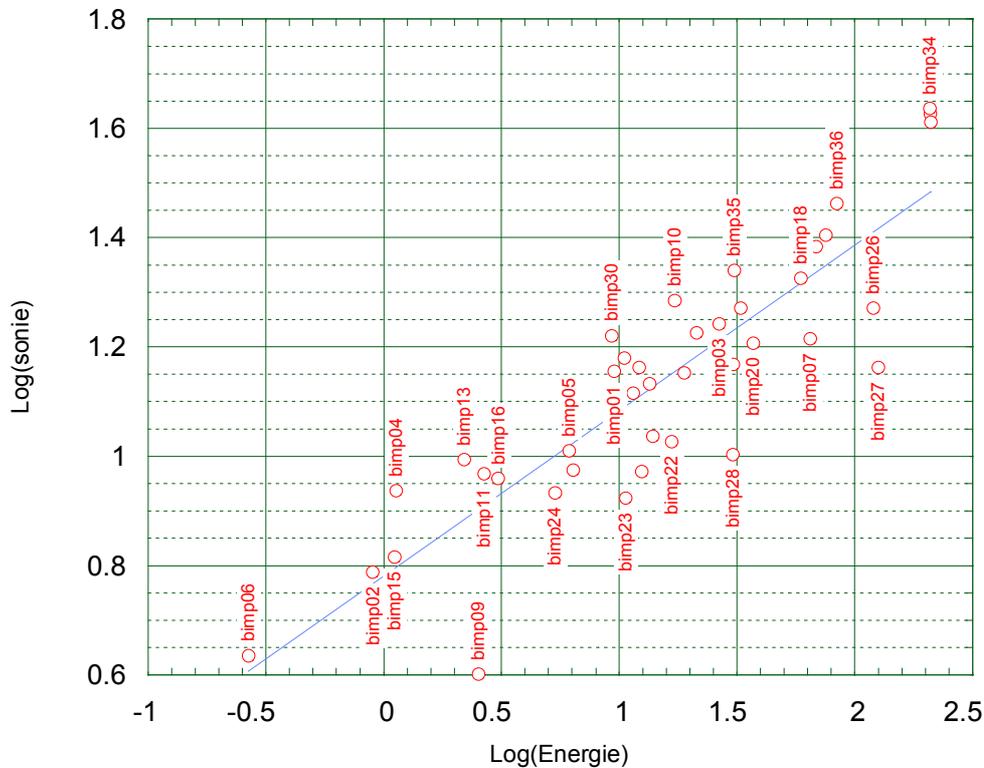


Figure IV-4 : Logarithme de la sonie en fonction du logarithme de l'énergie. La droite correspond à la fonction puissance (IV-2) sur une échelle logarithmique.

On notera que l'on trouve expérimentalement, pour des sons impulsionnels, ce que Stevens (1957) a montré concernant les sons stationnaires : la sonie est une fonction de l'énergie à la puissance 0,3.

Les valeurs des corrélations du tableau IV-4 permettent de montrer qu'il y a aussi une bonne corrélation entre la sonie et le niveau crête ($R=0,70$), ainsi qu'entre la sonie et le temps de descente ($R=0,68$). Cependant, ces trois paramètres (énergie, niveau crête et temps de descente) ne sont pas tous indépendants : l'énergie est corrélée au niveau crête ($R=0,86$) et au temps de descente ($R=0,66$). Afin de prendre en compte cette dépendance, nous avons réalisé une régression linéaire multiple incrémentielle pour trouver la relation linéaire entre le logarithme de la sonie et, le logarithme de l'énergie, le logarithme du temps de descente et le niveau crête. Le tableau IV-5 donne les coefficients de cette corrélation.

Régression multiple incrémentielle	R	R ²	R ² _{mod}	p
Log(Energie)	0,87	0,77	0,77	0
Log(Temps de descente)	0,89	0,79	0,02	0,085
Log(Niveau crête)	0,89	0,80	0,01	0,18

Tableau IV-5 : Coefficients de corrélation obtenus par une régression linéaire multiple incrémentielle entre le logarithme de la sonie et le logarithme de l'énergie (2^{ème} ligne). La troisième ligne donne la corrélation quand le temps de descente est ajouté à l'énergie pour l'établissement de la régression linéaire. Dans la dernière ligne, on donne la corrélation quand le niveau crête est ajouté au temps de descente et à l'énergie dans la régression linéaire. Le coefficient R²_{mod} traduit l'augmentation de R².

Une relation linéaire entre le logarithme de la sonie et le logarithme de l'énergie permet d'expliquer 77 % de la variance de la sonie ($R^2=0,77$). Lorsque le temps de descente est également pris en compte dans la régression linéaire, on augmente le pourcentage de variance expliquée par la régression de 2 % ($R^2_{\text{mod}}=0,02$). Le logarithme de la sonie est alors corrélé à 79 % à la relation linéaire de l'énergie et du temps de descente (voir relation IV-3). Ajouter le niveau crête à l'énergie et au temps de descente dans l'ajustement de la régression linéaire augmente le pourcentage de variance expliquée de 1%.

D'après les résultats de l'analyse incrémentielle de la régression multiple, l'influence du temps de descente sur la sonie ne serait pas significative ($p=0,085>0,05$). Cependant, il nous semble important de ne pas éliminer ce paramètre. En effet, de nombreuses études (voir Scharf, 1978) ont montré que la durée du signal avait une influence sur la sonie indépendamment de l'énergie. D'après nos données, la probabilité que le temps de descente n'ait pas d'influence sur la sonie est de 0,085 (soit 8,5 %). Ce pourcentage n'étant pas beaucoup plus élevé que 5%, nous préférons ne pas éliminer le temps de descente dès à présent. Nous détaillerons au paragraphe IV-3 une étude confirmant cette influence.

L'analyse permet aussi de montrer qu'il n'y a pas d'influence du niveau crête ni du temps de montée sur la sonie. En effet, la probabilité que le niveau crête n'ait pas d'influence sur la sonie est de 18 % ($p=0,18 \gg 0,05$), ce qui est loin d'être négligeable.

Ainsi, une régression linéaire entre le logarithme de la sonie et les logarithmes de l'énergie et du temps de descente nous permet d'établir un premier estimateur simple de la sonie de sons impulsionnels (« Estimateur impulsionnel ») :

$$\text{Log}(S)=0,27 \text{ Log}(E) + 0,1 \text{ Log}(Td) + C \quad (\text{IV-3})$$

Ce qui revient à écrire la relation :

$$S = k \cdot E^{0,27} \cdot T_d^{0,1} \quad (\text{IV-4})$$

avec S la sonie mesurée, k est une constante de normalisation, E l'énergie du signal et T_d le temps de descente du signal.

Le coefficient de corrélation entre la sonie calculée par ce nouvel estimateur et la sonie mesurée par les 15 auditeurs sur notre corpus de sons est de 0,89.

Cet estimateur de la sonie de sons impulsionnels a été testé sur une autre série de sons impulsionnels, pour vérifier sa validité. Les résultats sont donnés au paragraphe IV-4.

On notera que, contrairement à ce qui a été écrit au chapitre II, on ne trouve pas d'influence significative du temps de montée sur la sonie. Les signaux que nous avons étudiés ont en moyenne un temps de montée inférieur à 1,5 ms. Cela rejoint les résultats obtenus par Gustaffson (1974) qui indique que l'on n'observe une influence du temps de montée qu'à partir de durées supérieures à 1,5 ms.

IV-3 Influence de la durée de décroissance en fonction du niveau et de la fréquence

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré que l'énergie est le principal facteur influençant la sonie. Nous avons aussi montré que la prise en compte du temps de descente améliore légèrement l'estimateur de la sonie issu de la régression linéaire. Suite à ces travaux, Meunier et Rabau (2002), de l'équipe de psychoacoustique du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille, ont étudié l'influence du temps de descente en fonction de la fréquence et du niveau.

Je présente ici cette étude en détail car elle nous permet de confirmer l'influence du temps de descente sur la sonie et de conforter l'équation de l'estimateur de sonie d'impulsion.

IV-3.1 Stimuli

L'objectif de cette étude était de déterminer plus précisément l'influence du temps de descente sur la sonie. Pour étudier uniquement ce paramètre, tous les signaux ont été égalisés en énergie. Tous les sons étaient synthétisés et avaient la même forme temporelle que celle décrite au paragraphe IV-1 (voir figure IV-3). C'est-à-dire qu'ils présentaient un temps de montée rapide (modélisé par une fonction linéaire croissante), un temps de descente plus long (modélisé par une fonction exponentielle décroissante) et pas de palier.

Les structures temporelles fines étudiées étaient :

- Une bande de bruit centrée à 1 kHz avec une largeur de 300 Hz
- Un son pur à 4 kHz

Le temps de montée était fixé à 2 ms. Le temps de descente variait de 4 à 1000 ms : 4, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 et 1000 ms.

Les signaux étudiés étaient présentés à trois niveaux crêtes différents : 70, 85 et 100 dB, pour un temps de descente de 4 ms.

Les signaux ayant tous la même l'énergie, le niveau crête décroît quand le temps de descente augmente (voir figure IV-5).

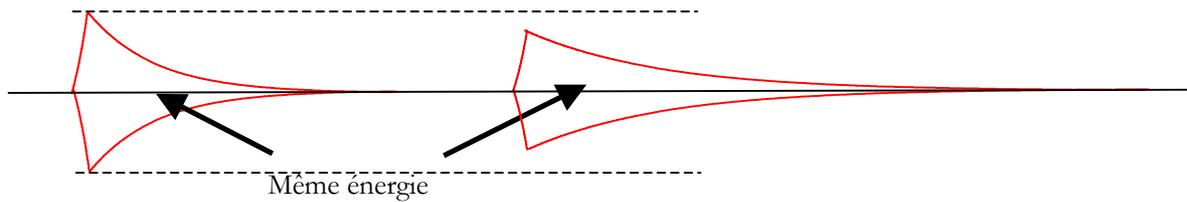


Figure IV- 5 : Exemple de signaux de même énergie mais de durées différentes.

Pour contrôler la valeur de l'énergie, celle-ci a été calculée à partir des sons enregistrés à la place de la tête de l'auditeur en l'absence de celui-ci. Les sons de même structure fine temporelle, pour un niveau crête donné à 4 ms, ont été égalisés en énergie à ± 1 dB.

La sonie a été mesurée par une méthode d'estimation directe sans référence (voir paragraphe II-4-a). Douze auditeurs ont participé à cette expérience.

IV-3.2 Résultats

Les résultats obtenus concernant la bande de bruit sont représentés sur la figure IV-6 et ceux concernant le son pur à 4 kHz sur la figure IV-7. Globalement, la sonie croît avec le temps de descente à énergie constante. Plus les niveaux crêtes sont faibles, plus l'augmentation de la sonie avec le temps de descente est importante. Pour les niveaux crêtes élevés, la sonie ne croît pas ou peu lorsque le temps de descente augmente. La relation entre la sonie (S) et le temps de descente (T_d) est de la forme :

$$S = A \cdot T_d^\alpha, \quad (IV-5)$$

où A et α sont des constantes ; α dépend du niveau du signal et de la structure fine temporelle du signal.

Une analyse statistique sur la variance a permis de montrer que, pour la bande de bruit (figure IV-6), la variation de la sonie avec le temps de descente est significative pour les niveaux crêtes de 70 dB ($F(N=12, dl=16)=2,4$; $p=0,002$) et 100 dB ($F(N=12, dl=16)=1,89$; $p=0,02$). Par contre, pour un niveau crête de 85 dB, la variation n'est pas significative ($F(N=12, dl=16)=0,9$; $p=0,55$). Cependant, les résultats observés sur la figure IV-6 (en haut à droite) ont poussé les auteurs à rejeter cette hypothèse. En effet, la tendance de la courbe montre que la sonie augmente avec le temps de descente. D'autres expériences auraient été souhaitables pour lever cette ambiguïté.

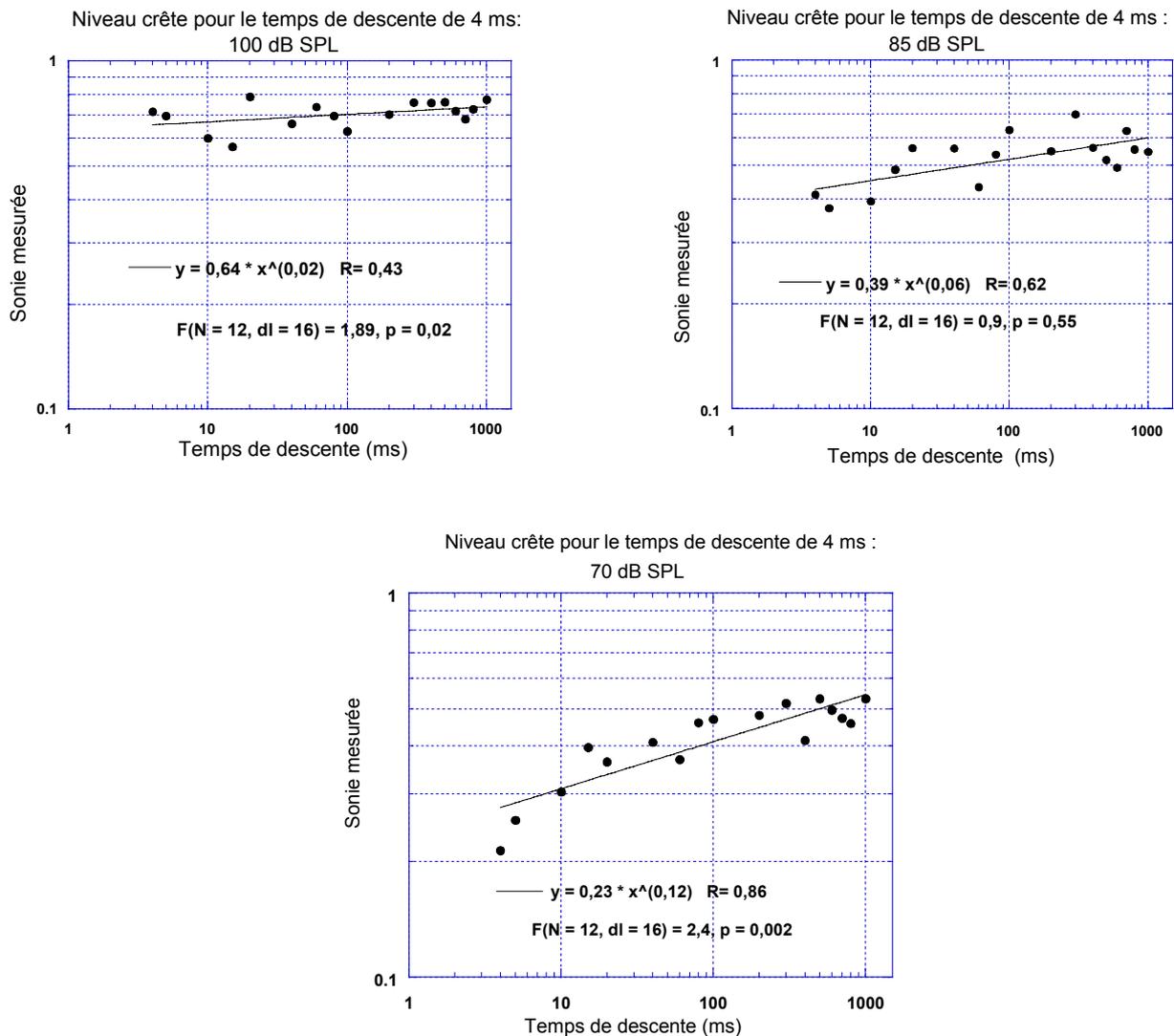


Figure IV-6 : Sonie mesurée en fonction du temps de descente pour une bande de bruit centrée sur 1 kHz et de largeur 300 Hz.

L'analyse de la variance, sur le son pur de 4 kHz (figure IV-7), permet de montrer que l'influence du temps de descente est significative pour les niveaux crêtes de 70 dB ($F(N=12, dl=16)=2,16 ; p=0,008$) et de 85 dB ($F(N=12, dl=16)=2,23 ; p=0,005$). La sonie augmente lorsque le temps de descente augmente. Par contre, il n'y a pas de variation significative de la sonie avec le temps de descente pour les niveaux crêtes de 100 dB ($F(N=12, dl=16)=0,6 ; p=0,88$).

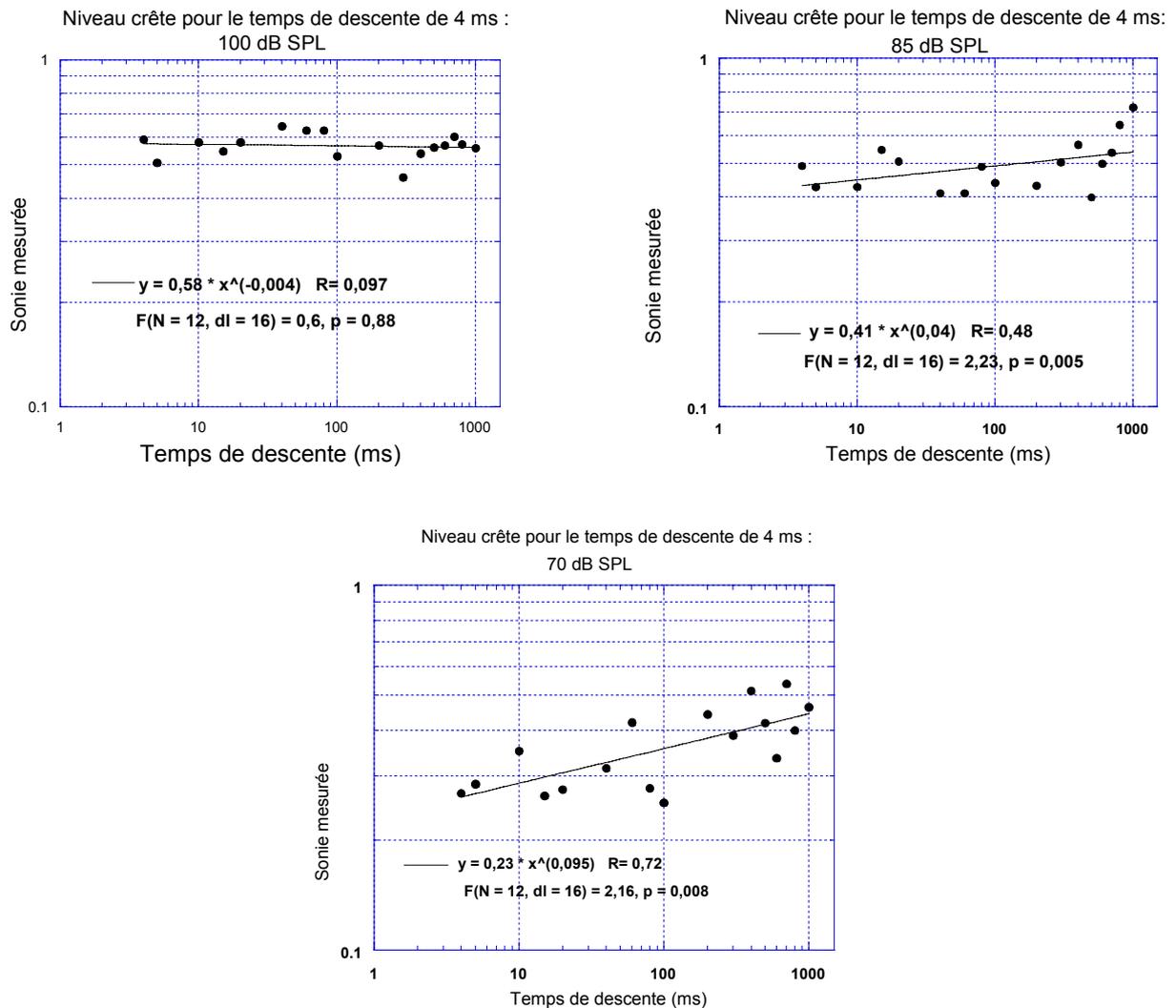


Figure IV-7 : Sonie mesurée en fonction du temps de descente pour un son pur de 4 kHz.

L'influence du temps de descente sur la sonie dépend clairement du niveau crête. Cette influence est plus marquée pour une bande de bruit centrée à 1 kHz avec une largeur de bande de 300 Hz de faibles niveaux crêtes (\leq ou $=$ 70 dB SPL).

La sonie dépend du temps de descente selon une fonction puissance (relation IV-5). La valeur de l'exposant α se situe autour de 0,1 pour des niveaux crêtes de 70 dB. Cette valeur de α diminue de moitié pour une augmentation du niveau crête de 15 dB (voir figures IV-6 et IV-7).

On peut ainsi confirmer, suite à cette étude de Meunier et Rabau (2002), l'influence du temps de descente sur la sonie et la validité de l'équation IV-4 de notre estimateur de sonie. Notons aussi que l'exposant de la fonction puissance du temps de descente dépend du niveau crête des signaux.

IV-4 Test de l'estimateur de sonie d'impulsion

Le but de ce paragraphe est, dans un premier temps, de tester notre estimateur de sonie de sons impulsionnels sur une nouvelle série de sons et, dans un deuxième temps, de comparer les résultats aux modèles de sonie existants pour des sons non stationnaires c'est-à-dire ici aux modèles de Zwicker et Fastl (1999) et de Glasberg et Moore (2002).

IV-4.1 Stimuli

Les sons impulsionnels étudiés étaient des sons issus des bruits de chantier (chant1, chant3, imp4, imp2 et imp3 ; voir paragraphe III-2.2) et des sons utilisés pour l'élaboration de l'estimateur de sonie d'impulsion (voir paragraphe IV-2) restitués à des niveaux crêtes différents. Les niveaux crêtes ont été modifiés pour cette expérience et sont compris entre 61 et 83 dB SPL. Les six derniers sons du tableau IV-6 sont issus de l'étude sur les bruits de chantier décrite dans l'introduction de la thèse.

Noms	Description	Niveaux crêtes en dB SPL	Durées totale (ms)
bimp01	2 pierres	80	30
bimp10	Fer sur fer	78	180
bimp13	Marteau sur carreau	73	200
bimp14	Marteau sur fer	81	60
bimp20	Triangle	78	200
bimp22	Wood-block manche	78	115
bimp23	Wood-block	83	50
chant1	Coup de marteau sur béton	71	350
imp6	2 pierres	79	30
chant3	Coup de marteau sur fer	65	840
imp4	Coup de marteau sur fer	63	380
imp2	Coup de marteau sur béton	61	390
imp3	Coup de marteau sur bois	64	240

Tableau IV-6 : Récapitulatif des signaux testés : description des sons, niveaux crêtes en dB et durée totale du signal en ms.

IV-4.2 Auditeurs

La sonie a été mesurée par quinze auditeurs âgés de 25 à 40 ans (4 femmes et 11 hommes). La plupart des auditeurs étaient des étudiants ou des personnels du laboratoire d'acoustique de Bochum en Allemagne (Institut für Kommunikationsakustik Ruhr-Universität). L'expérience a eu lieu à Bochum dans la salle anéchoïque de dimension 5,13 m de largeur x 4,98 m de profondeur x 4,76 m de hauteur avec une fréquence de coupure basse de 110 Hz.

IV-4.3 Dispositif expérimental

Les sons étaient transmis via une interface numérique/analogique Power-SDAC PD1 (Tucker & Davis). Le niveau des sons était réglé par rapport au niveau d'un son pur de 98 dB SPL à 1 kHz à l'aide d'un microphone AKG (type C414 B-ULS) situé à la place de la tête de l'auditeur en l'absence de celui-ci. Les sons étaient amplifiés via un amplificateur Yamaha et étaient restitués par une enceinte Génélec (type 2029) dans la salle anéchoïque.

IV-4.4 Procédure

La sonie a été mesurée par une méthode d'estimation directe sans référence. Pour chaque son, l'auditeur réalisait deux estimations. L'ordre de présentation des sons était aléatoire et différent pour chaque auditeur. Dans chaque session, un son de référence de sonie connue (son pur de

1kHz à 40 dB SPL soit 1 sone) était présent pour normaliser les résultats et pouvoir calculer la sonie en sones. La sonie d'un son était la moyenne géométrique des deux estimations des quinze auditeurs.

IV-4.5 Résultats

Une de nos volontés durant ce travail de recherche était de travailler avec des niveaux d'isotonie en phones, plus proches de la mesure physique et plus facile à maîtriser que le sone pour des personnes n'ayant que très peu de notion en psychoacoustique.

Nous avons calculé les niveaux d'isotonie de chaque son, à partir de la relation IV-6, ainsi que le N5, le Nmax, le Nimp, le STLmax, le LTLmax et l'ESI définis ci-dessous.

$$\text{Phones} = 40 + 10 \cdot \log_2(\text{Sones}) \quad (\text{IV-6})$$

Le N5 est le niveau d'isotonie dépassé 5% du temps. Cet indicateur a été préconisé par Zwicker pour estimer la sonie globale de sons variant dans le temps. Le Nmax et le Nimp sont des indicateurs que nous proposons. Nous ne les définirons pas ici pour des raisons de confidentialité industrielle. Nous avons choisi d'utiliser ces deux indicateurs car, à la différence du N5, ils sont indépendants de la durée du son. Le calcul du Nmax et du Nimp présente un autre avantage, car on s'affranchit, dans leur calcul, de la détermination de la durée qui est toujours une tâche délicate pour ce type de son.

Le STLmax et le LTLmax sont les maximums du niveau d'isotonie, à court terme et à long terme. Ces indicateurs sont préconisés par Glasberg et Moore pour estimer la sonie globale de sons courts (STLmax) et de sons variant lentement dans le temps (LTLmax).

L'ESI est le niveau d'isotonie obtenu par notre estimateur de sonie d'impulsion. La constante de normalisation de l'estimateur (k de la relation IV-4) a été ajusté sur ces données. Pour des raisons de confidentialité, elle n'est pas communiquée.

La figure IV-8 représente les niveaux d'isotonie mesurés ainsi que les indicateurs calculés (N5, Nimp, Nmax, STLmax, LTLmax), et le niveau d'isotonie d'impulsion (ESI). Les lignes reliant les points expérimentaux n'ont pas de sens psychoacoustique, mais elles permettent une meilleure visibilité des résultats de chacun des indicateurs calculés pour les sons, classés dans un ordre croissant du niveau d'isotonie mesuré.

Le tableau IV-7 donne le MAR (moyenne des valeurs absolues de la différence entre le niveau d'isotonie calculé et le niveau d'isotonie mesuré), le Rmax (valeur absolue de l'erreur maximum obtenue par les modèles de sonie ou l'estimateur ESI), le Rmean (écart moyen) et le Rstd (écart type des écarts moyens).

Il apparaît clairement que les indicateurs (Nmax, Nimp, N5 et STLmax) donnent des niveaux d'isotonie supérieurs à ceux mesurés. Le modèle de Moore 2002 donne des écarts légèrement plus grands que ceux obtenus avec le modèle de Zwicker 1999 (MAR = 13 phones et Rmax = 18 phones). De manière relative, ces deux modèles donnent des résultats assez proches. ont tendance à donner des niveaux d'isotonie supérieurs à ceux mesurés (Rmean = MAR = environ 10 phones).

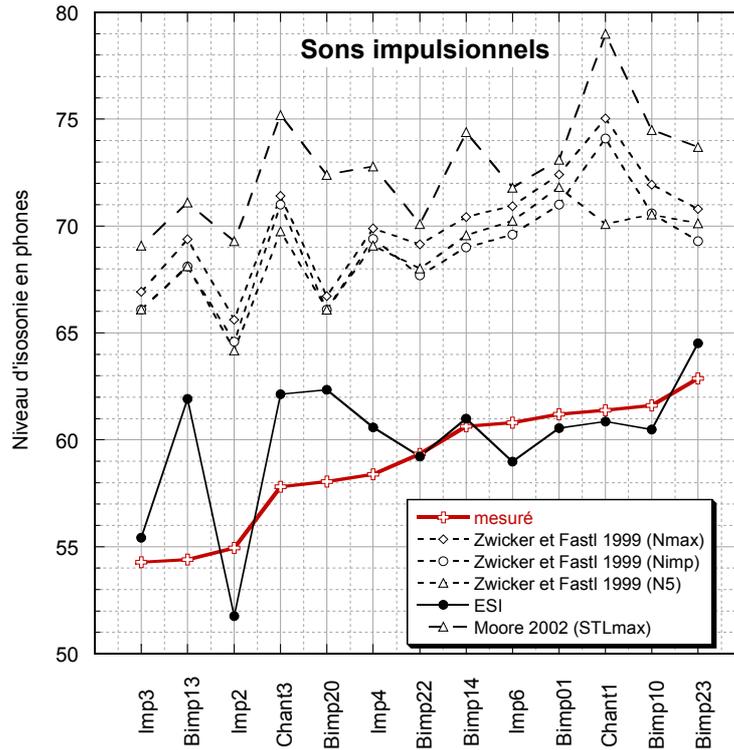


Figure IV-8 : Niveaux d'isotonie en phones pour les différents sons étudiés. Les croix représentent le niveau d'isotonie mesuré. Les losanges creux représentent le Nmax, les cercles vides le Nimp, les carrés le N5, les cercles pleins l'ESI et les triangles le STLmax.

Sons impulsionnels de l'environnement	
MAR (phones)	
Nmax	11
Nimp	10
N5	9
ESI	2
STLmax	13
Rmax (phones)	
Nmax	15
Nimp	14
N5	14
ESI	8
STLmax	18
Rmean (phones)	
Nmax	11
Nimp	10
N5	9
ESI	1
STLmax	13
Rstd	
Nmax	3
Nimp	3
N5	3
ESI	3
STLmax	4

Tableau IV-7 : Récapitulatifs des indices proposés dans le chapitre III afin de pouvoir évaluer l'efficacité des modèles de sonie.

L'ESI, dont la constante de normalisation a été ajusté sur ces données, donne un niveau d'isotonie répartis uniformément autour de ceux mesurés ($R_{\text{mean}} = 1$). On ne constate pas non plus de biais systématique ($R_{\text{std}} > 3$).

L'estimateur que nous avons proposé, pour ces signaux, prédit le mieux le niveau d'isotonie mesuré avec un MAR de 2 phones. Cependant, il a été ajusté sur ces données ce qui atténue quelque peu la portée de ces résultats. Il nous faut donc poursuivre cette recherche de validation et la comparaison avec les modèles existants avant de conclure sur l'efficacité de notre estimateur de sonie d'impulsion (voir chapitre VIII).

Notons aussi que le niveau d'isotonie mesuré est déterminé à partir de la méthode d'estimation directement et non à partir d'une méthode donnant directement le niveau d'isotonie telle que la méthode d'ajustement. Nous verrons dans le chapitre suivant que le niveau d'isotonie mesuré ainsi peut être quelque peu inférieur à celui obtenu avec la méthode d'ajustement. Cela peut expliquer la surestimation des modèles par rapport aux mesures.

IV-5 Conclusion

Les travaux antérieurs à notre étude montrent que la sonie des sons impulsionnels dépend non seulement de l'énergie ou du temps de descente mais aussi du niveau crête ou du temps de montée. Ces études ont été faites pour la plupart sur des bruits en créneau, c'est-à-dire que les sons présentaient un palier au maximum d'amplitude. Dans notre étude, nous avons voulu étudier des bruits impulsionnels « naturels », par opposition à un son de synthèse. Les sons impulsionnels « naturels » ne présentent pas de palier.

L'influence du temps de montée ou du niveau crête sur la sonie n'a pas été mise en évidence pour les signaux que nous avons étudiés. Il se peut que les temps de montée de nos sons tests soient dans une tranche de durée ($< 1,5$ ms) où effectivement il n'y a pas d'influence sur la sonie (Gustaffson, 1974). De plus, le niveau crête était corrélé à l'énergie. Son influence est donc dissimulée dans la corrélation entre la sonie et l'énergie.

Pour résumer, dans le cas de sons de durées courtes (< 1 s) sur lesquels porte notre étude, la sonie estimée (S) dépend essentiellement de l'énergie ($S = kE^{0,3}$; $R = 0,87$) ce qui est en accord avec le modèle de l'oreille comme intégrateur d'énergie. Cependant, on a observé que le temps de descente, proportionnel à la durée du signal, devait être également pris en compte pour une meilleure estimation de la sonie.

Une étude a été réalisée par Meunier et Rabau (2002) pour déterminer l'influence du temps de descente, à énergie constante, sur la sonie. L'influence du temps de descente sur la sonie dépend du niveau et de la fréquence. En effet, pour des niveaux crêtes peu élevés (70 dB) l'influence du temps de descente est significative. Cette influence s'amenuise lorsque le niveau crête augmente et la sonie augmente d'autant moins avec la durée. De plus, cette étude montre aussi que la sonie augmente plus rapidement quand le temps de descente augmente pour la bande de bruit.

Nous avons voulu, dans un dernier temps, tester le « modèle impulsionnel » que nous avons établi sur une série de sons impulsionnels. Ainsi, nous avons montré que ce modèle estime, en

moyenne, la sonie de sons impulsionnels à 2 phones près, avec cependant quelques écarts importants.

On peut conclure de manière générale que la sonie dépend essentiellement de l'énergie mais aussi du temps de descente. Ainsi, à énergie constante, la sonie augmente quand le temps de descente du signal augmente. On retrouve donc la relation 2 décrite au paragraphe II-2.2-b (Scharf, 1978).

Cependant, les écarts types sur nos données sont assez importants (de l'ordre de 7 phones). Stephens (1974) et Florentine et coll. (1996) ont montré que la procédure expérimentale est un facteur pouvant expliquer la disparité des résultats. Le chapitre suivant a donc pour but de déterminer la méthode la mieux adaptée pour mesurer la sonie selon le type de son (sons stationnaires, sons impulsionnels et trains d'impulsions).

V

COMPARAISON DE METHODES DE MESURE DU NIVEAU D'ISOSONIE POUR DES SONS STATIONNAIRES, DES SONS IMPULSIONNELS ET DES TRAINS D'IMPULSIONS

Après avoir décrit les différents modèles de sonie existants et avoir proposé un nouvel estimateur de sonie d'impulsion (ESI), nous nous sommes intéressés aux différentes méthodes expérimentales de mesure du niveau d'isophonie pour différents types de sons.

A notre connaissance, peu d'études ont été réalisées sur la comparaison des méthodes dans le but de déterminer celle qui présentera le meilleur compromis entre précision, rapidité et fiabilité pour mesurer la sonie ou le niveau d'isophonie (Marvit et coll., 2003). Il est important, pour la métrologie, de connaître la méthode de mesure du niveau d'isophonie la mieux adaptée selon le type de son.

Cette nouvelle étude a donc trois objectifs : le premier est de connaître les avantages et les inconvénients de chaque méthode ; le deuxième est de déterminer la méthode la plus appropriée en fonction du type de sons et de la précision désirée afin d'obtenir une référence fiable autour de laquelle construire l'estimateur de sonie ; le troisième est de définir l'erreur maximale acceptable par le modèle de sonie.

Lors de cette étude, nous avons comparé quatre méthodes de mesure de la sonie. Les deux premières sont fréquemment utilisées. Il s'agit de la méthode d'estimation de grandeur sans référence (Stevens, 1956) et de la méthode d'ajustement (Gescheider, 1985). La troisième procédure testée est la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles (2AFC-2I) du type 2down-1up et 2up-1down (Jestead, 1980). La dernière méthode a été proposée par Buus et ses collaborateurs (1997) pour éviter certains biais présents dans d'autres méthodes adaptatives. Il a utilisé une méthode adaptative à poursuites multiples (Buus et coll., 1997).

V-1 Méthode

V-1.1- Stimuli

Les sons ont été classés en trois groupes, décrits dans les tableaux V-1, V-2 et V-3. Chaque groupe représente une catégorie de sons. Nous avons étudié neuf sons stationnaires, dix sons impulsionnels et dix trains d'impulsions. La moitié des signaux constituant notre banque d'échantillons sonores a été enregistrée et l'autre moitié synthétisée. Les enregistrements ont été effectués dans la salle anéchoïque du laboratoire.

a) *Sons stationnaires*

Les sons stationnaires ont été synthétisés à partir de sons purs et d'une bande de bruit centrée sur 1 kHz (lignes 1 à 3 du tableau V-1) ou enregistrés (six dernières lignes du tableau V-1). Les conditions d'enregistrement sont décrites dans le paragraphe III-2.1.

Nom du son	Description	Niveau en dB SPL	Durée totale
StaS1	bande de bruit centrée sur 1kHz de largeur 40Hz	60,5	1 s
StaS2	Son pur 200 Hz	77,9	1 s
StaS3	Son pur 4000 Hz	70,9	1 s
StaE1	Cailloux versés	59,5	1 s
StaE2	Moto au ralenti	61,6	1 s
StaE3	Perceuse	59,3	1 s
StaE4	Vélo en roue libre	62,3	1 s
StaE5	Note jouée à la flûte	66,8	1 s
StaE6	Moto au ralenti	41,7	1 s

Tableau V- 1 : Description des neuf sons stationnaires utilisés dans l'étude.

b) *Sons impulsionnels*

Les sons impulsionnels que nous avons utilisés présentent tous la même forme, indiquée à la figure IV-1, c'est-à-dire un temps de montée rapide (< 5 ms), pas de palier, et un temps de descente plus ou moins long (de 3 à 71 ms). Les impulsions ont été soit synthétisées à partir d'un bruit blanc et d'un son pur de 1 kHz, soit enregistrées (voir paragraphe IV-2).

Nom du son	Description	Niveau crête en dB SPL	Durée totale
ImpS1	Sinus de 1 kHz	89,9	95 ms
ImpS2	bruit blanc	84,6	285 ms
ImpS3	bruit blanc	79,2	40 ms
ImpS4	bruit blanc	69,6	100 ms
ImpS5	bruit blanc	79,6	285 ms
ImpE1	Choc entre 2 pierres	77,7	30 ms
ImpE2	Claquement de doigt dans la bouche	83,5	45 ms
ImpE3	Claquement de langue	70,0	10 ms
ImpE4	Bouchon de champagne	76,0	100 ms
ImpE5	jouet clic-clac	88,2	3 ms

Tableau V-2 : Description des dix sons impulsionnels utilisés dans l'étude.

c) *Trains d'impulsions*

Les trains d'impulsions de synthèse, notés TImpS sont construits à partir d'une impulsion répétée (ImpE1) à son identique à une fréquence de n impulsions par seconde (quatre impulsions par seconde pour le son TImpS1, six pour le son TImpS2, dix pour les sons TImpS3 et TImpS5 et vingt pour les sons TImpS4 et TImpS6). Trois sons de l'environnement (brise-roche hydraulique, coups de marteau sur du fer et coups de marteau sur du béton) ont été enregistrés (voir paragraphe III-2.2.1). Dans le tableau V-3 sont présentés les différents sons étudiés avec leur nom, leur niveau crête, leur description et leur durée.

Le son TImpE1 est constitué de vingt-cinq coups de brise-roche hydraulique (avec une fréquence de huit par seconde). Le son TImpE4 est constitué du même nombre de coups et avec la même fréquence de répétition, mais il est restitué à un autre niveau. Dans le son TImpE2 deux

impulsions sont présentées avec une fréquence d'une impulsion par seconde. Cinq impulsions constituent le son TImpE3 dont la fréquence de répétition est de trois impulsions par secondes.

Nom du son	Description	Niveau en dB SPL	Durée totale
TImpS1	4 impulsions / s	62,7	1 s
TImpS2	6 impulsions / s	67,7	2 s
TImpS3	10 impulsions / s	82,7	2 s
TImpS4	20 impulsions / s	67,7	2,5 s
TImpS5	10 impulsions / s	59,7	2 s
TImpS6	20 impulsions / s	77,7	2,5 s
TImpE1	Brise roche hydraulique	75	3,8 s
TImpE2	Coups de marteau sur fer	84,5	1,5 s
TImpE3	Coups de marteau sur béton	65	2,3 s
TImpE4	Brise roche hydraulique	65	3,8 s

Tableau V- 3 : Description des dix trains d'impulsions utilisés dans l'étude.

V-1.2- Auditeurs

Les tests ont été réalisés par quatorze auditeurs (cinq femmes et neuf hommes) âgés de 25 à 58 ans dans la salle anéchoïque du laboratoire. La moitié des auditeurs n'avaient pas d'expérience particulière en matière de tests psychoacoustiques. Tous les auditeurs avaient une audition normale.

V-1.3- Dispositif expérimental

Le principe du montage expérimental pour les tests de mesure de la sonie était le même pour toutes les méthodes testées. Les fichiers sons étaient convertis en signal analogique à l'aide d'une carte son Oros. Le niveau des sons variait à l'aide d'un atténuateur programmable Wilsonics (model PATT). Les sons étaient restitués par une enceinte Génélec (type 1031A) dans la salle anéchoïque du laboratoire.

V.1.4- Procédures

Dans ce paragraphe, nous décrivons les tâches des auditeurs lors des mesures du niveau d'isotonie. Le principe de chaque méthode est décrit au paragraphe II-4. Chaque test est divisé en trois parties, chacune consacrée à un type de son. Ainsi, chaque auditeur a passé neuf tests (trois méthodes et trois types de sons). Tous les tests ont été réalisés dans la salle anéchoïque du laboratoire.

Avant de continuer, il est important de définir deux termes, « son test » et « son de comparaison », qui seront utiles dans la description des tests psychoacoustiques mis en place à l'exception de la méthode d'estimation de grandeur. Le son test est le son dont on veut connaître la sonie. Le son de comparaison est celui dont on connaît a priori la sonie, et dont le niveau peut être modifié. En pratique, nous avons choisi une bande de bruit centrée sur 1 kHz, de largeur 120 Hz, donc inférieure à la largeur d'une bande critique (160 Hz) et d'un ERB (130 Hz) à 1 kHz. Lorsqu'il y a égalité des sonies, le niveau du son de comparaison correspond au niveau d'isotonie du son test. La durée du son de comparaison est de 1 seconde pour les sons stationnaires et les trains d'impulsions. Pour les sons impulsionsnels, nous avons choisi un son de comparaison de 500 ms car il est plus facile d'ajuster le son de comparaison lorsque la durée de celui-ci est plus courte (Pedersen et coll., 1977).

a) Méthode d'estimation de grandeur sans référence (notée EST)

Dans ce test, les sons, présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque auditeur, étaient répétés 3 fois chacun. L'auditeur estimait la sonie de chaque son en donnant un nombre de son choix proportionnel à la sonie. Pour chaque série de sons, un son de sonie connue (son pur de 1kHz à 80 dB SPL soit 16 sonies) était présent pour pouvoir normaliser les estimations de sonie des quatorze auditeurs.

Ce test durait environ 3 minutes pour 10 sons.

b) Méthode d'ajustement (notée AJUST)

L'auditeur entendait successivement le son test et le son de comparaison. Un silence de 300 ms séparait les deux sons. Chaque paire de sons était séparée de 400 ms. La tâche de l'auditeur consistait à ajuster le niveau du son de comparaison de manière à ce qu'il ait la même sonie que le son test. L'auditeur pouvait faire varier, à l'aide d'un boîtier de commande, le niveau du son de comparaison de plus ou moins 5, 2 ou 1 dB. La paire de sons était présentée sans arrêt jusqu'à ce que le sujet ait terminé l'égalisation. Une nouvelle paire lui était alors présentée. Les différents sons étaient présentés dans un ordre aléatoire, différent pour chaque auditeur. Le niveau du son de comparaison, au départ du test, était fixé aléatoirement au-dessus (environ + 15 dB) ou au-dessous (environ -15 dB) du niveau d'isotonie probable du son test (des tests ayant été faits au préalable pour avoir une première évaluation des niveaux). Ceci évite un biais dû à une approche ascendante ou descendante systématique du niveau d'isotonie du son test.

Le même test était répété, mais le son de comparaison était cette fois présenté en premier. Réaliser le test d'égalisation dans les deux sens permet de compenser le biais qui est de juger le plus souvent le son présenté en second plus fort.

Ce test durait environ 20 minutes pour 10 sons pour obtenir le niveau d'isotonie final.

c) Méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles de type 2down-1up et 2up-1down (notée 2I - 2AFC)

Dans ce test, l'auditeur entendait le son test suivi du son de comparaison ou l'inverse, avec la même probabilité. Les deux sons étaient séparés par 300 ms de silence. La tâche de l'auditeur était d'indiquer lequel des deux sons était le plus fort. Le niveau du son de comparaison, au départ du test, était présenté environ 15 dB au-dessus ou au-dessous du niveau d'isotonie probable du son test (respectivement pour 2down-1up et 2up-1down).

La procédure 2down-1up fait converger le niveau du son de comparaison vers la valeur pour laquelle il est jugé plus fort que le son test dans 71 % des essais (Levitt, 1971). Ainsi, la procédure fournit une estimation du niveau pour lequel le son de comparaison est perçu « juste plus fort » que le son test (Schlauch et Wier, 1987). Une séquence s'arrêtait à la sixième inversion et on calculait le seuil en faisant la moyenne des niveaux aux quatre dernières inversions. Pour chaque son, trois mesures de seuil étaient réalisées. Le niveau d'isotonie « juste plus fort » était alors la moyenne des trois valeurs des seuils obtenus. Cette opération a été effectuée pour tous les sons, présentés dans un ordre aléatoire.

Le principe de la procédure 1down-2up est le même que celui de la méthode adaptative 2 down-1up. Cette méthode permet d'obtenir le niveau d'isotonie « juste moins fort ».

En faisant la moyenne des valeurs du niveau d'isotonie obtenues avec les méthodes 2down-1up et 1down-2up on obtient le niveau d'isotonie. Obtenir le niveau d'isotonie par cette méthode permet d'obtenir un résultat plus stable qu'avec la méthode adaptative 1down-1up (Gelfand, 1998).

Ce test durait environ deux fois 40 minutes (en moyenne 4 minutes par son) pour 10 sons.

d) Méthode adaptative à poursuites multiples (notée Mult 2I-2AFC)

Le principe de cette méthode est le même que celui de la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles du type 2down-1up et 2up-1down mais au lieu de suivre une seule séquence, plusieurs sons sont mélangés et donc plusieurs séquences sont alors simultanées. Pour les sons stationnaires ainsi que pour les trains d'impulsions nous avons mélangé quatre sons. Pour les sons impulsionnels, leurs durées étant plus courtes, nous avons mélangé cinq sons. Nous avons alors fait deux tests de cinq sons dont un son était commun aux deux tests.

A chaque essai, la paire de sons était choisie aléatoirement parmi les séquences qui n'étaient pas déjà finies. La fin d'une séquence avait lieu après la sixième inversion. Nous calculions alors une moyenne sur les quatre dernières inversions. Cette opération avait lieu trois fois comme pour la méthode 2AFC-2I.

De même que pour la méthode adaptative, la moyenne des valeurs du niveau d'isotonie obtenues avec les méthodes 2 down – 1 up et 1 down – 2 up permet d'obtenir le niveau d'isotonie.

Une série de quatre sons se terminait au bout de 40 minutes environ. Il fallait donc 80 minutes (2down-1up et 2up-1down) pour déterminer le niveau d'isotonie pour 4 sons.

Le tableau V-4 permet une vision plus globale des conditions expérimentales en détaillant les quatre méthodes de mesure de la sonie.

Méthodes	Estimation	Ajustement 1	Ajustement 2	2down 1up	2up 1down	Multitracking 2down 1up	Multitracking 2up 1down
Son test (T)	9 sons stationnaires, 10 sons impulsionnels et 10 trains d'impulsions					4 sons stationnaires, 9 sons impulsionnels et 4 trains d'impulsions	
Ordre de présentation de T	Aléatoirement, différent pour chaque auditeur						
Son de comparaison (C)	Pas de son de comparaison	Spectre : Bande de bruit centrée à 1 kHz de largeur 120 Hz < une bande critique					
		Durée : 1 s pour les sons stationnaires et les trains d'impulsions 500 ms pour les sons impulsionnels					
Ordre de présentation de T et C	T seul	T & C	C & T	T & C ou C & T aléatoirement			
Silence entre T et C	500 ms						
Niveaux de départ de C par rapport à T	Aléatoirement 15 dB au-dessus ou dessous		15 dB au-dessus	15 dB au-dessous	15 dB au-dessus	15 dB au-dessous	
Tâche	Donner un nombre de son choix proportionnel à la sonie	Ajuster le niveau de C pour que T et C aient la même sonie		Indiquer lequel des 2 sons est le plus fort			
Durée du test en minutes pour 10 sons	3	10	10	40	40	40	40
Sujets	14 (5 femmes et 9 hommes)						
Age	25 à 58 ans						

Tableau V-4 : Conditions expérimentales pour les différentes méthodes de mesure de la sonie

V-1.5- Analyse des données

a) Estimation directe

Nous avons calculé la moyenne géométrique des trois estimations données par chacun des quatorze sujets pour chaque son. Un son pur de 1000 Hz à un niveau de 80 dB SPL, de sonie connue (16 sones) faisait partie des échantillons sonores et servait de référence.

La sonie moyenne pour chacun des auditeurs et de chaque son était normalisée par rapport à la sonie du son de référence :

sonie du son test = estimation donnée au son test * 16 / estimation donnée au son de référence.

La sonie de chaque son est la moyenne géométrique des valeurs obtenues pour les quatorze auditeurs. Nous supposons notre groupe d'auditeurs « normal » du point de vue de la fonction de sonie normale (exposant de la pente de la fonction de sonie égal à 0,6). On peut donc déduire le niveau d'isotonie (L) à partir de la sonie (S) en utilisant la relation II-1' :

$$L = 40 + 10 \log_2(S)$$

b) Ajustement

Théoriquement, le niveau du son de comparaison donne directement le niveau d'isotonie du son test en phones. Le niveau d'isotonie final est la moyenne des valeurs obtenues lors des ajustements dans les deux sens.

c) Adaptative à choix forcé sur deux intervalles de type 2down-1up et 2up-1down

Le niveau d'isotonie est obtenu par la moyenne des deux valeurs obtenues par les procédures 2 down-1 up et 2 up-1 down.

d) Adaptative à poursuites multiples

Le niveau d'isotonie est obtenu par la moyenne des deux valeurs obtenues par les procédures 2 down-1 up et 2up-1 down. Le principe est le même que pour la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles de type 2down-1up et 2up-1down.

V-2 Résultats et discussion

Pour choisir la méthode la mieux adaptée à la mesure d'un niveau d'isotonie, il est nécessaire de considérer, non seulement la cohérence des résultats et la durée de la procédure, mais aussi la précision. Les niveaux d'isotonie obtenus ne peuvent pas être comparés à des résultats de la littérature ou être considérés comme juste ou faux. La cohérence des résultats sera alors relative. Un des points importants dans cette étude est donc la comparaison des résultats obtenus avec les quatre méthodes de mesure. Un autre aspect intéressant, abordé plus loin dans le paragraphe V-2.2, est l'étude de la dispersion des résultats, traduite ici par le calcul des écarts types, pour déterminer la précision des méthodes.

V-2.1 Cohérence des méthodes

Les figures V-1, V-2 et V-3 montrent les niveaux d'isotonie obtenus par les différentes méthodes psychoacoustiques pour les sons décrits précédemment. On notera que la méthode adaptative à poursuites multiples (Mult 2I-2AFC) n'a été utilisée que sur quatre sons stationnaires, neuf sons impulsionnels et quatre trains d'impulsions. Cette méthode impose une mesure très longue et c'est pour cela que nous avons volontairement limité le nombre de sons. Chaque point indique le niveau d'isotonie moyen des quatorze auditeurs, pour un son et une méthode donnés. Les valeurs des niveaux d'isotonie, pour un même son, ont été légèrement décalées suivant l'axe des abscisses pour permettre une meilleure lisibilité des écarts types. Les écarts types, représentés par les barres verticales, sont calculés sur les mesures du niveau d'isotonie final des quatorze auditeurs.

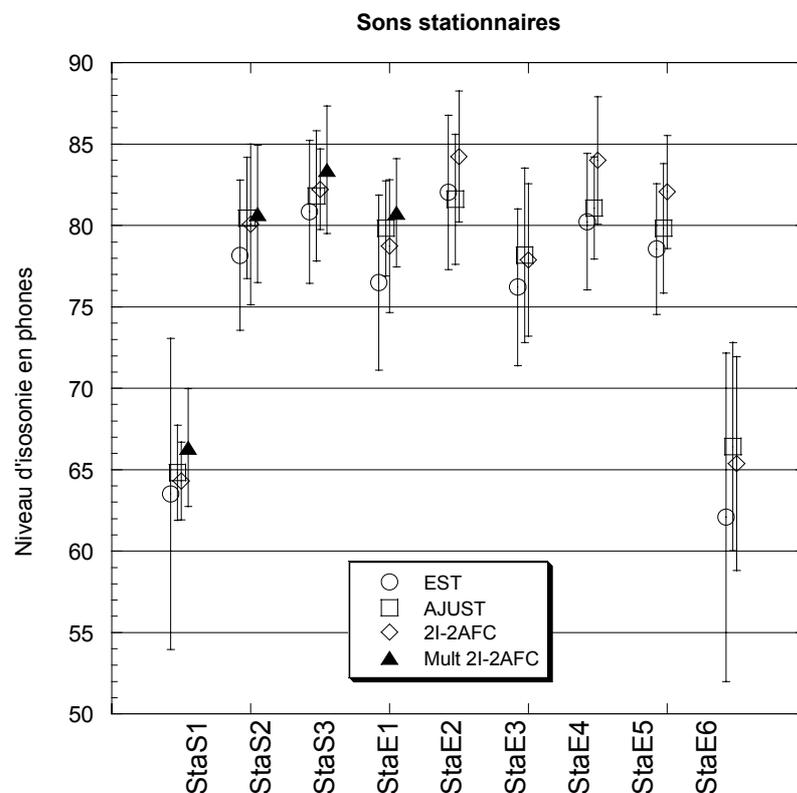


Figure V-1 : Niveaux d'isotonie des sons stationnaires obtenus par les différentes procédures. Les symboles sont légèrement décalés horizontalement pour une meilleure visibilité. Les barres verticales représentent les écarts types à la moyenne des mesures.

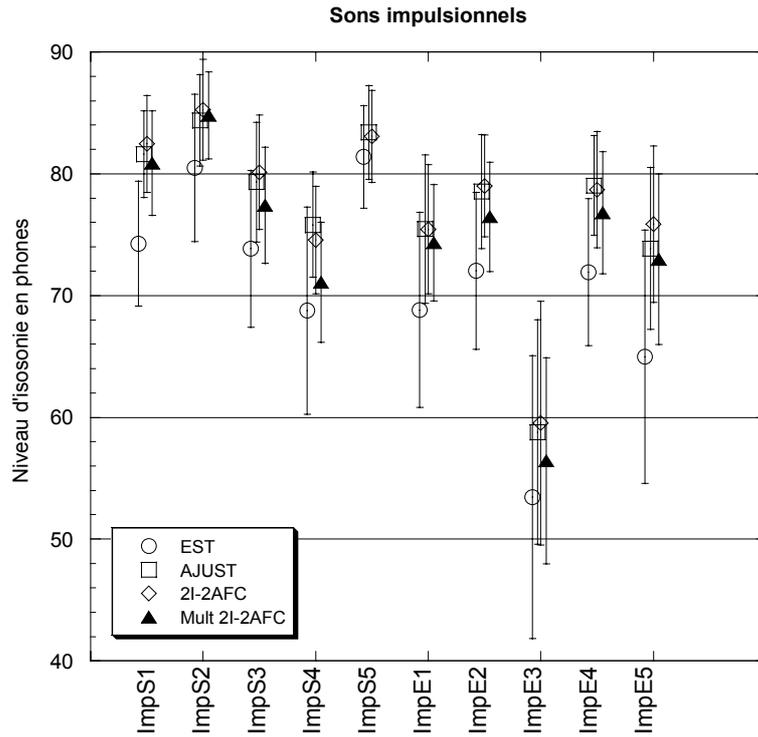


Figure V-2 : Niveaux d'isozonie des sons impulsionnels obtenus par les différentes procédures. Les symboles sont légèrement décalés horizontalement pour une meilleure visibilité. Les barres verticales représentent les écarts types à la moyenne des mesures.

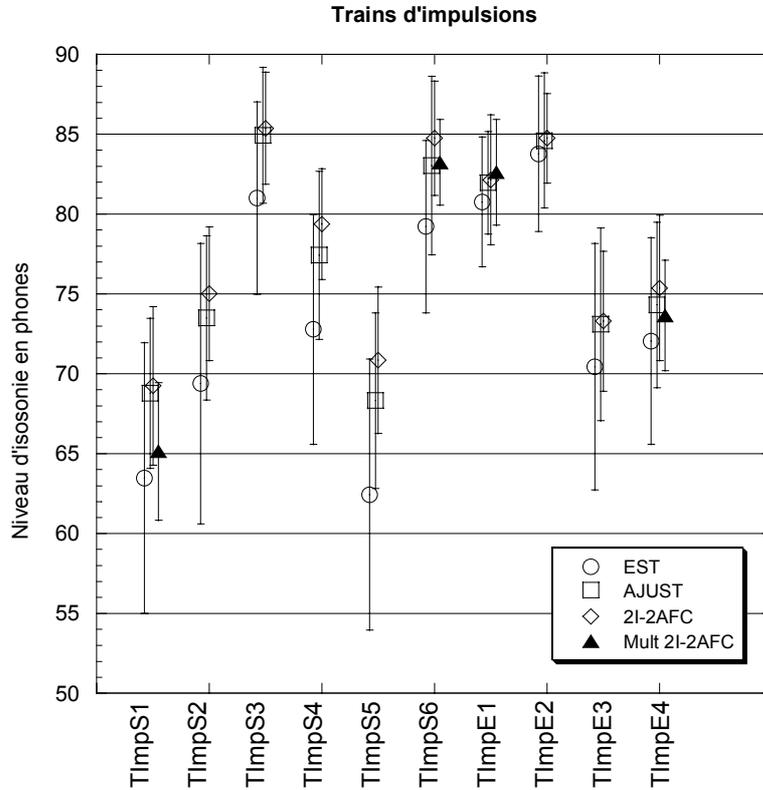


Figure V-3 : Niveaux d'isozonie des trains d'impulsions obtenus par les différentes procédures. Les symboles sont légèrement décalés horizontalement pour une meilleure visibilité. Les barres verticales représentent les écarts types à la moyenne des mesures.

Les valeurs du niveau d'isotonie obtenues par le méthode d'estimation de grandeur sont toujours plus faibles que celles obtenues par les trois autres méthodes. En effet, les niveaux d'isotonie mesurés par la méthode d'estimation directe sont en moyenne 4 phones en dessous des mesures faites avec les trois autres méthodes. Les différences des niveaux d'isotonie entre les trois autres méthodes (AJUST, 2I-2AFC et Mult 2I-2AFC) sont en moyenne égales à 1,5 phones.

On peut aussi observer que les différences entre les méthodes sont plus marquées pour les sons impulsionnels. En effet, la moyenne des différences entre les quatre méthodes est de 3,7 phones pour les sons impulsionnels, alors qu'elle est de 2,4 phones pour les trains d'impulsions et de 1,8 phones pour les sons stationnaires. Cependant, les différences des niveaux d'isotonie obtenus avec les quatre méthodes ne sont pas toujours significatives.

Globalement, il y a un effet significatif de la méthode sur le niveau d'isotonie ($F(3)=11,08$; $p<0,001$). Le tableau V-5 représente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour étudier l'influence de la méthode en fonction du type de son. Il ressort de cette analyse statistique que, pour chaque type de son, il y a une influence de la méthode sur le niveau d'isotonie.

Sons stationnaires	dl	F	p	R ²
Influence de la méthode	3*	3,71*	0,0192*	1,86*
Sons impulsionnels	DI	F	p	R ²
Influence de la méthode	3*	12,06*	0 *	8,93*
Trains d'impulsions	DI	F	p	R ²
Influence de la méthode	3*	5,51*	0,003*	3,41*

Tableau V-5 : Analyse de la variance du niveau d'isotonie (variable dépendante). La méthode de mesure du niveau d'isotonie et le son sont les variables indépendantes (facteurs fixés).

Nous avons aussi déterminé, pour chaque type de son, les méthodes donnant des niveaux d'isotonie statistiquement différents. Les résultats de l'analyse post-hoc (Test de Scheffé) montre que, pour les sons stationnaires, la seule différence significative est entre EST et Mult 2I-2AFC. Pour les sons impulsionnels, EST est significativement différente des trois autres méthodes. Enfin, pour les trains d'impulsions, on a trouvé uniquement une différence significative entre EST et les deux méthodes AJUST et 2I-2AFC.

Pour résumer, lorsqu'il y a un effet significatif de la méthode sur la mesure du niveau d'isotonie, il est principalement dû à la différence entre la méthode d'estimation directe et les trois autres méthodes. Il est important de rappeler ici que cette méthode permet de mesurer la sonie. Pour connaître le niveau d'isotonie, nous avons utilisé la relation II-1' ($\text{phones}=40+10\text{Log}_2(\text{sones})$). Cette relation part de l'hypothèse que la pente de la fonction de sonie à 1 000 Hz est de 0,6. Or la pente de la fonction de sonie du groupe d'auditeurs est de 0,49. L'écart entre le niveau d'isotonie obtenu avec la méthode d'estimation directe et les trois peut s'expliquer par cette approximation.

Mais globalement, les quatre méthodes de mesure du niveau d'isotonie sont cohérentes. Il est donc important, à ce stade de l'étude, de définir avec quelle précision les méthodes permettent de mesurer le niveau d'isotonie.

V-2.2 Précision des méthodes

Nous avons représenté sur les figures V-4, V-5 et V-6 les valeurs des écarts types obtenues par les quatre méthodes de mesure de la sonie pour les sons stationnaires, les sons impulsionnels et les trains d'impulsions respectivement. Chaque point indique la valeur de l'écart type à la moyenne

des niveaux d'isophonie des quatorze auditeurs, pour une méthode donnée en fonction du niveau d'isophonie du son.

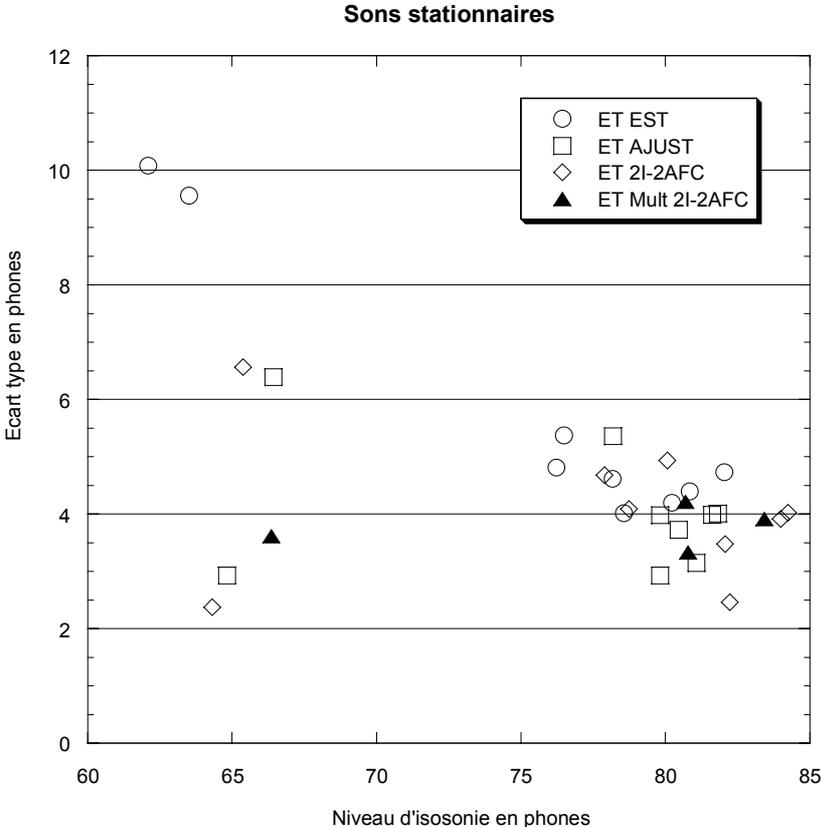


Figure V-4 : Ecart type en fonction des méthodes de mesure de la sonie pour neuf sons stationnaires.

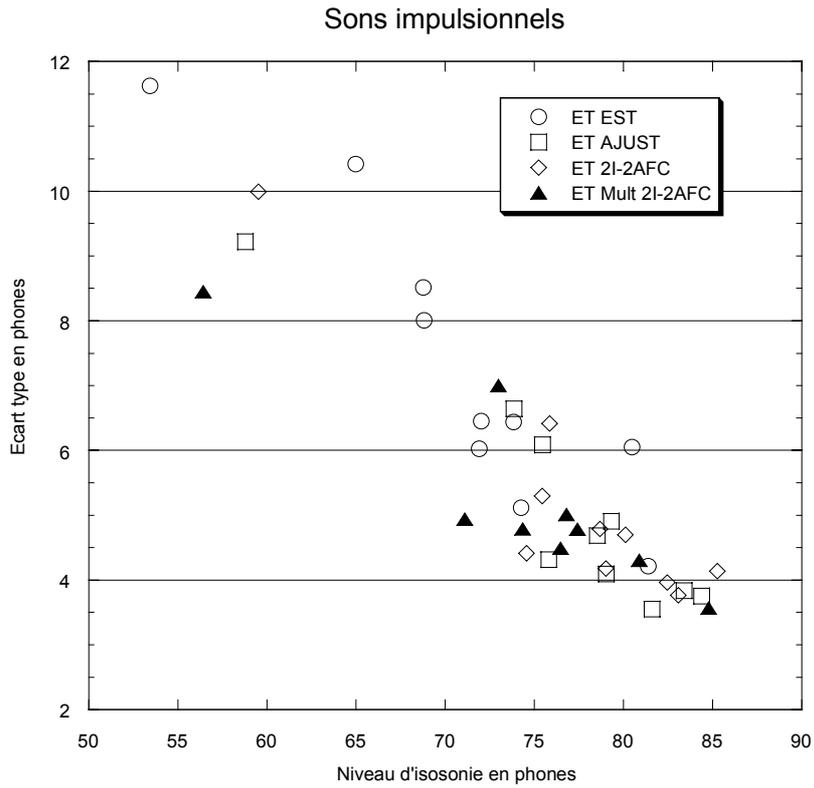


Figure V-5 : Ecart type en fonction des méthodes de mesure de la sonie pour dix sons impulsionnels.

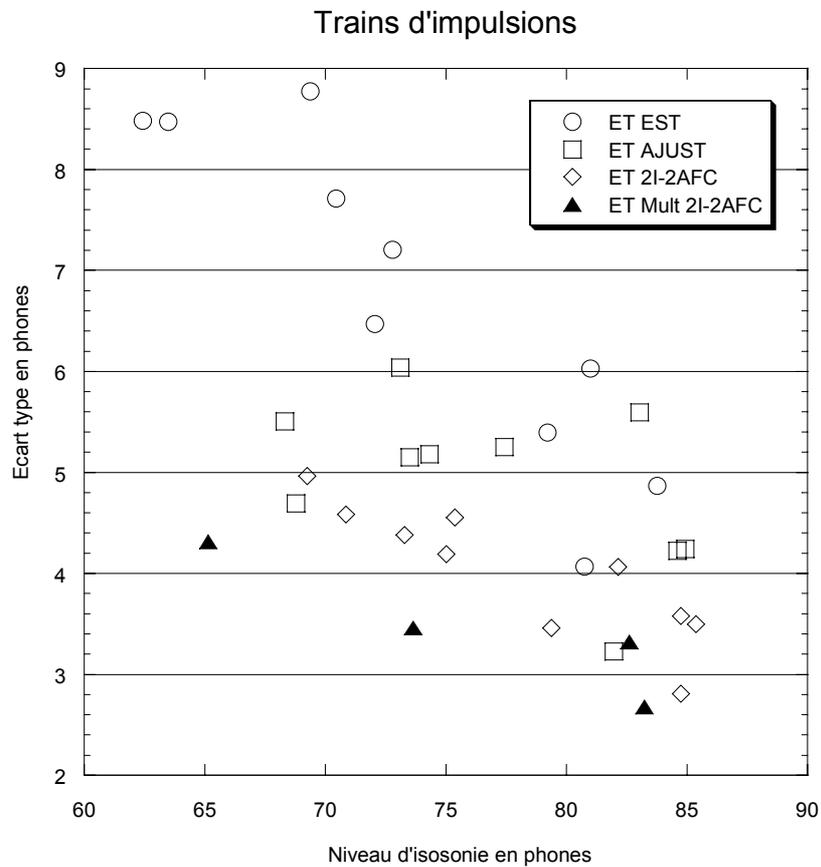


Figure V-6 : Ecart type en fonction des méthodes de mesure de la sonie pour 4 trains d'impulsions.

Globalement, on observe que les écarts types sont plus élevés pour les sons de niveaux faibles que pour ceux de niveaux forts. Il faut noter qu'à bas niveau les seuils différentiels de l'oreille sont plus élevés qu'à fort niveau. Ainsi, à fort niveau, on perçoit des différences de niveau plus faibles qu'à bas niveau, ce qui explique une dispersion plus faible des mesures du niveau d'isotonie. On peut aussi observer que la dispersion des données dépend des méthodes. D'après les figures V-4, V-5 et V-6, on remarque que la méthode EST présente les écarts types les plus élevés.

Le tableau V-6 représente les valeurs moyennes des écarts types pour chaque méthode et chaque type de son. Les valeurs de ce tableau permettent d'étudier la précision de chaque méthode en fonction du type de son et de façon générale.

Ecarts types en phones	Estimation	Ajustement	Multitracking	Adaptative
Sons stationnaires	5,75	4,05	3,8	4,1
Sons impulsions	7,6	5,3	5,7	5,3
Trains d'impulsions	6,75	4,9	3,44	4
Moyenne	6,7	4,7	4,3	4,5

Tableau V-6: Moyenne des écarts types en fonction de chaque méthode et de chaque type de son. La dernière ligne est la moyenne des écarts types sur tous les sons en fonction des quatre méthodes.

En ce qui concerne les sons stationnaires et les trains d'impulsions, la méthode Mult 2I-2AFC donne la variabilité la plus faible. Pour les sons impulsions, c'est la méthode AJUST qui permet de mesurer le niveau d'isotonie avec la plus faible dispersion.

De manière générale, la méthode d'estimation directe produit les écarts types les plus élevés. A moins de 0,5 phones près, les trois autres méthodes ont en moyenne les mêmes écarts types quel que soit le type de son. Un autre point intéressant est que les écarts types sont en moyenne inférieurs à 5 phones, sauf pour la méthode d'estimation. Plus précisément, pour les méthodes AJUST, 2I-2AFC et Mult 2I-2AFC les écarts types sont de l'ordre de 4,5 phones.

Si l'on considère, pour déterminer la méthode la mieux adaptée, non seulement la précision mais aussi la durée, la méthode d'ajustement, une des plus rapides (20 minutes pour dix sons) présente le meilleur compromis. De plus, elle permet de mesurer directement le niveau d'isotonie en phones, ce qui nous intéresse particulièrement ici.

Au vu de ces résultats on ne peut pas s'attendre à avoir une précision du modèle de sonie inférieure à 6 phones pour des niveaux d'isotonie faibles (< 65 phones). On peut, par contre, pour des niveaux d'isotonie supérieurs à 65 phones espérer une précision de l'ordre de 4 phones pour le modèle de sonie.

V-2.3 Fiabilité de la méthode d'ajustement

Dans le paragraphe précédent, nous avons déterminé la méthode d'ajustement comme celle présentant le meilleur compromis entre précision et durée. Nous avons donc voulu connaître la différence intra-individuelle obtenue avec cette méthode. Pour cela, nous avons réalisé un test avec six stimuli (2 sons impulsions, 2 sons stationnaires et 2 trains d'impulsions) issus des expériences précédentes. Le protocole et le dispositif expérimental étaient les mêmes que précédemment. Le test, réalisé par sept auditeurs, était répété quatre fois.

La différence intra-individuelle que nous obtenons est ici d'environ 2 phones.

V-3 CONCLUSION

Nous avons, dans ce chapitre, comparé quatre méthodes de mesure du niveau d'isophonie pour des sons stationnaires, des sons impulsionnels et des trains d'impulsions. L'objectif de cette étude était de déterminer la méthode la mieux adaptée, c'est-à-dire présentant le meilleur compromis entre précision et durée.

L'ensemble des résultats a permis de conclure que la méthode d'ajustement présente ce meilleur compromis avec une précision de 4,7 phones et une fiabilité de l'ordre de 2 phones. Notons aussi qu'elle dure quatre fois moins longtemps (20 minutes pour dix sons) que les autres méthodes ayant des écarts types équivalents. Cette méthode va nous permettre d'obtenir une référence fiable autour de laquelle construire un modèle de sonie pour des sons impulsionnels.

Nous avons aussi montré que la méthode d'estimation directe permet d'obtenir rapidement la sonie et le niveau d'isophonie, mais avec une variabilité un peu plus importante (écart type d'environ 6,7 phones).

Au vu des valeurs moyennes des écarts types, et en vue de la construction d'un modèle de sonie pour des sons non stationnaires, on ne peut pas s'attendre à une mesure du niveau d'isophonie avec une précision inférieure à 4 phones. En particulier, pour des niveaux d'isophonie inférieurs à 65 phones, on ne pourra espérer une précision inférieure à 6 phones.

VI

LIGNES ISOSONIQUES ET FONCTIONS DE SONIE DE SONS IMPULSIONNELS

A ce stade de l'étude, nous avons développé un estimateur de sonie d'impulsion (ESI, voir chapitre IV) basé sur un algorithme mathématique simple. Nous avons aussi déterminé la méthode de mesure de sonie la mieux adaptée (chapitre V) aux sons impulsionnels.

Comme nous l'avons déjà décrit dans le chapitre II, la majorité des sons étudiés dans la littérature possèdent une enveloppe en forme de créneau. L'objectif des chapitres VI et VII est donc d'obtenir des données expérimentales concernant des sons impulsionnels de forme « naturelle » (voir figure IV-1). Nous souhaitons, dans un premier temps, comprendre comment nous percevons ce type de sons et, dans un deuxième temps, comparer nos données à celles de la littérature concernant les sons brefs et les sons stationnaires afin de déterminer les améliorations envisageables des modèles de sonie et de l'estimateur de sonie d'impulsion. Enfin, les données permettront de comparer les modèles et l'estimateur de sonie.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre tout d'abord aux lignes isosoniques afin d'étudier l'influence de la fréquence sur la sonie. Il est important d'étudier les lignes isosoniques de ce type de sons car les modèles ont été ajustés pour coller aux valeurs de celles-ci. Cependant, les lignes isosoniques de sons impulsionnels ne sont pas forcément équivalentes à celles de sons purs stationnaires. Nous étudierons ensuite les fonctions de sonie de sons impulsionnels pour étudier l'influence du niveau sur la sonie. Ce point est important car les modèles de sonie sont basés sur la fonction puissance reliant la sonie à la pression (relation II-1) non seulement pour calculer l'excitation, mais aussi pour calculer le niveau d'isonie à partir de la sonie (relation II-1').

VI-1 Lignes isosoniques de sons impulsionnels

De nombreuses expériences ont permis d'élaborer, pour les sons stationnaires, les lignes isosoniques. Les premières études ont été celles réalisées par Fletcher et Munson en 1933 (études sous écouteurs) et Robinson et Dadson en 1956 (études en champ libre en incidence frontale). Celles-ci ont d'ailleurs fait l'objet d'une première édition de norme (ISO R226) en 1961 qui fut réactualisée en 1987 et plus récemment en 2003 (ISO 226). Par contre, en ce qui concerne les sons dont la durée est inférieure à la durée critique, peu d'études ont été publiées (Chocholle et Saulnier, 1976 ; Kato et coll., 1993 ; Masaoka et coll., 2001). Il faut noter que le sujet est plus complexe car une autre dimension entre en jeu dans l'établissement de la sonie d'un son impulsionnel : non seulement la sonie varie avec la fréquence, mais elle varie aussi avec la durée.

Comme indiqué ci-dessus, les lignes isotoniques obtenues pour des sons impulsionnels ont été peu étudiées (voir paragraphe II-2.2-e). Chocholle et Saulnier (1976) ne précisent ni l'enveloppe temporelle, ni les temps d'attaque et de décroissance de leur sons. Ils les décrivent uniquement par leur durée brève de 20 ms. Les durées des sons étudiées étaient aussi de 20 ms pour Masaoka et coll. (2001) et l'enveloppe temporelle était une fenêtre de Hanning de 20 ms. Ces sons ne présentaient donc pas de partie entretenue et les temps d'attaque et de décroissance étaient de 10 ms. Kato et coll. (1993) ont étendu leur étude à six durées comprises entre 16 ms et 500 ms. Les sons étaient des sons brefs avec un temps d'attaque de 5 ms. La forme de l'enveloppe n'est pas clairement définie. Ces auteurs n'ont pas étudié les lignes isotoniques de sons impulsionnels de forme « naturelle », c'est ce que nous nous attachons à faire ici.

VI-1.1 Stimuli

Les sons utilisés pour cette expérience ont été synthétisés. Leur enveloppe avait la forme décrite à la figure IV-2. Elle était caractérisée par :

- une attaque linéaire en amplitude sur 2 ms,
- pas de palier,
- une décroissance exponentielle coupée à -60 dB du niveau crête (durée mise pour passer de 90 à 10 % de l'amplitude maximum égale à 20 ms).

Le choix de ces durées est basé sur l'ordre de grandeur des durées des sons en créneau étudiés par les auteurs précédemment cités. Leur durée totale, égale à la durée de l'attaque plus la durée de la décroissance, est de 57 ms.

La structure fine de remplissage des enveloppes était composée de sons purs : 150 Hz, 450 Hz, 700 Hz, 1000 Hz, 2150 Hz, 2900 Hz, 4000 Hz, 5800 Hz, 8500 Hz et 10500 Hz. Ces fréquences correspondent à des fréquences centrales de bandes critiques. Le choix de ces fréquences a été fait pour tenir compte des variations caractéristiques des lignes isotoniques : par exemple, autour de 3 kHz la sensibilité de l'oreille est plus importante (fréquence de résonance de l'oreille externe), puis elle diminue jusqu'à 8 kHz, augmente à nouveau jusqu'à 10 kHz et diminue au-delà de 10 kHz (voir figure II-4). Le tableau VI-1 récapitule les caractéristiques des signaux que nous étudions.

Nom	Temps de montée (ms)	Temps de descente (ms)	Durée totale des impulsions synthétisées (ms)	Fréquence (Hz)
sin150	2	20	57	150
sin450	2	20	57	450
sin700	2	20	57	700
sin1k	2	20	57	1000
sin2k15	2	20	57	2150
sin2k9	2	20	57	2900
sin4k	2	20	57	4000
sin5k8	2	20	57	5800
sin8k5	2	20	57	8500
sin10k5	2	20	57	10500

Tableau VI-1 : Tableau récapitulatif des sons sélectionnés pour la mise en œuvre des tests

Nous nous sommes intéressés à trois lignes isosoniques (50, 60 et 75 phones) pour des sons impulsionnels de 57 ms dont l'enveloppe temporelle est celle que nous avons déterminée au chapitre IV (figure IV-2) pour des sons impulsionnels « naturels ».

VI-1.2 Dispositif expérimental

Le signal numérique est converti en signal analogique grâce à une carte son Oros. Le signal est ensuite atténué par un atténuateur programmable Wilsonics (model PAT1) avant d'être restitué par une enceinte amplifiée Génélec (type 1031A) située dans la salle anéchoïque du laboratoire.

La mesure des niveaux est faite par un microphone Bruel & Kjaer (type 2669) situé à la place de la tête de l'auditeur en l'absence de celui-ci.

VI-1.3 Auditeurs

L'ensemble des tests a été réalisé par quinze auditeurs âgés de 21 à 40 ans. Les auditeurs ne présentaient aucune déficience auditive.

VI-1.4 Procédure

Le principe de la procédure était ici d'ajuster le niveau du son impulsionnel pour qu'il ait la même sonie qu'un son stationnaire de comparaison dont le niveau était fixé à 50, 60 ou 75 dB SPL. Le niveau d'isotonie du son impulsionnel a été mesuré par une méthode d'ajustement dans les deux sens de présentation (son impulsionnel suivi du son de comparaison et son de comparaison suivi du son impulsionnel). Le son de comparaison était une bande de bruit centrée sur 1 kHz, de largeur 160 Hz. Son niveau en dB SPL correspond au niveau d'isotonie en phones. Pour chaque son, six tests ont été réalisés (trois niveaux d'isotonie \times deux ordres de présentation du son test et du son de comparaison). Les niveaux reportés pour les sons impulsionnels sont les niveaux crêtes.

Le niveau crête du son impulsionnel, au départ de la session, était présenté à l'auditeur environ 20 dB au-dessus ou au-dessous du niveau d'isotonie du son de comparaison (des tests ayant été faits au préalable pour avoir une première estimation des niveaux d'égalité subjective). Le son de comparaison, de 500 ms, et le son impulsionnel étaient séparés de 300 ms. Chaque paire était séparé de 400 ms. La paire de sons était présentée à l'auditeur sans arrêt, il pouvait alors faire varier l'intensité du son impulsionnel par pas de plus ou moins 5, 2 ou 1 dB, et validait son jugement quand il estimait égales les sonies des deux sons. L'ordre de présentation des paires à égaliser (dix au total) était aléatoire et différent pour chaque auditeur. Pour un niveau donné du son de comparaison et pour chaque son impulsionnel, on fait la moyenne des deux niveaux crêtes ajustés (correspondant aux deux ordres de présentation) par chaque auditeur. On calcule ensuite la moyenne de ces valeurs sur les quinze auditeurs. On obtient ainsi le niveau crête que doit avoir un son impulsionnel pour avoir la même sonie que le son de comparaison soit un niveau d'isotonie de 50, 60 et 75 phones.

VI-1.5 Résultats et discussion

Nous avons tracé sur la figure VI-1 les trois courbes isosoniques à 75, 60 et 50 phones ainsi que les écarts types. Globalement, nous pouvons remarquer un certain parallélisme entre les trois courbes avec un "pic" relatif à 1 kHz et un minimum vers 3 kHz. Les courbes présentent aussi un point d'inflexion vers 6 kHz.

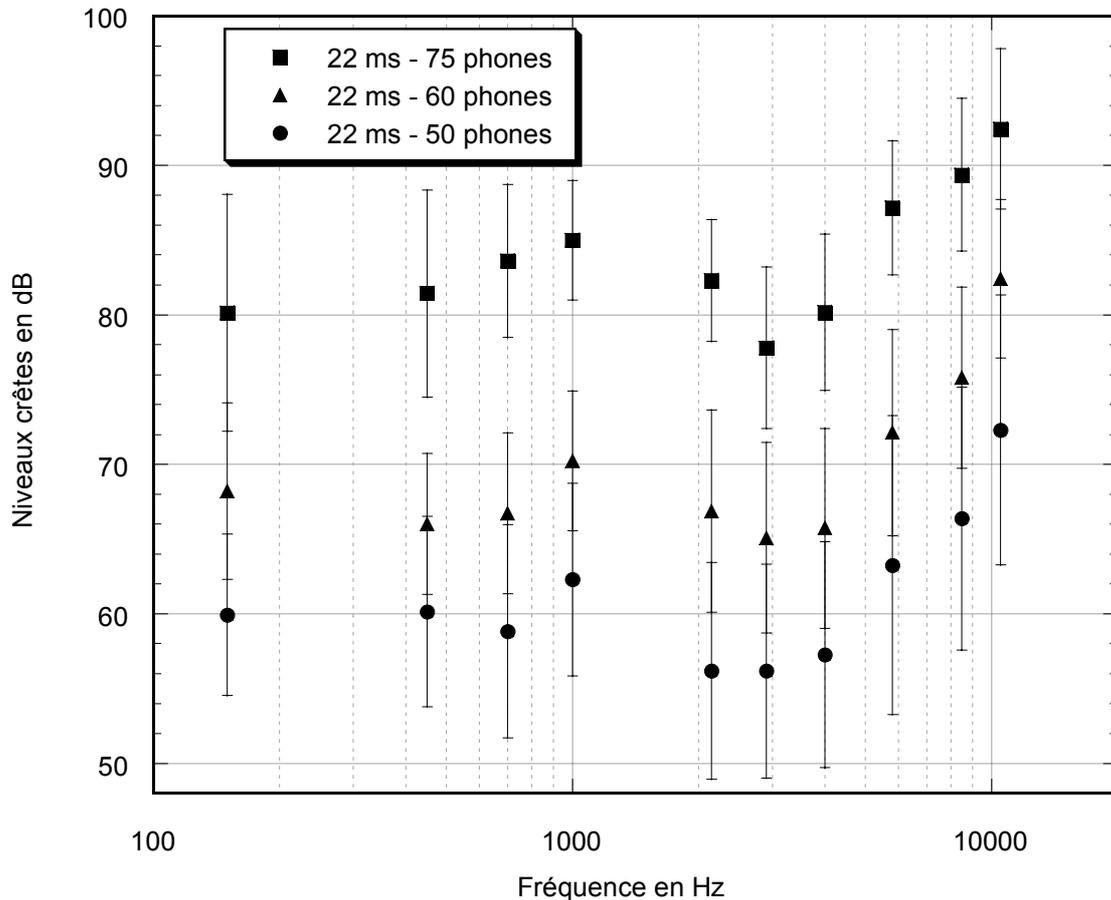


Figure VI-1 : Lignes isosoniques pour des sons impulsifs à 75 phones (carrés), 60 phones (triangles) et 50 phones (ronds).

Pour faciliter la comparaison des lignes isosoniques de sons impulsifs à celles de sons stationnaires (norme ISO 226, 2003), nous les avons représentées sur la figure VI-2. Les lignes isosoniques ont globalement la même forme. On observe un seuil plus élevé pour les sons impulsifs, d'environ 10 dB SPL, ainsi qu'un aplatissement dans les basses fréquences.

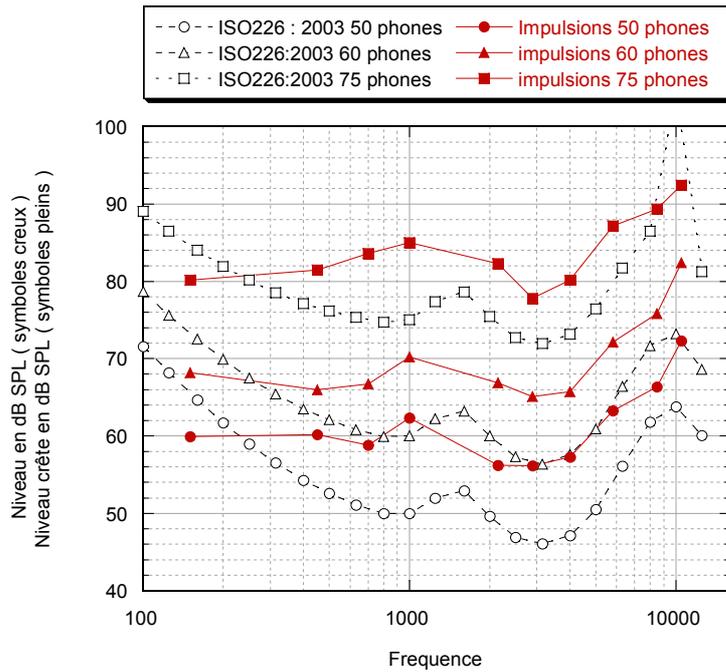


Figure VI-2 : Lignes isononiques pour des sons impulsionnels (symboles pleins) et des sons stationnaires (symboles creux) d'après la norme ISO 226 de 2003.

Les figures VI-3, VI-4 et VI-5 représentent respectivement les lignes isononiques à 50, 60 et 75 phones de sons impulsionnels et les lignes isononiques de sons stationnaires selon la norme ISO 226 de 1987 et de 2003. Les courbes ont été superposées pour pouvoir facilement comparer leurs formes, ainsi les ordonnées sont différentes pour les sons impulsionnels (ordonnée de gauche) et les sons stationnaires (ordonnée de droite).

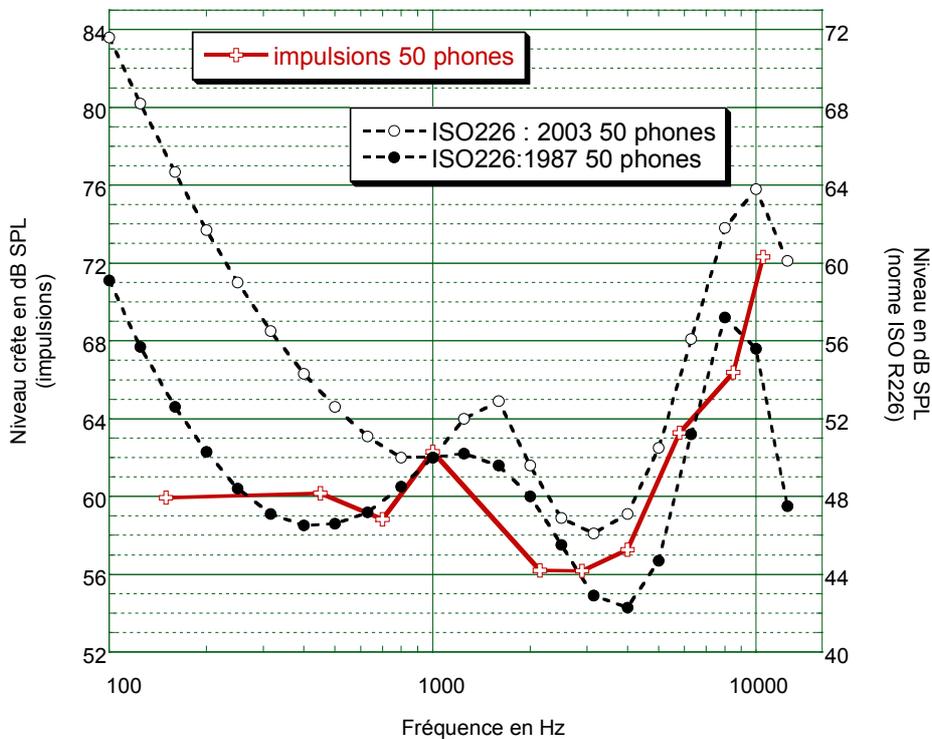


Figure VI-3 : Lignes isononiques de sons stationnaires à 50 phones (cercles, ordonnée lue à droite) d'après la norme ISO 226 de 1987 (symboles pleins) et de 2003 (symboles creux) et ligne isononique à 50 phones de sons impulsionnels (croix et trait plein, ordonnée lue à gauche).

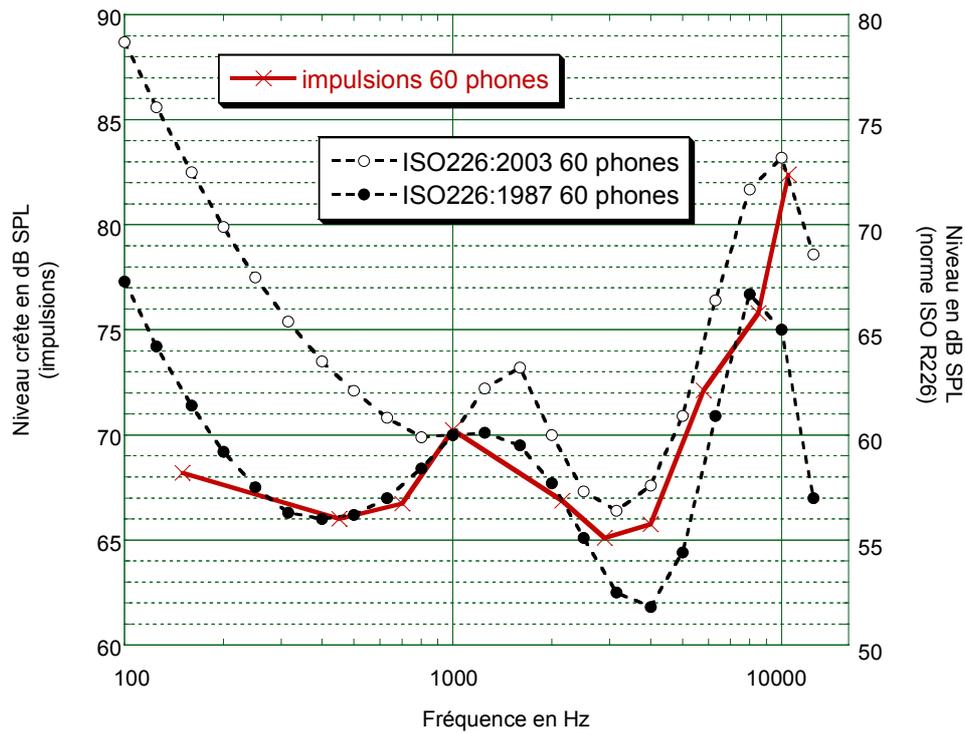


Figure VI-4 : Lignes isononiques de sons stationnaires à 60 phones (cercles, ordonnée lue à droite) d'après la norme ISO 226 de 1987 (symboles pleins) et de 2003 (symboles creux) et ligne isononique à 60 phones de sons impulsionnels (croix et trait plein, ordonnée lue à gauche).

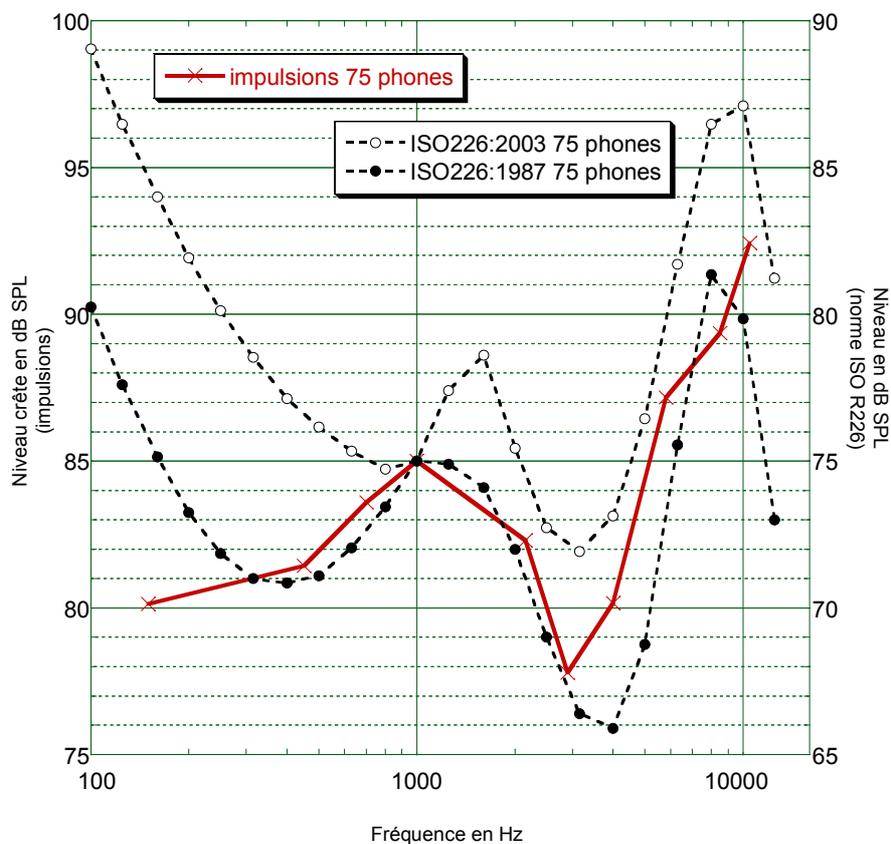


Figure VI-5 : Lignes isononiques de sons stationnaires à 75 phones (cercles, ordonnée lue à droite) d'après la norme ISO 226 de 1987 (symboles pleins) et de 2003 (symboles creux) et ligne isononique à 75 phones de sons impulsionnels (croix et trait plein, ordonnée lue à gauche).

A basse fréquence (entre 300 Hz et 1 kHz), on observe pour la ligne isotonique des sons impulsionnels un aplatissement des courbes plus marqué que celui de la norme ISO 266 de 1987. Masaoka et coll. (2001) ont comparé les lignes isotoniques de sons impulsionnels obtenues pour des sons en créneaux de 20 ms aux lignes isotoniques de sons stationnaires. Les courbes de Masaoka et coll. (2001) ont la même forme aux basses fréquences que les nôtres. Ce phénomène est dû à l'élargissement spectral causé par l'enveloppe temporelle de ce type de son, ce qui le rend plus audible. Ce phénomène est plus marqué à basse fréquence, car l'étalement spectral se répartit sur plusieurs bandes critiques, ce qui n'est pas le cas pour des fréquences plus élevées.

Les lignes isotoniques de sons impulsionnels ont globalement la même forme que les lignes isotoniques de sons stationnaires de la norme de 2003, sauf en basse fréquence. Pour les fréquences comprises entre 1 et 2,1 kHz, il est difficile de conclure car il manque des points expérimentaux.

On peut remarquer ici une différence non négligeable entre les lignes isotoniques de 1987 et de 2003. En particulier, on peut se demander pourquoi le pic relatif à 1 kHz de la norme de 1987 se retrouve légèrement décalé vers des fréquences plus aiguës dans la norme de 2003. Poulsen et Han (2000) et Suzuki et Takeshima (2004) expliquent cette différence par un « creux » dans la fonction de transfert de l'oreille (HRTF) dans cet intervalle de fréquences. Ce dernier n'aurait pas été détecté, selon les mêmes auteurs, dans les études précédentes à cause d'un manque de mesure dans cet intervalle de fréquence. Suzuki et Takeshima (2004) expliquent aussi que les principales différences sont dues aux différentes méthodes de mesure utilisées. En effet, lors de l'établissement des lignes isotoniques, ils mettent en avant l'importance de faire varier uniquement le son test (son impulsionnel) pour qu'il ait la même sonie que le son de comparaison.

Au-dessus de 3 kHz et jusqu'à 10,5 kHz, les lignes isotoniques de sons impulsionnels augmentent. Ces résultats ont été aussi observés par Masaoka et coll. (2001) et Chocholle et Saulnier (1976).

VI-1.6 Conclusion sur l'étude des lignes isotoniques de sons impulsionnels

Dans cette expérience, nous avons décrit les lignes isotoniques de sons impulsionnels mesurées en champ libre. Selon nos résultats, les lignes isotoniques présentent un certain parallélisme. Pour les fréquences supérieures à 1 kHz, on a constaté une similarité avec les lignes isotoniques de sons stationnaires de durée plus longue. Un des points importants que nous avons mis en évidence dans cette étude est l'aplatissement des lignes isotoniques de sons impulsionnels en dessous de 1 kHz. Cela montre pour ce type de son, que l'oreille est plus sensible pour des porteurs inférieures à 1 kHz à cause de l'élargissement spectral. Ce phénomène peut alors influencer l'allure, ou plus précisément la pente, des fonctions de sonie de sons impulsionnels de porteur inférieure à 1 kHz. Pour des porteurs de fréquence plus élevée, on peut s'attendre à retrouver des fonctions de sonie de sons impulsionnels équivalentes à celles de sons stationnaires.

VI-2 Fonctions de sonie de sons impulsionnels : influence de la durée et de la fréquence

L'objectif de cette partie est d'étudier, en fonction de la fréquence et de la durée, les pentes des fonctions de sonie et de les comparer aux résultats de la littérature pour les sons brefs et pour les sons stationnaires. Cette étude permettra aussi d'avoir des données expérimentales, pour des sons

impulsionnels de forme « naturelle », afin de pouvoir tester les modèles de sonie et l'estimateur ESI.

VI-2.1 Stimuli

Les sons impulsionnels étudiés ont tous été synthétisés. Leur enveloppe temporelle avait la même forme que celle décrite au paragraphe VI-1.1, c'est-à-dire une attaque modélisée par une fonction linéaire croissante sur 2 ms, pas de palier, et un temps de descente plus long (20 ms, 200 ms et 600 ms) modélisé par une fonction exponentielle décroissante. Le signal était coupé à -60 dB. La structure fine de remplissage des enveloppes était composée de sons purs de 450 Hz, 1 kHz et 2,9 kHz. Chaque son, pour une fréquence et une durée données, était joué à cinq niveaux crêtes dont les écarts étaient de 5 ou 10 dB.

Le tableau VI-2 récapitule les données concernant les signaux que nous avons étudiés. Au total, vingt-cinq sons ont été étudiés pour permettre d'établir cinq fonctions de sonie (fonction de sonie à 1 kHz (Td=20, 200 et 600 ms) et à 450 et 2900 Hz (Td=20 ms)).

Nom	Temps de descente (ms)	Durée totale (ms)	Fréquence (Hz)	Niveaux crête (dB SPL)
sin1k_20	20	57	1000	48, 58, 68, 78 et 83
sin1k_200	200	470	1000	35,5 ; 45,5 ; 55,5 ; 65,5 et 75,5
sin1k_600	600	1412	1000	36, 46, 56, 66 et 76
sin450_20	20	57	450	48, 58, 68, 78 et 83
Sin2k9_20	20	57	2900	48, 58, 68, 78 et 83

Tableau VI-2 : Tableau récapitulatif des sons étudiés pour les fonctions de sonie

VI-2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était le même que celui décrit au paragraphe VI-1.2.

VI-2.3 Auditeurs

Les tests ont été réalisés par sept auditeurs (trois femmes et quatre hommes) âgés de 21 à 58 ans. Tous les sujets, soumis à un audiogramme de Békésy sous casque en salle anéchoïque, ne présentaient aucune déficience auditive.

VI-2.4 Procédure

La mesure de la sonie a été faite par une méthode d'estimation directe sans référence. Dans ce test, les sons étaient répétés trois fois chacun et étaient présentés dans un ordre aléatoire, différent pour chaque auditeur. L'auditeur estimait la sonie de chaque son en donnant un nombre de son choix proportionnel à la sonie. Dans chaque série de sons, un son de référence de sonie connue (son pur de 1kHz à 80 dB SPL soit 16 sones) était présent pour pouvoir calculer la sonie de chaque son. Pour chaque auditeur et pour chaque son, on calcule la moyenne géométrique des trois estimations.

La sonie d'un son est la moyenne géométrique des estimations de tous les auditeurs.

VI-2.5 Résultats et discussion

VI-2.5.1 Influence de la durée

Nous avons tracé sur la figure VI-6 les fonctions de sonie moyennes de sons impulsionnels dont les temps de descente étaient de 600, 200 et 20 ms, de structure fine 1 kHz.

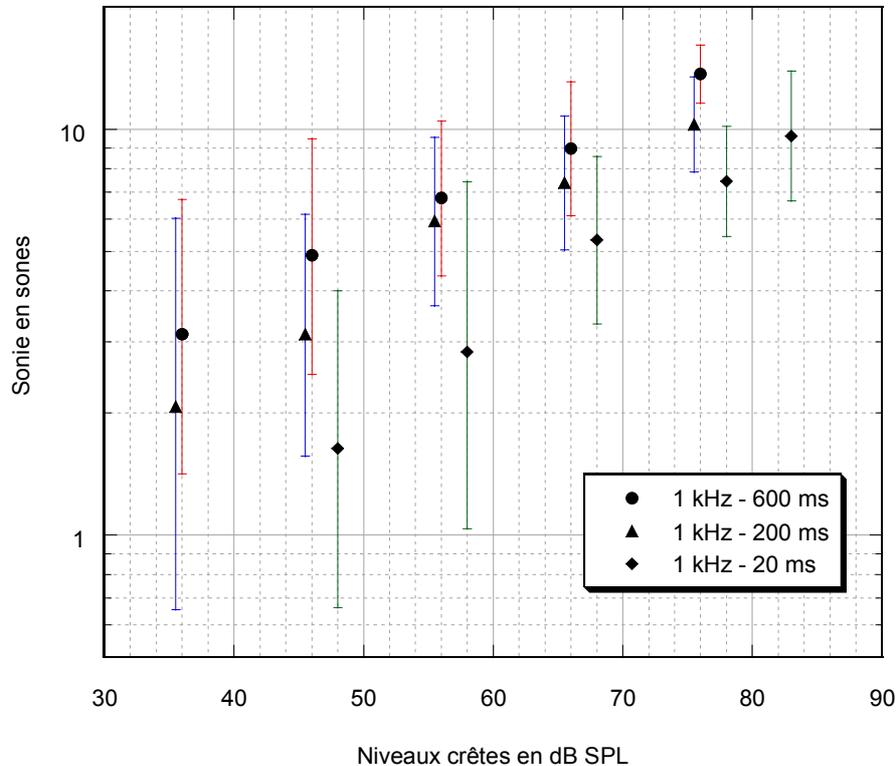


Figure VI-6 : Sonie en fonction du niveau de pression acoustique crête pour des sons impulsionnels de 1 kHz de durées 22 ms (cercles pleins), 202 ms (cercles vides) et 602 ms (triangles pleins). Les barres verticales représentent les écarts types à la moyenne des mesures.

Pour tous les niveaux crêtes, la sonie est d'autant plus faible que la durée du son est plus courte. Ce résultat est en accord avec les données de la littérature concernant l'intégration temporelle (voir chapitre II et VII).

Florentine et coll. (2001) trouvent aussi ce décalage en fonction de la durée, pour des créneaux de 1 kHz de durée 5 ms et 200 ms, et obtiennent un certain parallélisme entre les fonctions de sonie. Une analyse de la variance (ANOVA) sur nos données (distribution de la population des sujets considérée comme normale) ne montre pas d'interaction entre la durée et le niveau, c'est-à-dire que l'hypothèse que les fonctions de sonie ne sont pas parallèles est rejetée. En effet, l'influence de la durée sur l'augmentation de la sonie avec le niveau n'est pas significative ($F(8)=18,02$; $p=0,09$).

Les fonctions de sonie peuvent être ajustées par une fonction puissance de la pression dont l'exposant est de 0,44 pour les sons impulsionnels de 20 ms, 0,35 pour les sons impulsionnels de 200 ms et 0,31 pour les sons impulsionnels de 600 ms. La valeurs des exposants varie peu d'une durée à l'autre (de 0,31 à 0,44) et sont inférieures à 0,6, valeur communément admise de la pente de la fonction de sonie d'un son pur stationnaire de 1 kHz. Florentine et coll. (2001) expliquent la faible valeur des pentes dans ses données par un aspect méthodologique (méthode inter-modale,

ajustement de longueur de ficelle). En ce qui nous concerne, la méthodologie n'est pas remise en cause. En effet, en utilisant la méthode d'estimation directe, Canévet et coll. (1986) ont trouvé une moyenne de 0,55 pour la pente de la fonction de sonie d'un son pur à 1000 Hz de 1 seconde. Nous avons calculé la pente de la fonction de sonie d'un son pur à 1000 Hz de 1 seconde pour quatre auditeurs parmi les sept. La pente est alors de 0,57. Ce n'est donc pas le groupe d'auditeurs la cause de la faible valeur de la pente. On peut alors raisonnablement penser que le type de son étudié est un facteur déterminant dans l'affaiblissement de la pente de la fonction de sonie.

Buus et coll. (1997) ont introduit l'hypothèse que la pente de la fonction de sonie pour des niveaux moyens était plus faible que pour des niveaux faibles et élevés. Nous avons représenté sur la figure VI-7 le logarithme de la moyenne géométrique des estimations, multipliée par 20, en fonction du niveau crête. On peut ajuster les points expérimentaux par deux droites, une pour les faibles niveaux crêtes et une pour les niveaux crêtes moyens sauf pour le son impulsionnel, de temps de descente 600 ms, pour lequel les deux pentes sont les mêmes.

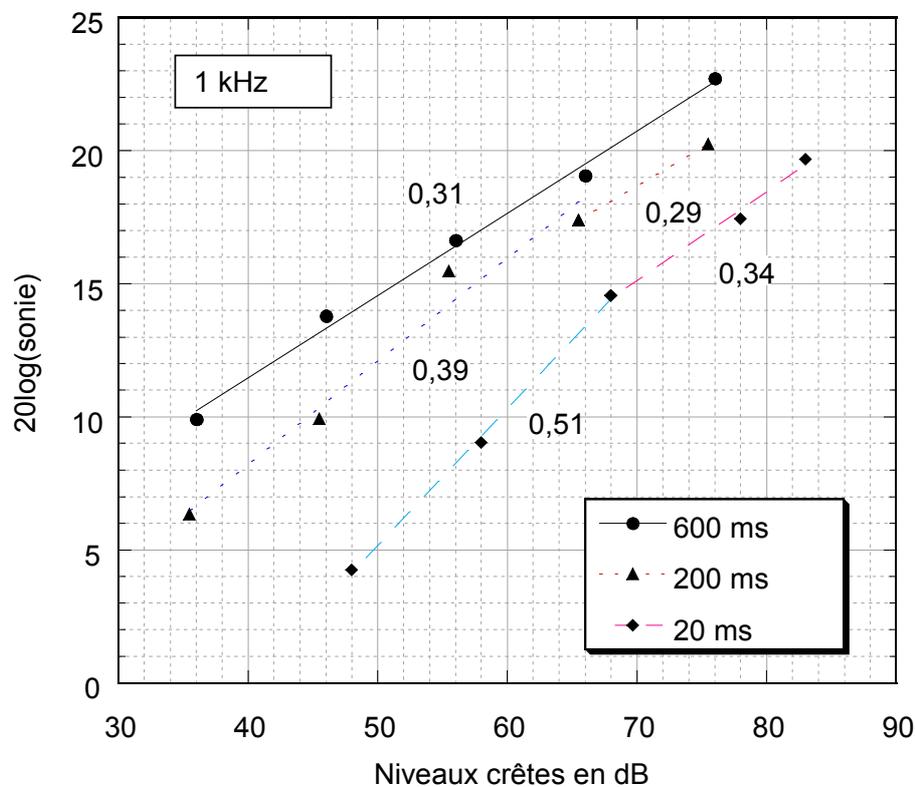


Figure VI-7 : Logarithme de la sonie en fonctions du niveau crête de sons impulsionnels de 1 kHz dont les temps de descente sont 20 ms (losanges), 200 ms (triangles) et 600 ms (cercles).

On observe sur la figure VI-7 qu'au-dessus de 66 ou 68 dB SPL (niveau crête), les fonctions de sonie sont quasi parallèles. En-dessous de ce niveau, plus la durée diminue plus la pente de la fonction de sonie augmente. De plus, on sait que le seuil d'audition augmente quand la durée du son diminue. Ainsi, la pente pour des niveaux faibles, est d'autant plus raide que le seuil d'audition, pour le son correspondant, est plus élevé. Ce résultat est cohérent avec les données de Scharf (1978) concernant les fonctions de sonie de sons purs stationnaires de fréquences différentes de 1 kHz (voir paragraphe VI-2.5.2).

VI-2.5.2 Influence de la fréquence

Nous avons tracé, sur la figure VI-8, les fonctions de sonie de sons de 20 ms dont les structures fines étaient 450 Hz, 1 kHz et 2,9 kHz.

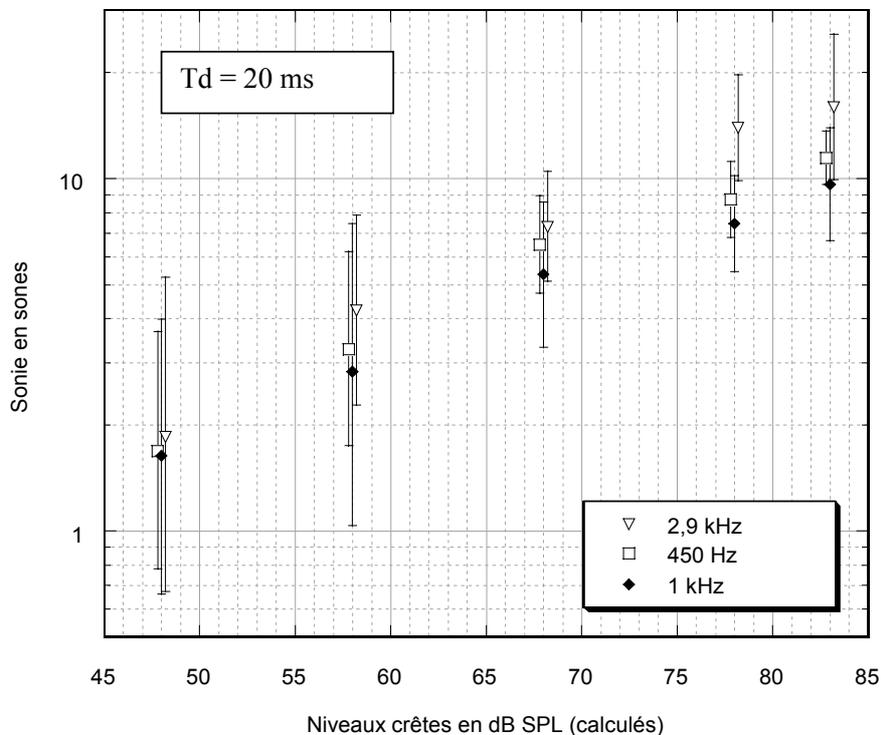


Figure VI-8 : Fonctions de sonie de sons impulsifs dont le temps de descente est de 20 ms et les structures fines sont 2,9 kHz (triangles retournés), 450 Hz (carrés), 1 kHz (losanges). Les barres verticales représentent les écarts types. Les symboles ont légèrement été décalés pour une meilleure lisibilité des écarts types.

La pente de la fonction du son impulsif dont la structure fine est de 2,9 kHz (pente = 0,54) est légèrement plus raide que celle de 450 Hz (pente = 0,47) qui est elle-même légèrement plus grande que celle de 1 kHz (pente = 0,44). Cependant, l'analyse statistique sur nos données ne permet pas de montrer que les fonctions ne sont pas parallèles ($F(8)=2.05$; $p=0,06$). Ceci est probablement dû à la méthode de mesure de la sonie qui donne une variance élevée.

Pour des sons stationnaires, la pente de la fonction de sonie, pour des niveaux faibles, est d'autant plus raide que le seuil d'audition, pour la fréquence considérée est plus élevée. Par exemple, le seuil d'audition d'un son pur stationnaire à 450 Hz est plus élevé que celui d'un son pur à 1 kHz. La pente de la fonction de sonie d'un son pur à 450 Hz est donc plus raide au début que celle à 1 kHz et rejoint celle-ci pour des niveaux supérieurs à 50 dB SPL (Scharf, 1978).

Ces résultats pour les sons stationnaires nous ont amenés à chercher deux pentes pour ajuster les points expérimentaux des trois fonctions de sonie des sons impulsifs de temps de descente de 20 ms. De même que pour les résultats présentés sur la figure VI-7, nous avons, sur la figure VI-9, représenté le logarithme de la moyenne géométrique des estimations, multipliée par 20, en fonction du niveau crête. Les points expérimentaux ont été ajustés par deux droites, une pour les faibles niveaux crêtes et une pour les niveaux crêtes moyens.

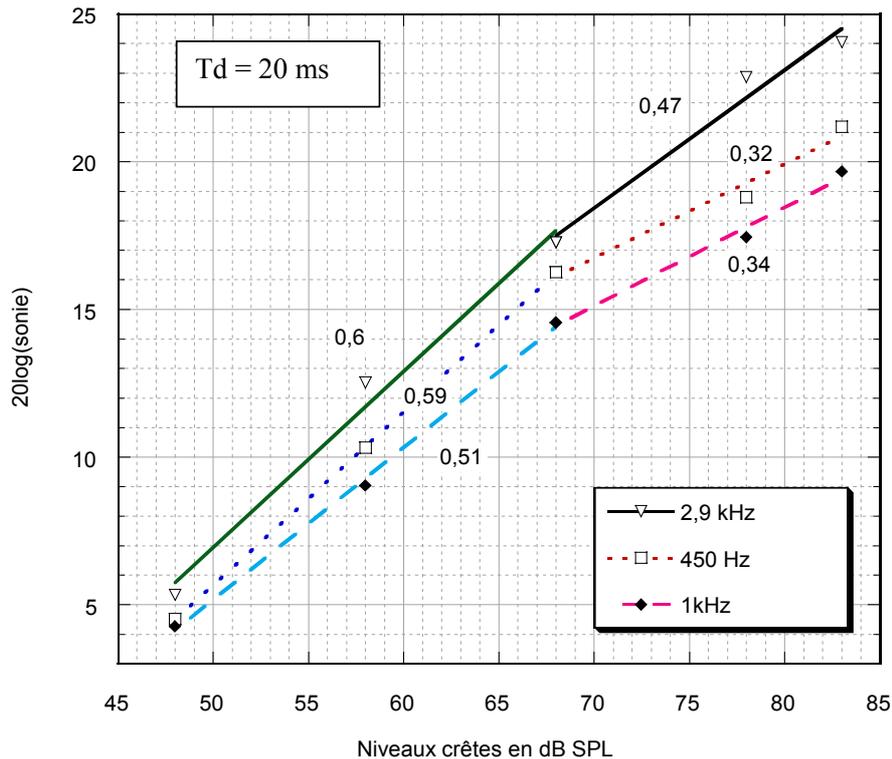


Figure VI-9 : Logarithme de la sonie en fonction du niveau crête de sons impulsionnels de 57 ms (temps de descente = 20 ms) dont les porteuses sont 2,9 kHz (triangles), 450 Hz (carrés) et 1 kHz (losanges).

On observe sur la figure VI-9 que pour les niveaux inférieurs à 68 dB SPL, plus la sensibilité de l'oreille diminue (en fonction de la fréquence) plus la valeur de la pente diminue. En effet, d'après la figure VI-1, pour les sons impulsionnels, l'oreille est plus sensible à 2,9 kHz puis à 450 Hz et enfin 1 kHz. Ces résultats sont difficiles à expliquer et montrent aussi l'insuffisance du nombre de points de mesure. Nous sommes conscients de cette limite et cette étude mérite d'être poursuivie avec plus de points expérimentaux et plus d'auditeurs. On observe, même si les résultats de l'analyse statistique ne le confirment pas, une même tendance pour les trois fonctions de sonie. C'est-à-dire que les pentes des fonctions de sonie sont plus raides pour des niveaux crêtes faibles (inférieurs à 68 dB SPL ici) que pour des niveaux crêtes moyens, confirmant les résultats de Buus et coll. (1997).

VI-2.5.3 Conclusion sur l'étude des fonctions de sonie de sons impulsionnels

Nous avons décrit, dans cette expérience, les fonctions de sonie, mesurées en champ libre, de sons impulsionnels de durées et de fréquences différentes. Selon nos résultats, les fonctions de sonie ressemblent à des fonctions de sonie de sons purs stationnaires masqués. En effet, on a pu observer une pente plus élevée pour des niveaux crêtes faibles que pour des niveaux crêtes moyens. Ces résultats sont toutefois limités par un nombre de points expérimentaux peu élevés.

D'après les analyses statistiques, et compte tenu de la dispersion des données, nous n'avons pas montré d'influence de la durée ni de la fréquence sur les pentes des fonctions de sonie de sons impulsionnels.

VI-3 Conclusion générale

Le principal apport de cette étude a été de fournir pour des sons impulsionnels de forme « naturelle », et non des sons en créneaux, des données expérimentales, de sonie et d'isotonie. Ces données permettront, dans le chapitre VIII, de comparer les modèles de sonie et l'estimateur ESI.

Ce chapitre a permis de décrire les lignes isotoniques de sons impulsionnels de temps de descente de 20 ms, écoutés en champ libre. Les lignes isotoniques que nous avons obtenues sont quasi parallèles et ressemblent, pour les fréquences supérieures à 1 kHz, aux lignes isotoniques de sons stationnaires de durée plus longue (norme ISO 226 de 2003). Pour les sons impulsionnels étudiés dont les porteuses sont inférieures à 1 kHz, nous avons montré que la sensibilité de l'oreille ne dépendait plus de cette même porteuse.

D'un point de vue de la métrologie, il est important de souligner que la mesure du niveau en dB(A) sous-estime le niveau perçu de sons impulsionnels. En effet, le dB(A) étant basé sur la ligne isotonique de sons stationnaires à 40 phons, il pondère plus les basses fréquences.

La deuxième partie de ce chapitre a porté sur les fonctions de sonie de sons impulsionnels. Les résultats de cette étude ont confirmé des résultats mis en avant par Buus et coll. (1997). En effet, on a trouvé que les fonctions de sonie semblaient présenter plusieurs pentes. Ces pentes sont d'autant plus élevées que le niveau crête est plus faible. Pour des niveaux crêtes inférieurs à 68 dB SPL, plus la durée du son diminue plus la pente de la fonction de sonie augmente (pente de 0,3 pour $T_d = 600\text{ms}$; pente de 0,4 pour $T_d = 200\text{ms}$ et pente de 0,5 pour $T_d = 20\text{ms}$). Pour des niveaux crêtes plus élevés, les pentes sont de l'ordre de 0,3.

Pour des sons impulsionnels de 57 ms ($T_d = 20\text{ms}$), de porteuses égales à 450 Hz, 1 kHz et 2,9 kHz, nous avons montré que la fonction de sonie peut être décomposée en deux pentes. Les pentes sont plus élevées pour des niveaux crêtes faibles (pentes moyenne de 0,57) que pour des niveaux crêtes moyens (pentes moyenne de 0,38). Un autre point mis en avant dans cette étude est que, de manière générale, les fonctions de sonie des sons impulsionnels sont moins raides que celles obtenues pour des sons stationnaires.

Cette étude nous a donné un premier aperçu de l'influence de la fréquence sur la sonie pour des sons impulsionnels, ainsi que l'influence de la durée et de la fréquence sur l'établissement de la fonction de sonie. Ces résultats mettent en évidence la complexité du sujet que nous n'avons pas plus approfondi ici. Il sera très intéressant d'aller plus loin dans ces recherches, en étudiant les lignes isotoniques et les fonctions de sonie sur plus de sons impulsionnels et avec plus d'auditeurs, pour confirmer nos résultats et pour pouvoir aller encore plus loin dans l'analyse.

Après avoir étudié l'influence de la fréquence sur la sonie de sons impulsionnels, nous allons nous intéresser à l'influence de la durée sur l'établissement de la sonie pour des sons courts d'amplitude constante, de structure fine et de décours temporel différents.

VII

INTEGRATION TEMPORELLE DE LA SONIE EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET DE LA FORME DU DECOURS TEMPOREL

Mon travail de thèse a pour but de caractériser la perception du niveau sonore de sons de courte durée (sons impulsionnels) et de contribuer à l'élaboration d'outils permettant le calcul fiable et rapide de la sonie par la mise au point d'un estimateur de sonie d'impulsion (ESI). L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'intégration temporelle non seulement pour des signaux en forme de créneau, les plus souvent étudiés, mais aussi pour des signaux en forme d'impulsion, plus proches de sons « naturels ». Les résultats de nos recherches permettront d'obtenir des données sur lesquelles nous pourrions comparer les modèles et l'estimateur ESI. Elles permettront, à plus long terme, de déterminer des améliorations possibles des modèles de sonie et de l'estimateur de sonie d'impulsion.

Notre but est ici (1) de calculer la durée critique éventuelle et de comparer les résultats selon le déroulement temporel des signaux (créneaux ou impulsions à décroissance exponentielle), (2) de définir, pour chaque forme d'enveloppe temporelle, comment la sonie croît jusqu'à cette durée critique, (3) de déterminer s'il y a une influence du contenu spectral d'un stimulus sur l'augmentation de son niveau d'isophonie avec la durée, et ce pour les deux formes de déroulement temporel étudiées.

VII-1 Première expérience : Influence de la fréquence et du déroulement temporel

Cette première expérience consiste à étudier des sons de courte durée en forme de créneau et en forme d'impulsion, de portées différentes. L'objectif de ce paragraphe est de déterminer, pour ces deux formes, non seulement la durée critique, mais aussi s'il existe une influence de la fréquence sur cette durée critique et sur l'augmentation de la sonie avec la durée.

VII-1.1 Stimuli

Les signaux étudiés ont été construits avec une enveloppe temporelle en forme de créneau (voir figure VII-1) ou d'impulsion (voir figure VII-2). La structure fine de remplissage des enveloppes était composée de sons purs (125 Hz, 350 Hz, 1 kHz, 3 kHz et 8 kHz) et d'un bruit blanc. Tous les niveaux crêtes des signaux ont été fixés à 72 dB SPL lors de la restitution.

L'établissement et l'extinction des stimuli en créneaux ont pour forme des demi-fenêtres de hanning et duraient 5 ms. Pour les créneaux, la durée totale du son est la somme des durées d'établissement, du palier et d'extinction. Les durées des créneaux sont donc de 10, 22, 50, 100,

220 et 500 ms. Le choix des durées a été effectué afin d'obtenir une répartition régulière sur une échelle logarithmique.

Durée totale des sons synthétisés (ms)
Créneaux
10
22
50
100
220
500
Impulsions
10
20
35
70
155
310
670
1520
3155

Tableau VII-1 : Durées en ms des signaux synthétisés.

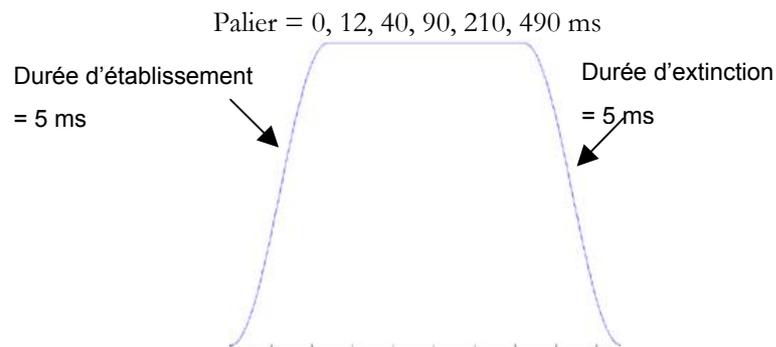


Figure VII-1 : Modèle d'enveloppe pour la construction des créneaux.

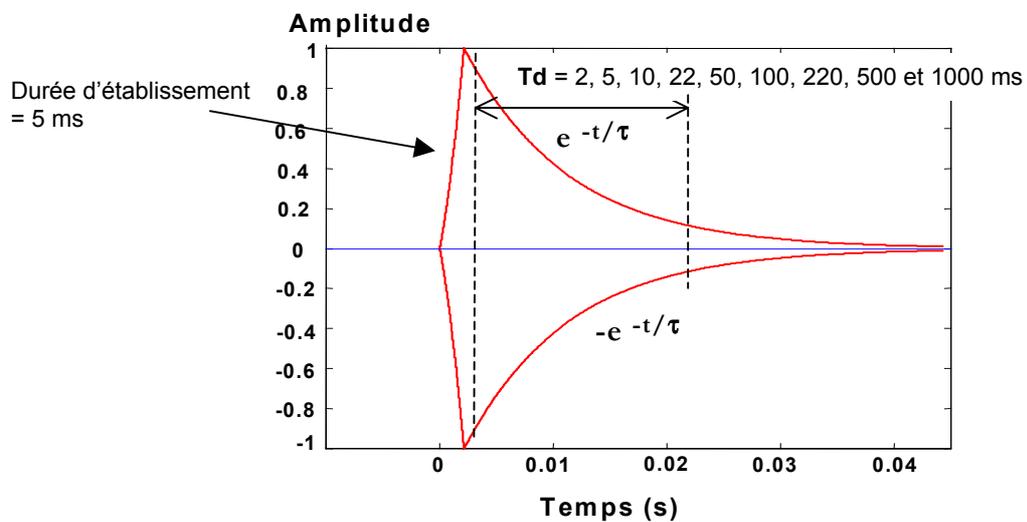


Figure VII-2 : Modèle d'enveloppe pour la construction des impulsions.

On caractérise ici une impulsion par une montée rapide et linéaire de l'amplitude, pas de palier et une extinction de forme exponentielle décroissante ($e^{-(\alpha(t-T_d))}$; où T_d est le temps de descente : durée mise pour passer de 90% à 10 % de l'amplitude). La durée d'établissement est de 5 ms et les temps de descente sont : 2, 5, 10, 22, 50, 100, 220, 500 et 1000 ms. La construction des signaux, avec la décroissance exponentielle, entraîne une durée totale infinie. Le signal était alors coupé à -60 dB du niveau crête. La durée totale des impulsions est donnée dans le tableau VII-1.

VII-1.2 Auditeurs

Les tests ont été réalisés par dix auditeurs, six femmes et quatre hommes. Les auditeurs étaient des étudiants et des personnels du laboratoire âgés de 24 à 42 ans et avaient tous un audiogramme normal.

VII-1.3 Procédure

Les mesures du niveau d'isotonie ont été faites avec une méthode d'ajustement (voir chapitre IV). Elles se pratiquaient en deux sessions. Dans la première, le son test était présenté avant le son de comparaison. Dans la deuxième session, le son test suivait le son de comparaison. Le son de comparaison était une bande de bruit centrée sur 1 kHz, de largeur 120 Hz et de durée 500 ms. Un silence de 300 ms séparait les deux sons. Deux paires étaient séparées de 400 ms. La tâche de l'auditeur consistait à ajuster le niveau du son de comparaison de manière à ce qu'il ait la même sonie que le son test. L'auditeur pouvait faire varier, à l'aide d'un boîtier de commande, le niveau du son de comparaison de plus ou moins 5, 2 ou 1 dB. La paire de sons était présentée sans arrêt jusqu'à ce que le sujet ait jugé égales les sonies des deux sons. Les différents sons étaient présentés dans un ordre aléatoire, différent pour chaque auditeur. Le niveau du son de comparaison, au départ du test, était présenté aléatoirement au-dessus (environ + 10 dB) ou au-dessous (environ -15 dB) du niveau d'isotonie probable du son test (des tests ayant été faits au préalable pour avoir une première estimation des niveaux d'isotonie).

Le niveau d'isotonie retenu est la moyenne des deux jugements des dix auditeurs.

VII-1.4 Dispositif expérimental

Les fichiers sons étaient convertis en signal analogique à l'aide d'une carte son Oros. Le niveau des sons était réglé à l'aide d'un atténuateur programmable Wilsonics (model PAT1). Les sons étaient émis par une enceinte amplifiée Génélec 1031A.

VII-1.5 Résultats et discussion

Les niveaux d'isotonie en fonction de la durée sont représentés sur les figures VII-3 et VII-4 pour les créneaux et pour les impulsions respectivement. La fréquence est le paramètre des graphes.

On observe sur la figure VII-3 que pour les créneaux, le niveau d'isotonie augmente rapidement jusqu'à 100 ms (en moyenne 3 phones par doublement de durée) puis, au-delà de cette durée il continue à augmenter, mais plus doucement (en moyenne 1,5 phones par doublement de durée).

Sur la figure VII-4, on peut observer pour toutes les impulsions une dépendance linéaire du niveau d'isotonie avec le logarithme de la durée. En effet, la sonie augmente globalement d'environ 1,5 phones (en moyenne sur toutes les fréquences) par doublement de durée.

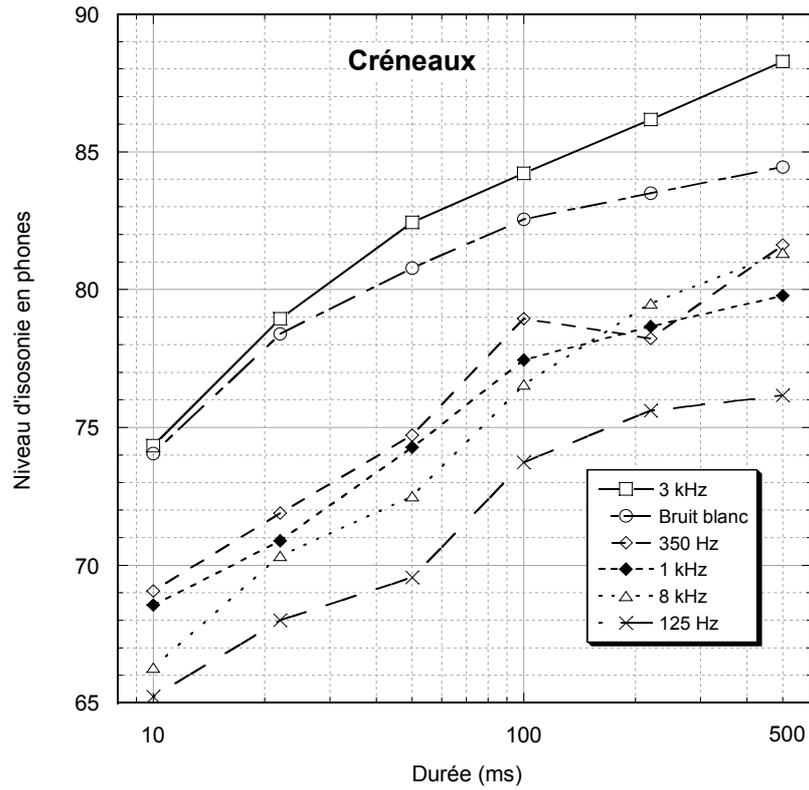


Figure VII-3 : Niveaux d'isotonie des créneaux (bruit blanc, 125 Hz, 350 Hz, 1 kHz, 3 kHz et 8 kHz) en fonction de la durée.

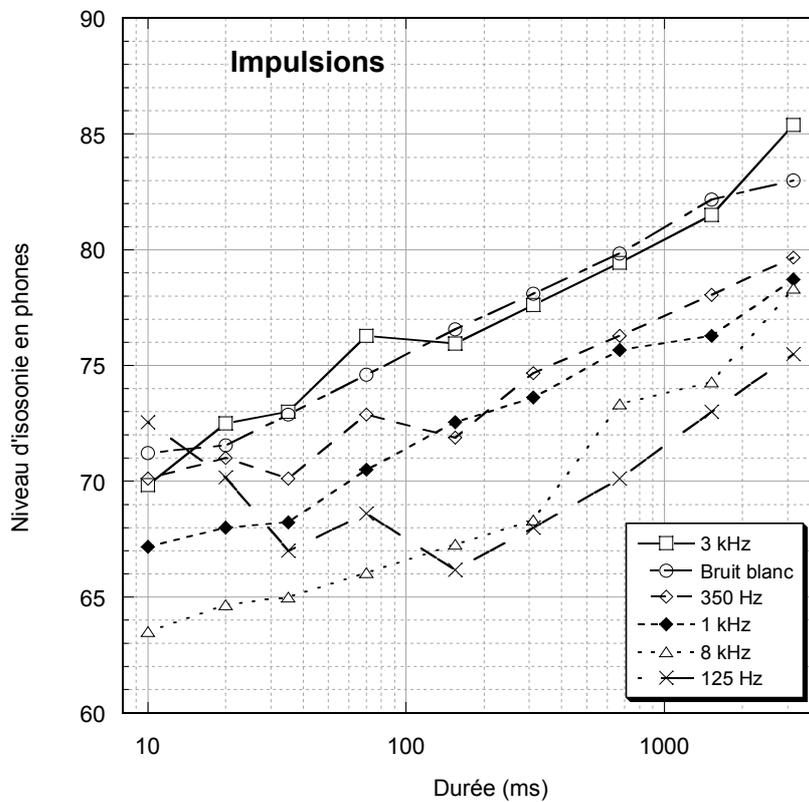


Figure VII-4 : Niveaux d'isotonie des impulsions (bruit blanc, 125 Hz, 350 Hz, 1 kHz, 3 kHz et 8 kHz) en fonction de la durée.

Globalement, on observe bien une augmentation du niveau d'isotonie avec la durée. Cependant, ceci n'est pas confirmé pour les impulsions dont la structure fine est de 125 Hz. En effet, pour ces stimuli le niveau d'isotonie diminue avec la durée pour les durées inférieures à 155 ms. Ces stimuli, pour des durées très courtes, ont un étalement spectral de plus de 400 Hz. L'énergie du signal est donc répartie sur plusieurs bandes critiques, ce qui entraîne une augmentation du niveau d'isotonie par rapport aux stimuli de durées plus longues mais pour lesquels l'énergie est répartie dans une seule bande critique.

On n'observe pas, sur les figures VII-3 et VII-4, d'influence de la fréquence sur la variation du niveau d'isotonie en fonction de la durée de sons. La distribution de la population des sujets étant considérée comme normale, nous avons réalisé une analyse de la variance (ANOVA).

D'une part, les résultats de l'ANOVA ont confirmé que le niveau d'isotonie dépend de la fréquence pour les créneaux ($p < 0,001$; $F(5)=10,85$) et pour les impulsions ($p < 0,001$; $F(5)=7,47$). D'autre part, on a trouvé une variation statistiquement significative du niveau d'isotonie en fonction de la durée pour les créneaux ($p < 0,001$; $F(5)=120,9$) et les impulsions ($p < 0,001$; $F(8)=36,43$). Enfin, une analyse de la variance à deux facteurs (fréquence et durée) a montré que pour les créneaux il n'y a pas d'interaction significative entre durée et fréquence ($p=0,3$; $F(25)=1,14$). C'est-à-dire que, pour les créneaux, l'augmentation du niveau d'isotonie avec la durée est la même quelle que soit la structure fine du stimulus.

En ce qui concerne les impulsions, il y a une interaction significative entre durée et fréquence ($p < 0,01$; $F(40)=3,045$). Cette influence de la fréquence sur la variation du niveau d'isotonie avec la durée est due à une décroissance du niveau d'isotonie avec la durée pour les stimuli de durée inférieure à 155 ms et dont la structure fine est de 125 Hz. Les résultats de l'ANOVA, sans les stimuli à 125 Hz, montrent que l'interaction entre la durée et la fréquence n'est plus significative ($p=0,57$). Il n'y a alors pas d'influence de la fréquence sur la variation du niveau d'isotonie en fonction de la durée pour les impulsions.

Cette première expérience n'a pas permis de mettre en évidence une durée critique, durée à partir de laquelle le niveau d'isotonie ne varie plus. Pour les créneaux, on observe un début de palier à partir de 100 ms (figure VII-3). En effet, à partir de cette durée, le niveau d'isotonie évolue peu avec la durée (environ 1,5 phones par doublement de durée) mais n'est pas stabilisé. En ce qui concerne les impulsions, le niveau d'isotonie augmente constamment avec la durée d'environ 1,5 phones par doublement de durée (figure VII-4).

Nous nous sommes intéressés aussi à la dispersion des mesures : les écarts types augmentent lorsque la durée des sons diminue et lorsque les fréquences du son test et du son de comparaison sont éloignées. Lorsque la durée des sons diminue, la différence qualitative entre le son test et le son de comparaison est plus marquée. De même, pour les sons plus longs mais de fréquences différentes, la différence de timbre entre son test et son de comparaison entraîne une augmentation de la variabilité. Lorsque la durée des sons diminue, le niveau d'isotonie diminue. Le seuil différentiel de l'oreille est alors plus élevé ce qui entraîne une dispersion des mesures plus grande.

VII-1.6 Conclusion

On ne peut pas, à partir de cette première expérience, déduire précisément une durée critique pour les créneaux, même si on observe une augmentation du niveau d'isotonie plus faible à partir de 100 ms.

En ce qui concerne les impulsions, on n'observe pas de stabilisation du niveau d'isotonie avec l'allongement de la durée. La difficulté de déterminer une durée critique vient du fait que les impulsions ne présentent pas de palier.

Nous avons montré par cette étude que l'augmentation du niveau d'isotonie avec la durée ne dépend pas de la fréquence. Les durées que nous avons étudiées n'ont pas permis de déterminer une valeur précise de la durée critique. C'est ce que nous allons étudier dans le paragraphe suivant.

VII-2 Deuxième expérience : Détermination expérimentale de la durée critique de créneaux et d'impulsions

La première expérience ne nous a pas permis de mettre en évidence une durée critique. Les résultats de cette expérience ont permis de montrer qu'il n'y avait pas d'effet de la fréquence mesurable par cette procédure. Une seule fréquence a alors été retenue pour cette deuxième expérience. Afin de pouvoir déterminer la valeur de la durée critique pour les créneaux, une nouvelle expérience a été réalisée avec des stimuli de durées plus longues. Pour les impulsions, nous avons uniquement rajouté une impulsion de 1060 ms. Nous n'avons pas étudié des impulsions de durée supérieure à 2 s car, ne possédant pas de palier, nous ne nous attendons pas à observer de durée critique compte tenu des résultats de la première expérience. De plus, au delà de cette durée d'autres phénomènes entrent en jeu tel que le décrutement. L'objectif est ici de déterminer la forme de l'intégration temporelle de ce type de sons.

VII-2.1 Stimuli

La construction des signaux s'est effectuée de la même manière que pour la première expérience de ce chapitre. L'établissement et l'extinction des créneaux ont pour forme des demi-fenêtres de hanning de 5 ms. Leur durée totale sont de 10, 22, 50, 100, 220, 360, 500, 1000 et 1500 ms. Les temps de descente des impulsions sont de 2, 5, 10, 22, 50, 100, 220, 360, 500 et 1000 ms. La fréquence des signaux est de 1 kHz. Les durées des sons sont récapitulées dans le tableau VII-2. Tous les niveaux crêtes sont fixés à 72 dB SPL lors de la restitution.

Durée totale des créneaux (ms)	Durée totale des impulsions (ms)
10	10
22	20
50	35
100	70
220	155
360	310
500	670
1000	1060
1500	1520
	2000

Tableau VII-2: Durée en ms des signaux de 1 kHz dont le niveau crête est de 72 dB SPL.

VII-2.2 Auditeurs

Les tests ont été réalisés par douze sujets, cinq femmes et sept hommes. Ils avaient entre 19 et 42 ans et avaient tous un audiogramme normal.

VII-2.3 Procédure

La procédure utilisée est la même que pour la première expérience. Elle diffère uniquement par le fait que le son de comparaison était de la même fréquence que le son test, pour faciliter la tâche de l'auditeur et ainsi diminuer les valeurs des écarts types. C'est-à-dire que le son de comparaison était un son pur de 1 kHz de 1 s. Le niveau d'isotonie est la moyenne des deux jugements des douze auditeurs.

VII-2.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est le même que dans la première expérience.

VII-2.5 Résultats et discussion

Les niveaux d'isotonie, obtenus pour les créneaux et les impulsions, sont représentés en fonction de la durée sur la figure VII-5.

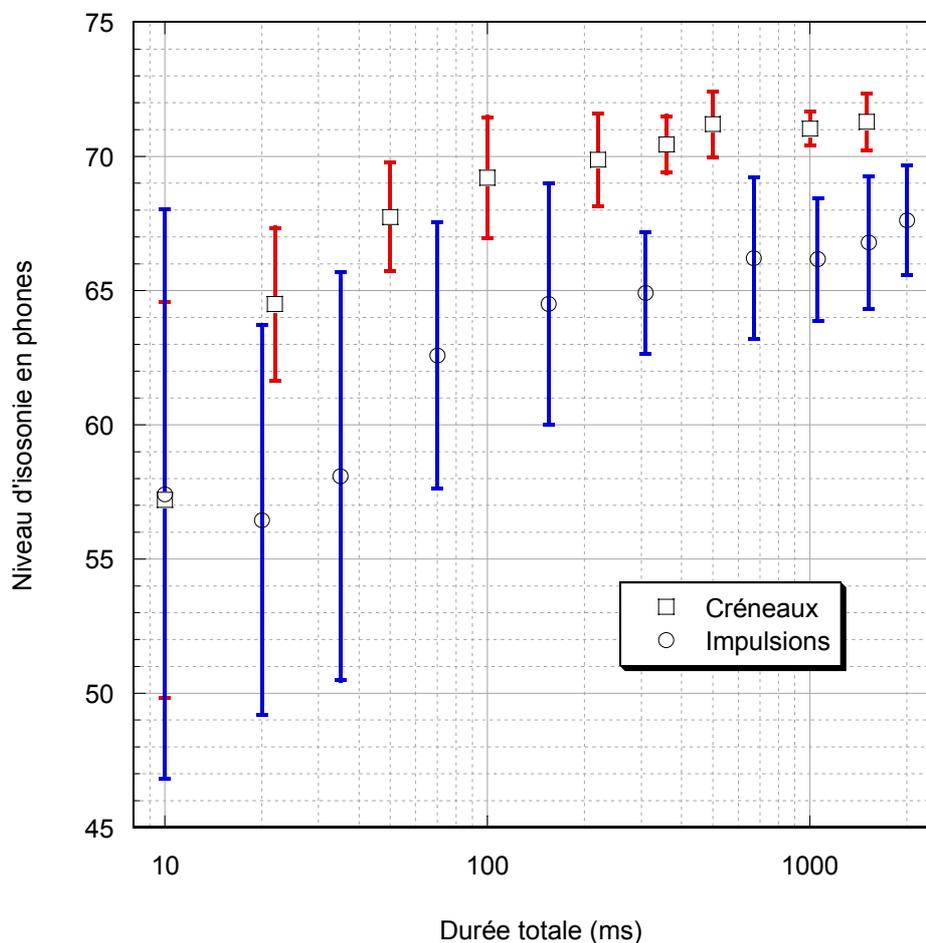


Figure VII-5 : Niveaux d'isotonie de créneaux et d'impulsions en fonction de leur durée.

On observe sur la figure VII-5 que, pour les créneaux, le niveau d'isotonie augmente avec la durée jusqu'à 360 ms ; après cette durée, il ne varie que très légèrement (moins de 1 phone). Pour les impulsions, on observe aussi une augmentation du niveau d'isotonie avec la durée mais le

niveau d'isotonie ne se stabilise pas même s'il n'augmente que très peu à partir de 100 ms (environ 1 phons par doublement de durée).

Pour les très courtes durées, les valeurs des écarts types augmentent lorsque la durée des stimuli diminue. L'influence du son de comparaison sur la variabilité ne dépend plus, pour des durées très courtes, de la différence des structures fines mais de la différence des durées. Le fait d'avoir pris un son de comparaison de même structure fine que le son test, dans cette expérience, a permis d'éviter les différences de timbre entre le son test et le son de comparaison et a ainsi permis de réduire la variabilité des résultats pour des sons de durées supérieures à 200 ms. En dessous de cette durée, pour diminuer la variabilité, il aurait fallu utiliser un son de comparaison de durée plus courte. Par exemple, comme le préconise Pedersen (1977), le son de comparaison aurait été de 22 ms pour le son test de 10 ms, 50 ms pour le son test de 22 ms et ainsi de suite jusqu'à avoir un son de comparaison dont la durée permette l'établissement de la sonie (environ 360 ms pour les créneaux). Mais cette procédure aurait été plus complexe pour les impulsions.

Nous allons maintenant nous intéresser à la modélisation de l'intégration temporelle de la sonie pour les sons en forme de créneaux et en forme d'impulsions.

VII-2.5.1 Intégration temporelle de la sonie de créneaux

Afin d'étudier l'intégration temporelle, nous avons représenté sur la figure VII-6 le niveau d'isotonie des créneaux en fonction de leur durée. Les données expérimentales concernant les créneaux peuvent être ajustées par une fonction exponentielle (relation VII-1 déterminée à partir de la relation II-3), représentée par une ligne en trait plein sur la figure VII-6 :

$$L_t = L_{\text{comp}} + 10 \text{Log}(1 - e^{-(t/\tau)}) \quad (\text{VII-1})$$

où L_t est le niveau que doit avoir le son de comparaison (son long de 1 s) pour avoir la même sonie que le son test (créneau d'intensité $I(t)$), t représente la durée du stimulus et τ la constante de temps. L_{comp} est le niveau des créneaux de durée longue.

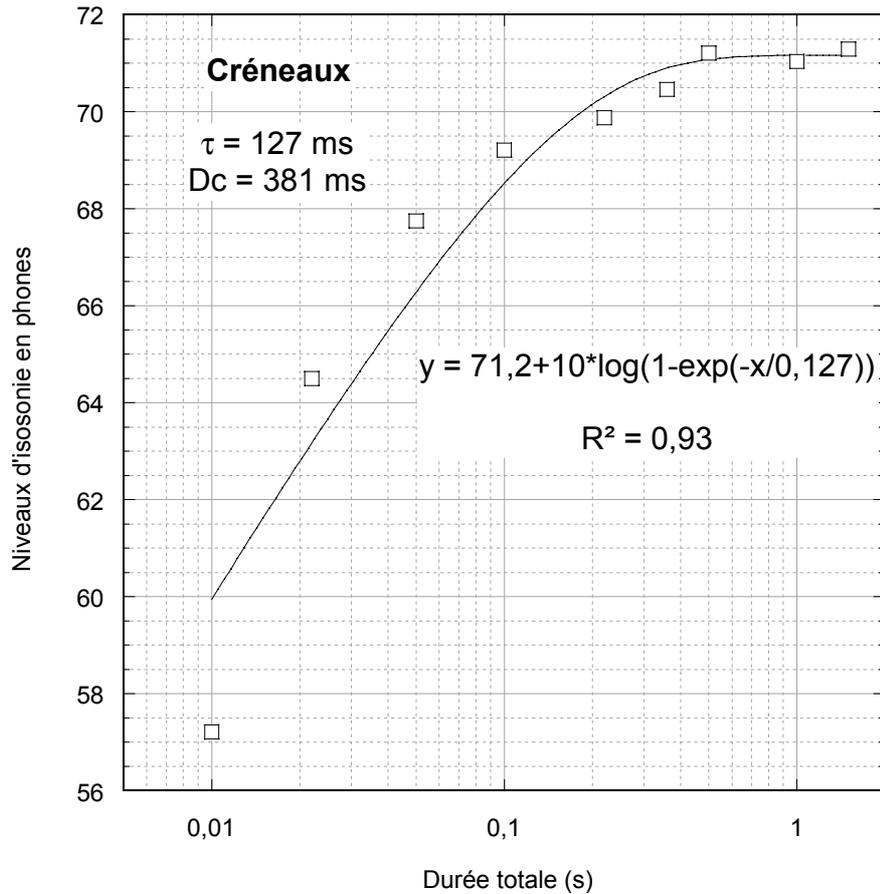


Figure VII-6 :Intégration temporelle de sonie pour des créneaux. La ligne en trait plein représente l'ajustement des points expérimentaux par une fonction du type $L_{comp} + 10 \log(1 - e^{-t/\tau})$.

La constante de temps τ calculée est de 127 ms pour les créneaux ce qui est légèrement supérieur aux résultats de la littérature (Zwicker et Fastl, 1999) qui donnent une constante de temps de 100 ms. On propose de définir une durée critique égale à 3τ , par analogie avec la charge d'un condensateur en électronique où 3τ est le temps au bout duquel on considère le condensateur chargé. Pour les créneaux, la constante de temps étant de 127 ms, la durée critique est donc de l'ordre de 380 ms.

VII-2.5.2 Intégration temporelle de la sonie d'impulsions

De la même manière que pour les créneaux, nous avons représenté sur la figure VII-7 le niveau d'isophonie mesuré en fonction de la durée des impulsions.

Pour des durées inférieures à 70 ms, le niveau d'isophonie augmente rapidement avec la durée des impulsions. Pour des durées supérieures à 70 ms, le niveau d'isophonie ne cesse de croître lorsque la durée des sons augmente jusqu'à 2 s (augmentation de 1 phone par doublement de durée). Même si l'augmentation du niveau d'isophonie est moins grande pour des durées supérieures à 70 ms, nous ne pouvons pas établir, pour les sons impulsionnels, de durée critique.

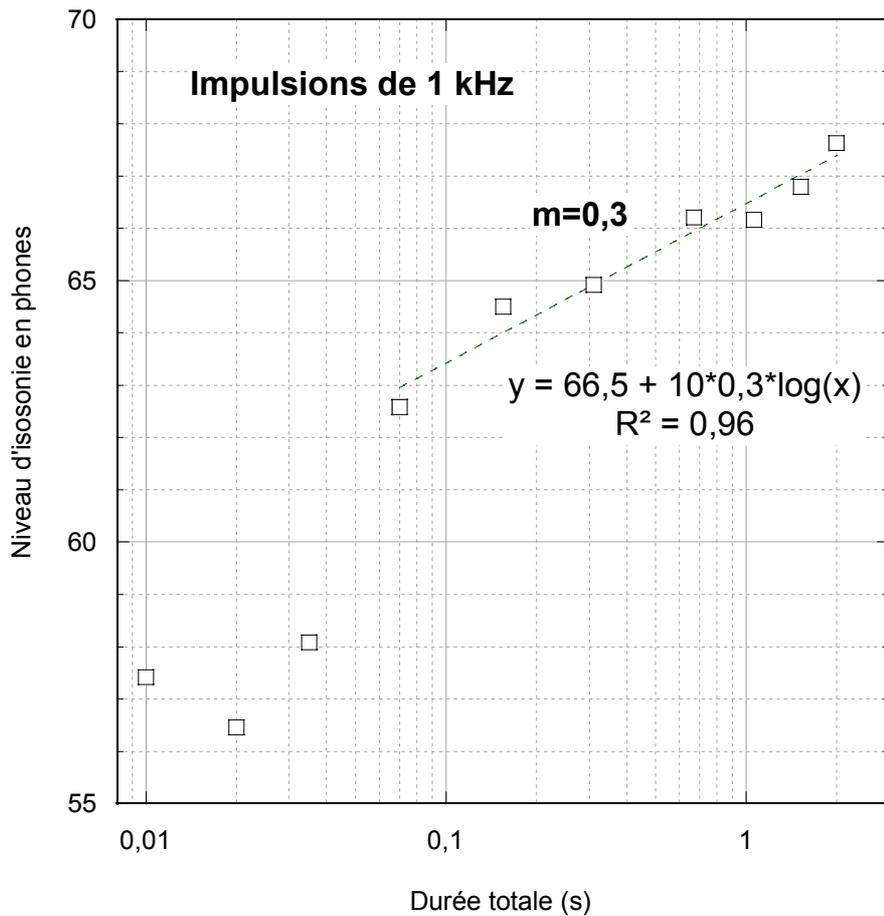


Figure VII-7 : Intégration temporelle de sonie pour des impulsions. La ligne en trait plein représente l'ajustement des points expérimentaux par une fonction du type $L_{comp} - L_t = k - 10m \text{Log}(t)$.

Pour les durées comprises entre 70 ms et 2 s, les points expérimentaux peuvent être ajustés par une fonction logarithmique de la durée (relation VII-2, représentée par la droite en trait plein sur la figure VII-7) :

$$L_t = k + 10m \text{Log}(t) \quad (\text{VII-2})$$

où L_t et t sont définis de la même manière que dans la relation VII-1, k est une constante et m la pente de la fonction logarithmique.

Cette relation correspond aux résultats de Green et coll. (1957) concernant l'intégration temporelle. C'est-à-dire qu'ils ont modélisé l'intégration temporelle par une fonction puissance de la durée :

$$I(t) \cdot t^m = C \quad (\text{II-4})$$

où $I(t)$ est l'intensité sonore d'un son bref et t la durée, C est une constante et m est l'exposant de la fonction puissance qui caractérise la décroissance de l'intensité avec la durée pour maintenir une sonie constante.

L'exposant de cette fonction est de 0,3 pour des durées comprises entre 70 ms et 2 s. Pour des durées inférieures 70 ms, nous n'avons pas ajusté les données expérimentale par cette fonction. En effet, il manque un certains nombre de points expérimentaux afin de modéliser l'intégration pour ces durées. Il semble tout de même que la pente de l'hypothétique fonction d'ajustement serait plus raide pour des durées inférieures à 70 ms.

VII-3 Conclusion générale de l'étude sur l'intégration temporelle de créneaux et d'impulsions

Les résultats de cette expérience montrent tout d'abord qu'il n'y a pas d'influence de la fréquence sur la variation du niveau d'isotonie avec la durée, pour les créneaux et les impulsions étudiés ici.

Pour des stimuli de 1 kHz d'enveloppe en **créneaux**, la constante de temps est de 127 ms et la **durée critique**, définie comme trois fois la constante de temps, **est de l'ordre de 380 ms**. L'intégration temporelle, pour ce type de sons, peut être **modélisée par une fonction exponentielle** :

$$L_t = L_{\text{comp}} + 10 \text{Log}(1 - e^{-(t/\tau)})$$

En ce qui concerne les **impulsions** de 1 kHz, il n'a pas été établi de durée critique car nous n'avons pas observé de palier. Nous avons cependant montré que l'intégration temporelle peut être modélisée, pour des durées comprises entre 70 ms et 2 s, par une **fonction logarithmique de la durée** :

$$L_{\text{bref}} = k + 10m \text{Log}(t)$$

Des données expérimentales supplémentaires sur des impulsions de durées comprises entre 20 et 200 ms seraient tout de même nécessaires pour affiner ces résultats.

Enfin, ces données vont permettre d'étudier le domaine d'application ou les limites des différents modèles de sonie et de l'estimateur de sonie d'impulsion. C'est ce que nous allons nous attacher de faire dans le chapitre suivant.

VIII

DOMAINE D'APPLICATION DES MODELES ET ESTIMATEURS DE SONIE

L'objectif de ce chapitre est de comparer les niveaux d'isotonie calculés par les différents modèles, décrits dans le chapitre III, à des données expérimentales de la littérature et aux données expérimentales que nous avons obtenues lors de ce travail de thèse. Nous avons aussi calculé le niveau d'isotonie avec l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI). Dans une première partie, nous avons comparé les niveaux d'isotonie calculés à des données expérimentales connues pour des sons stationnaires (fonctions de sonie, lignes isotoniques et influence de la largeur de bande). Dans une deuxième partie, à partir des données expérimentales que nous avons obtenues lors de ce travail de thèse, nous avons testé les modèles sur des sons non stationnaires et sur des sons impulsifs.

Nous rappelons ci-dessous ce que chaque modèle ou estimateur permet de calculer et pour quel type de son il est prévu :

- **Modèle de Zwicker (1958)**

Ce modèle permet de calculer la sonie et le niveau d'isotonie de sons stationnaires. Dans ce qui suit, le modèle sera noté Zwicker 1958.

- **Modèle de Moore et coll. (1997)**

Ce modèle permet de calculer la sonie et le niveau d'isotonie de sons stationnaires. Dans ce qui suit, le modèle sera noté Moore 1997.

- **Modèle de Zwicker et Fastl (1999)**

Ce modèle donne la sonie et le niveau d'isotonie en fonction du temps de sons non stationnaires. Différents indicateurs, préconisés par les auteurs pour approcher le niveau d'isotonie global, sont calculés à partir du niveau d'isotonie en fonction du temps. Il s'agit ici du niveau d'isotonie dépassé 5% du temps (N5). Il sera noté Zwicker 1999 (N5). Nous proposons d'autres indicateurs tels que le Nmax, ou le Nimp. Pour des raisons de confidentialité, nous ne les définirons pas. Ils seront notés Zwicker 1999 (Nmax) et Zwicker 1999 (Nimp). Ces deux derniers indicateurs nous semblent mieux adaptés au calcul du niveau d'isotonie global de sons non stationnaires et impulsifs. C'est ce que nous vérifierons dans la deuxième partie de ce chapitre.

- **Modèle de Glasberg et Moore (2002)**

Ce modèle donne la sonie en fonction du temps de sons variant dans le temps. Les auteurs préconisent de calculer la valeur maximale du niveau d'isotonie à court terme (noté Moore 2002 (STLmax)) pour approcher le niveau d'isotonie global de sons variant dans le temps. Le

maximum du niveau d'isotonie à long terme (noté Moore 2002 (LTLmax)) ainsi que la moyenne des valeurs du niveau d'isotonie à long terme (noté Moore 2002 (LTLmoy)), selon les auteurs, permettent de calculer le niveau d'isotonie global de sons stationnaires.

Le niveau d'isotonie à court terme est le niveau d'isotonie perçu à chaque instant. Le niveau d'isotonie à long terme correspondant au niveau d'isotonie global d'un son restant en mémoire après l'arrêt de ce son.

- Estimateur de sonie de sons impulsionnels (ESI)

Cet estimateur, résultat de nos propres recherches, permet de calculer le niveau d'isotonie de sons impulsionnels.

VIII-1 Etude des modèles de sonie sur des données expérimentales de la littérature pour des sons stationnaires

Nous comparons dans ce paragraphe les données obtenus par les différents modèles de sonie à celles de la littérature de sons stationnaires de 1 seconde.

VIII-1.1 Fonctions de sonie de sons stationnaires

La figure VIII-1 montre la relation entre le niveau de pression d'un son pur stationnaire de 1 kHz de 1 seconde (égal au niveau d'isotonie) et la sonie calculée par les modèles de Zwicker 1958 (pointillés) et Moore 1997 (traits tirets), et mesurée (cercles) lors d'une étude de Canévet et coll. (1986) et d'une étude de Hellman et Zwislocki (1963) avec une écoute en champ libre. Les modèles fournissent bien la fonction de sonie d'un pur à 1 kHz obtenue expérimentalement.

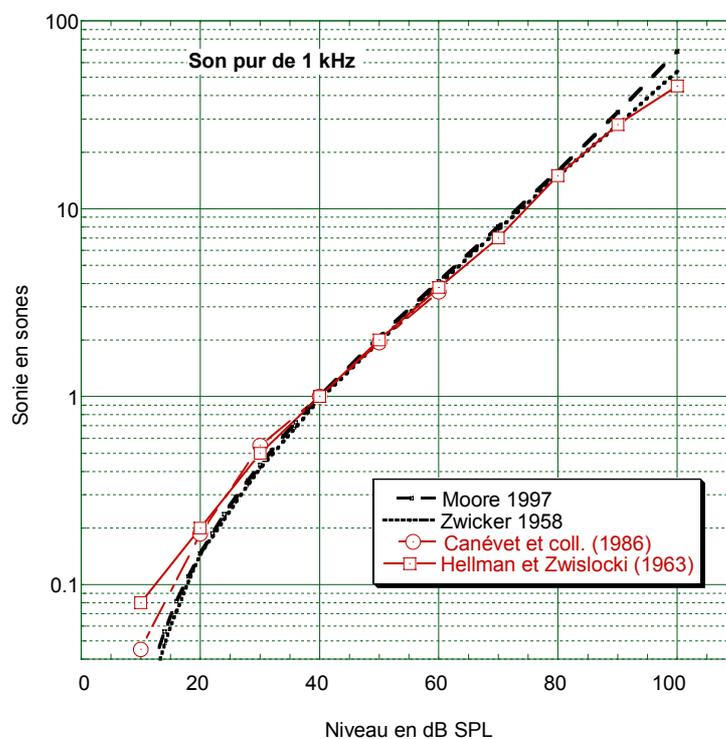


Figure VIII-1: Fonction de sonie d'un son pur de 1 kHz de 1 seconde. La sonie est calculée par les modèles de Moore 1997 (traits tirets) et Zwicker 1958 (pointillés). Les données expérimentales (cercles et carrés) sont issues d'études en champ libre, de Canévet et coll. (1986) et de Hellman et Zwislocki (1963).

Rappelons que nous nous intéressons aux niveaux d'isotonie, exprimé en phones. Cette unité est plus pratique, dans le domaine industriel et en métrologie, car elle est plus proche du niveau de pression en dB SPL.

Dans ce qui suit, nous présentons les niveaux d'isotonie, calculés à partir des modèles de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997), de sons stationnaires de 1 seconde, de fréquence 160 Hz (figure VIII-2) et 4 kHz (figure VIII-3) de niveaux compris entre 0 et 100 dB SPL. Les données expérimentales auxquelles sont comparés les niveaux d'isotonie calculés sont issues des normes ISO 226 de 1987 (représentées par des cercles) et de 2003 (représentées par des carrés). Il est important de souligner que les modèles de sonie de sons stationnaires ont été ajustés sur les lignes isotoniques de la norme ISO 226 (1987). Il est toutefois intéressant de faire figurer les deux normes car la norme ISO 226 a fait l'objet d'une modification suite à de nombreux travaux expérimentaux inter-laboratoires (ISO 226 (2003)) et présente des écarts non négligeables avec l'ancienne norme.

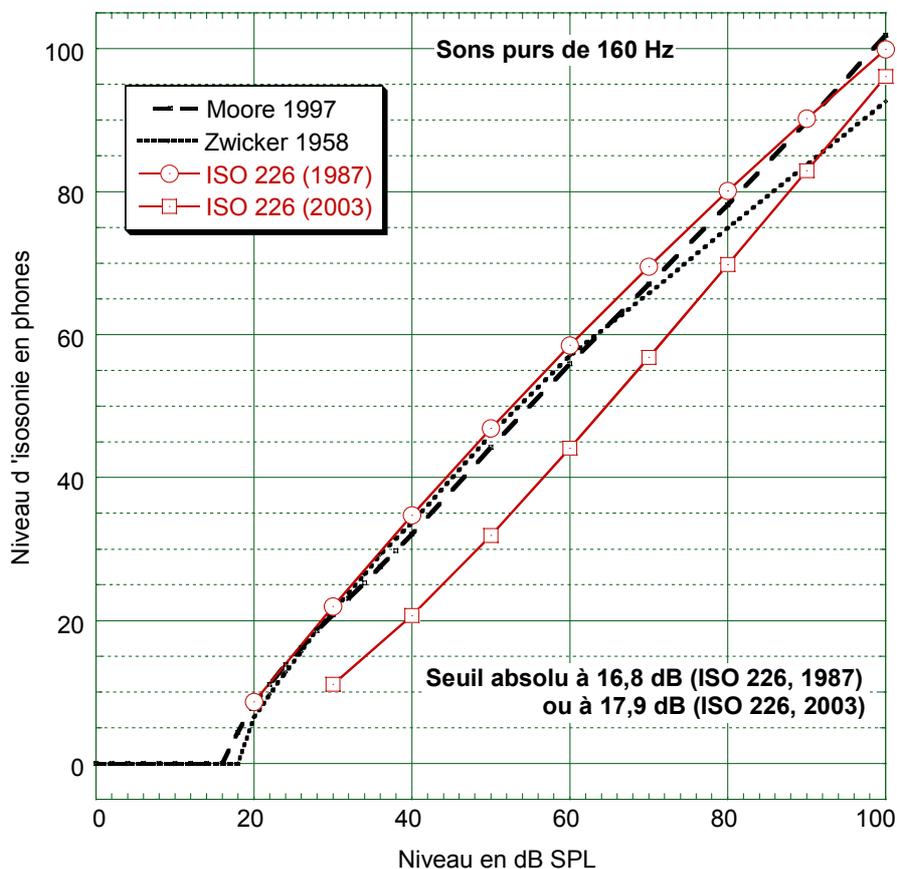


Figure VIII-2 : Niveaux d'isotonie calculés en fonction du niveau en dB SPL d'un son pur stationnaire de 1 seconde à 160 Hz qui serait présenté en champ libre.

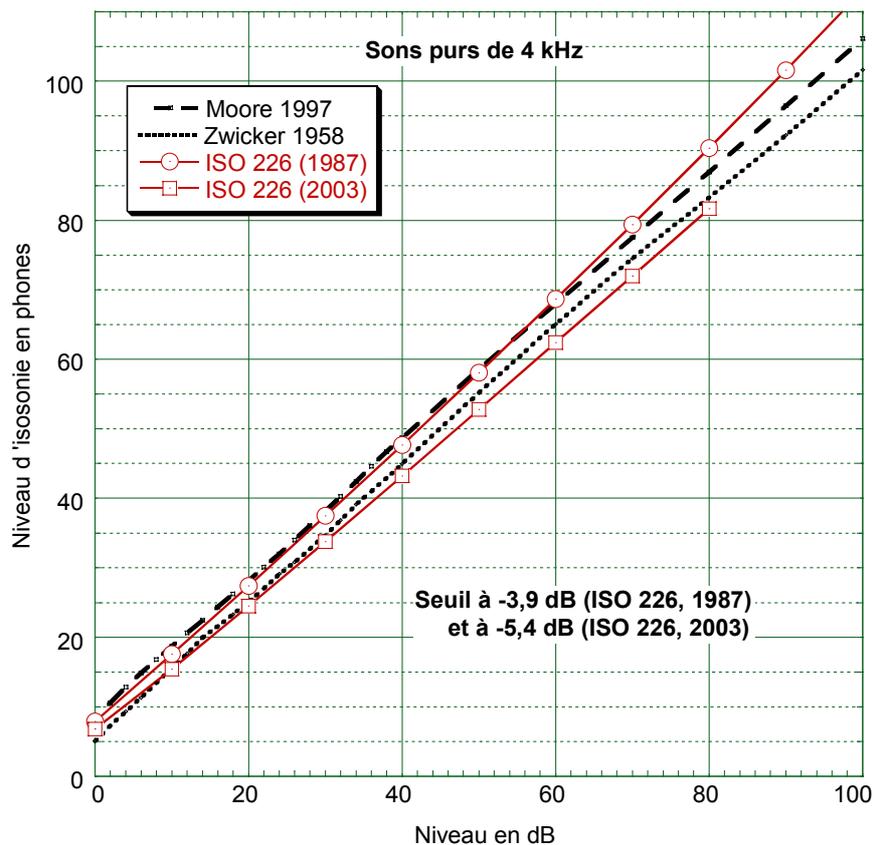


Figure VIII-3 : Niveaux d'isophonie calculés en fonction du niveau en dB SPL d'un son pur stationnaire de 1 seconde à 4 kHz qui serait présenté en champ libre.

En ce qui concerne le son pur de 160 Hz, et pour des niveaux inférieurs à 80 dB SPL, les prévisions faites par les modèles sont bien en accord avec les données expérimentales de la norme ISO 226 de 1987. Au-delà de 80 dB SPL, les données du modèle de Zwicker 1958 s'écartent légèrement des données expérimentales. Les écarts les plus grands par rapport aux données de la norme ISO 226 de 1987 sont de l'ordre de 10 phones. On constate des écarts du même ordre de grandeur entre les deux normes.

De même que pour les sons purs de 160 Hz et 1 kHz, on observe pour le son pur de 4 kHz, sur la figure VIII-3, que de manière générale, le modèle de Moore 1997 donne des valeurs équivalentes à la norme ISO 226 de 1987, avec des écarts inférieurs à 5 phones. Le modèle de Zwicker 1958, quant à lui, donne des valeurs légèrement inférieures à celles de la norme de 1987. Les écarts peuvent être de 10 phones pour les niveaux les plus élevés.

Globalement, les modèles donnent des niveaux d'isophonie proches des valeurs expérimentales. On constate des écarts, pour des sons purs de niveaux élevés, pouvant être de l'ordre de 10 phones pour les plus grands. On observe des écarts du même ordre de grandeur entre les deux normes.

Nous avons, dans ce qui suit, comparé les niveaux d'isophonie, calculés par les modèles et obtenus expérimentalement, pour des sons de spectre plus complexe. Des données étant publiées pour des bruits blancs stationnaires (Scharf, 1978), nous avons testé ce type de son pour des niveaux de pression compris entre 0 et 100 dB SPL (voir figure VIII-4).

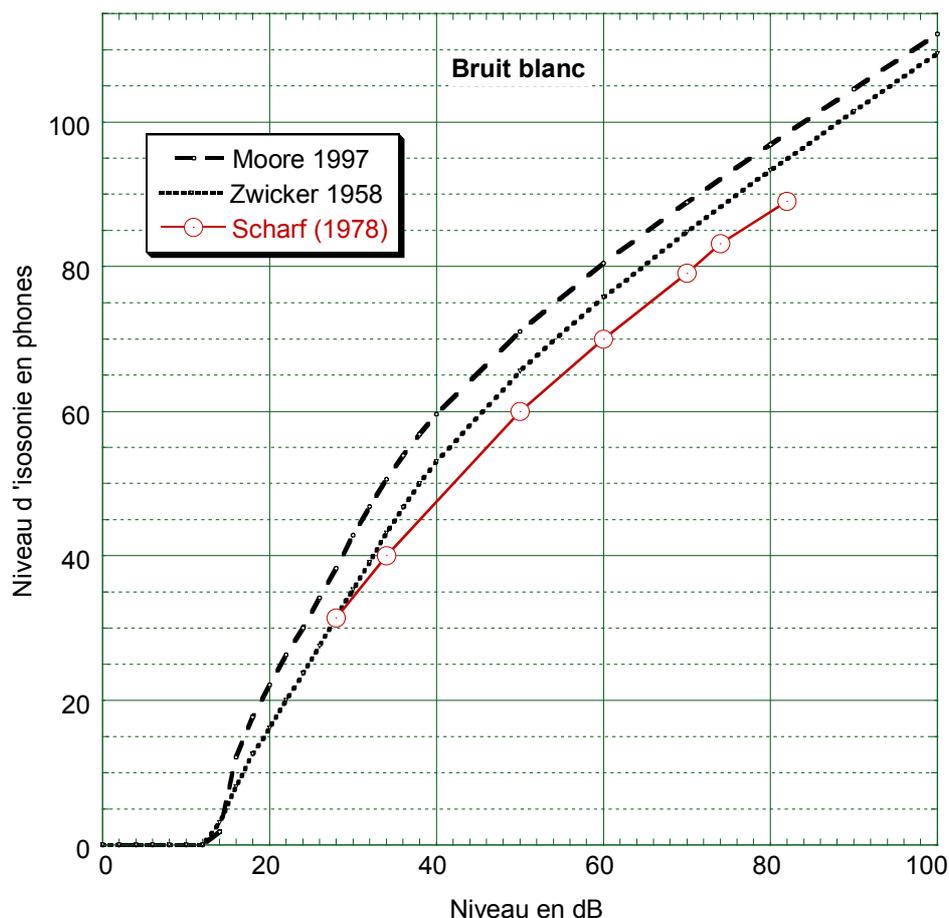


Figure VIII-4 : Niveaux d'isononie calculés en fonction du niveau en dB SPL d'un bruit blanc stationnaire de 1 seconde qui serait présenté en champ libre.

Les deux modèles donnent des niveaux d'isononie supérieurs aux données de Scharf avec un écart maximum de 5 phones pour le modèle de Zwicker 1958 et de 10 phones pour le modèle de Moore 1997.

L'étape suivante consiste à comparer des lignes isononiques obtenues par les différents modèles à des données expérimentales à différents niveaux d'isononie.

VIII-1.2 Lignes isononiques de sons stationnaires

Les figures VIII-7, VIII-8 et VIII-9 montrent respectivement les lignes isononiques à 50, 60 et 80 phones, données par les modèles de Zwicker 1958 et de Moore 1997 pour des sons stationnaires. Ces données sont comparées aux lignes isononiques, obtenues expérimentalement et publiées dans les normes ISO 226 de 1987 (cercles), sur lesquelles les modèles ont été ajustés. Nous représentons, comme dans le paragraphe précédent les données de la norme ISO 226 de 2003 afin de montrer les différences entre les deux normes.

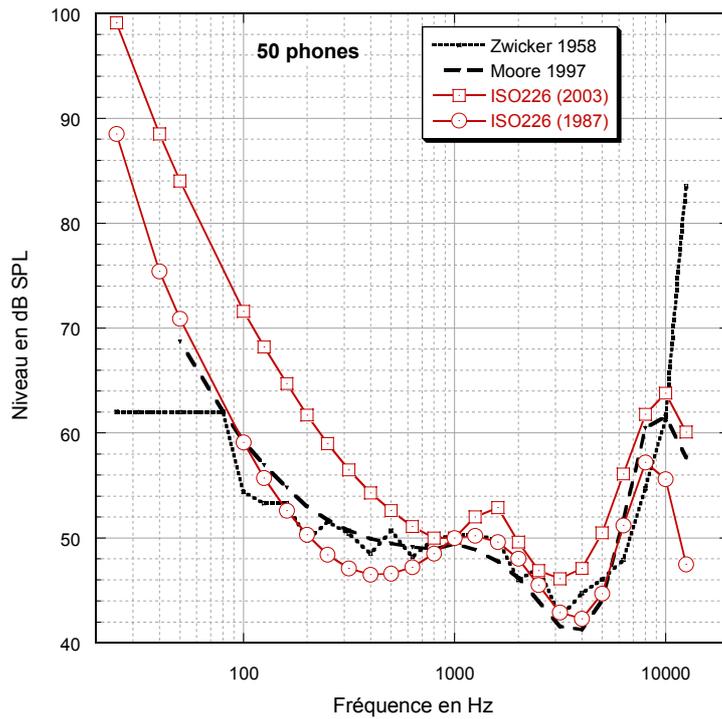


Figure VIII-5 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 50 phones calculées par les modèles de Zwicker 1958 (pointillés) et de Moore 1997 (traits-tirets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 50 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

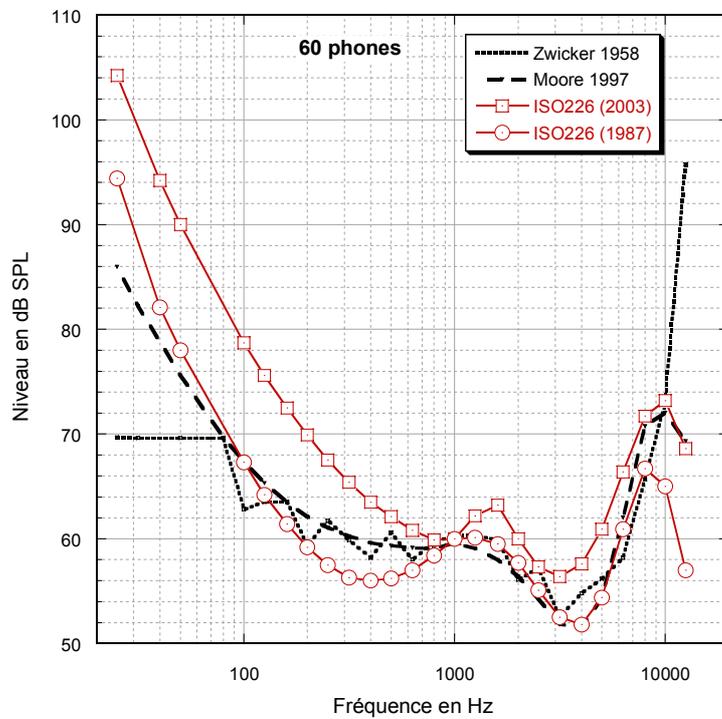


Figure VIII-6 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 60 phones calculées par les modèles de Zwicker 1958 (pointillés) et de Moore 1997 (traits-tirets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 60 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

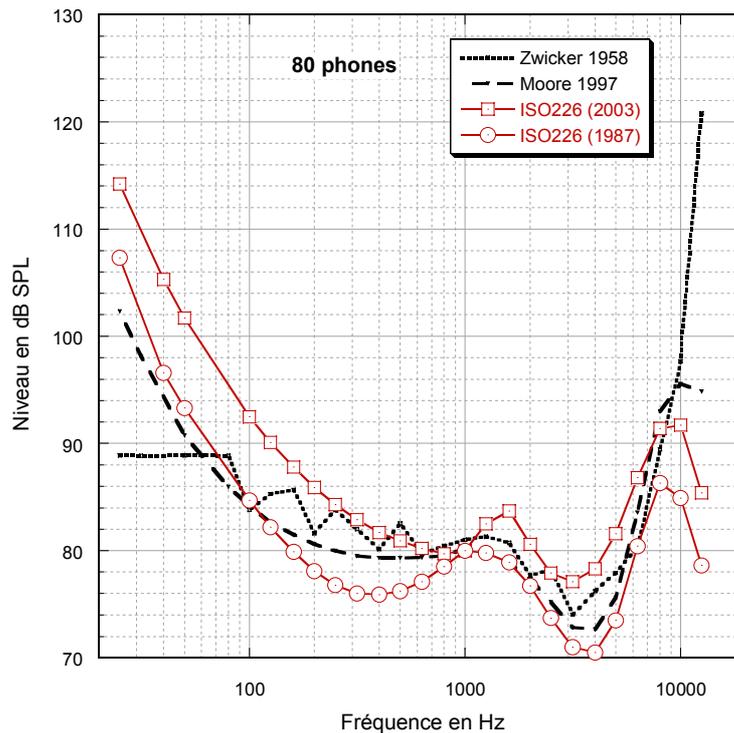


Figure VIII-7 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 80 phones calculées par les modèles de Zwicker 1958 (pointillés) et de Moore 1997 (traits-tirets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 80 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

Les lignes isotoniques calculées par les deux modèles sont équivalentes à celles de la norme ISO 226 (1987). On constate cependant que le modèle de Zwicker 1958 donne des valeurs plus faibles que celles de la norme de 1987 pour des fréquences inférieures à 100 Hz et des valeurs plus élevées pour le son à 12500 Hz.

Selon Zwicker, l'oreille fonctionne comme un banc de filtres modélisés par des bandes critiques. La largeur des bandes critiques est de 100 Hz pour des fréquences centrales inférieures à 500 Hz (voir tableau III-1). Dans chaque bande critique, Zwicker calcule un niveau d'excitation constant. Cela explique, pour des fréquences inférieures à 100 Hz faisant partie d'une même bande critique, les valeurs constantes du niveau d'isotonie. On peut aussi observer un tel palier pour les sons purs de fréquences 100, 125 et 160 Hz (fréquences d'une même bande critique).

On observe aussi que le modèle de Moore 1997 donne des valeurs légèrement supérieures à celles de la norme ISO 226 (1987) pour les hautes fréquences (de 8 à 12,5 kHz). On constate que ces valeurs sont très proches de celles de la norme de 2003.

Les figures VIII-8, VIII-9 et VIII-10 représentent les lignes isotoniques calculées par les modèles développés pour des sons non stationnaires (Zwicker 1999 (Nmax) et Moore 2002 (LTLmax)). Ces deux modèles, prévus pour des sons non stationnaires, ont été aussi validés pour des sons stationnaires. C'est ce que nous vérifions ici. Le modèle de Moore 2002, contrairement aux autres, a été ajusté sur des données expérimentales proches de celles de la norme ISO 226 de 2003.

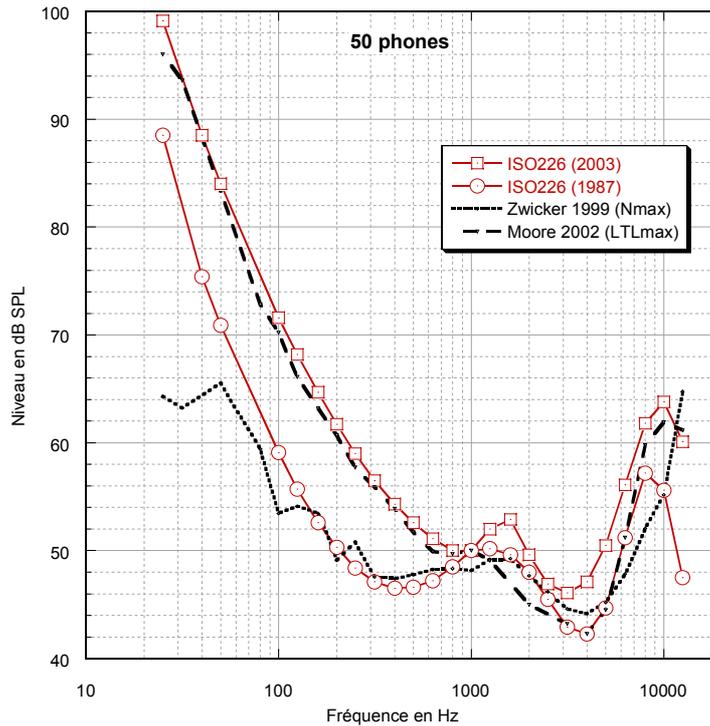


Figure VIII-8 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 50 phones calculées par les modèles de Zwicker 1999 (Nmax) (pointillés) et de Moore 2002 (LTLmax) (traits-tirets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 50 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

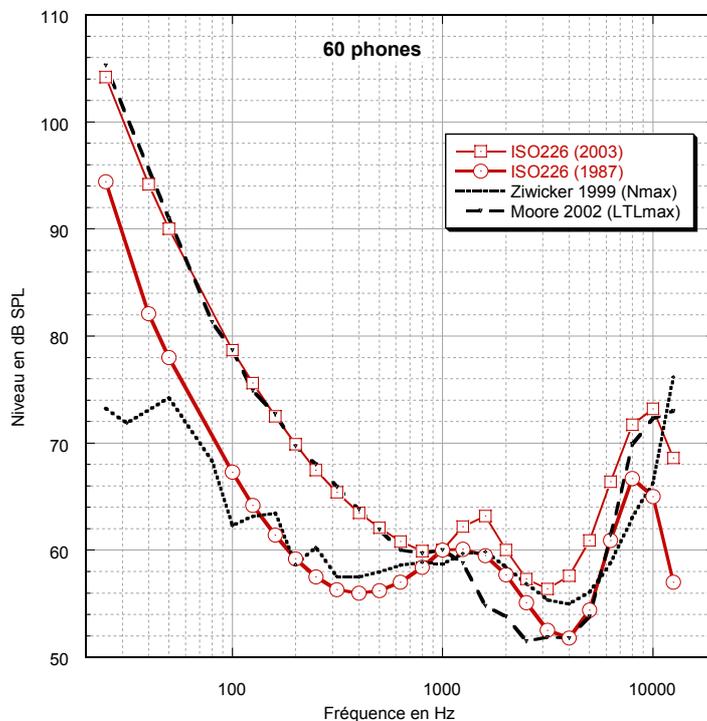


Figure VIII-9 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 60 phones calculées par les modèles de Zwicker 1999 (Nmax) (pointillés) et de Moore 2002 (LTLmax) (traits-tirets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 60 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

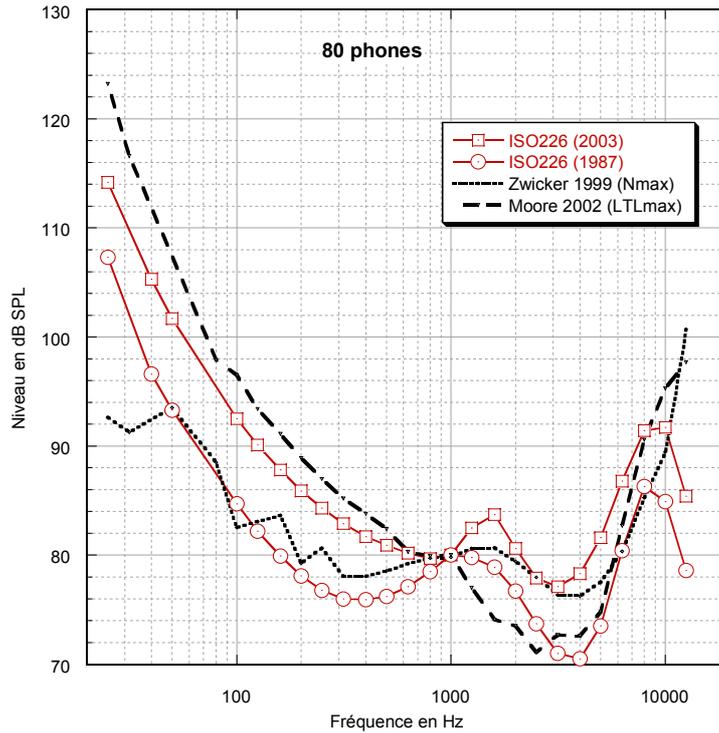


Figure VIII-10 : Ligne isotonique de sons stationnaires de 1 seconde à 80 phones calculées par les modèles de Zwicker 1999 (Nmax) (pointillés) et de Moore 2002 (LTLmax) (traits-trets). Les cercles et les carrés représentent les lignes isotoniques à 80 phones obtenues expérimentalement et publiées respectivement dans la norme ISO 226 de 1987 et de 2003.

Pour des fréquences comprises entre 50 Hz et 10 kHz, le modèle Zwicker 1999 (Nmax) donne des valeurs très proches (2 phones près) de celles de la norme ISO 226 de 1987. Pour des fréquences inférieures à 50 Hz, le Nmax est inférieur aux valeurs données par les deux normes ISO 226 pour les mêmes raisons que celles citées pour le modèle de Zwicker 1958. Pour des fréquences supérieures à 10 kHz, le modèle de Zwicker 1999 (Nmax) donne des valeurs supérieures à celles des deux normes. Cet écart est d'autant plus grand que le niveau d'isotonie est plus élevé.

Le modèle de Moore 2002 (LTLmax), donne des valeurs équivalentes à celles de la norme ISO 226 (2003), sauf pour des fréquences comprises entre 1 et 7 kHz pour lesquelles les valeurs du niveau d'isotonie sont plus proches de celles de la norme ISO 226 (1987).

VIII-1.3 Influence de la largeur de bande de sons stationnaires

La sonie d'un son dépend de sa largeur spectrale. Si la largeur spectrale d'un son d'intensité constante croît, la sonie reste constante jusqu'à ce que la largeur spectrale dépasse une largeur critique appelée bande critique. Pour des niveaux d'isotonie supérieurs à 20 phones, si la largeur de la bande augmente au-delà de la valeur critique, la sonie augmente. La largeur des bandes critiques dépend de la fréquence centrale de la bande. Pour une bande de bruit centrée à 1 kHz, la largeur de la bande critique est de 160 Hz.

La figure VIII-11 représente les niveaux d'isotonie calculés par les modèles de Zwicker 1958 et de Moore 1997 pour une bande de bruit de 1 s centrée géométriquement sur 1 kHz de 40, 60 et 80 dB. Les valeurs choisies pour les largeurs de la bande de bruit sont comprises entre 20 Hz et 5000 Hz. Nous avons aussi représenté des données expérimentales issues de Scharf (1978).

L'allure des courbes fournies par les modèles coïncident à moins de 4 phones près avec celles de Scharf (1978). En effet, le niveau d'isotonie reste constant pour des largeurs de bande inférieures à 160 Hz. De plus, pour des largeurs de bandes supérieures à 160 Hz, le niveau d'isotonie augmente plus à 40 et à 60 dB qu'à 80 dB.

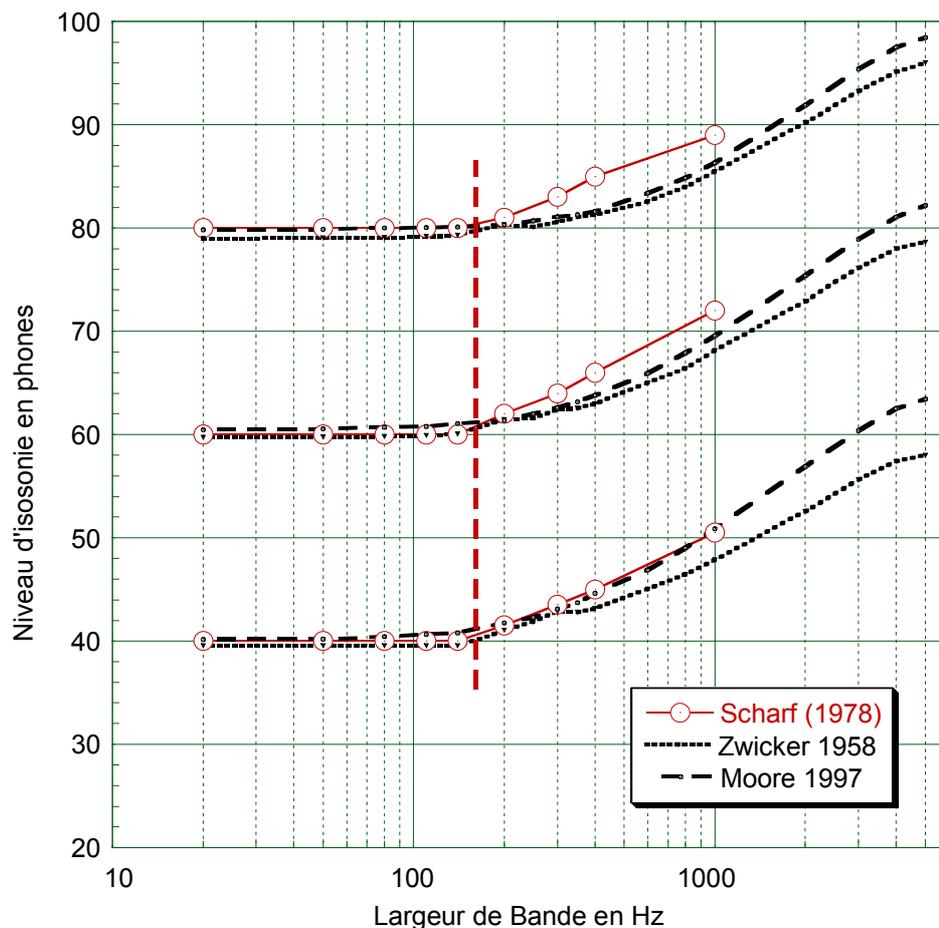


Figure VIII-11 : Niveaux d'isotonie calculés par les modèles de Zwicker 1958 (pointillés) et de Moore 1997 (traits-tirets) d'une bande de bruit de 1 seconde centrée géométriquement à 1 kHz de 40, 60 et 80 dB SPL et de durée 1 s, en fonction de la largeur de bande en hertz. Les niveaux d'isotonie issues de Scharf (1978) sont représentés par des cercles.

Nous avons, dans les paragraphes précédents, comparé les niveaux d'isotonie calculés par les modèles de sonie à des données expérimentales pour des sons stationnaires. Dans les paragraphes suivants, les modèles vont être tour à tour testés sur les différentes données expérimentales que nous avons établies durant notre travail de recherche (chapitres V, VI et VII). Ainsi, nous avons testé les modèles sur des données expérimentales concernant les lignes isotoniques de sons impulsionnels et l'intégration temporelle de sons impulsionnels et de créneaux. Enfin, les données des modèles ont été comparées aux données obtenues expérimentalement pour différents types de sons.

VIII-2 Etude des modèles de sonie sur les données expérimentale du travail de thèse

VIII-2.1 Lignes isoniques de sons impulsionnels

Dans le chapitre VI, nous avons présenté les lignes isoniques à 50, 60 et 75 phones de sons impulsionnels de 22 ms. C'est-à-dire que nous avons déterminé les niveaux crêtes que doivent avoir les sons impulsionnels pour avoir un niveau d'isonomie de 50, 60 ou 75 phones. Les résultats sont rappelés par la figure VIII-12. En ordonnées, nous avons porté les niveaux crêtes pour lesquels les sons sont de sonie égale. La dispersion des données est de l'ordre de 6 dB.

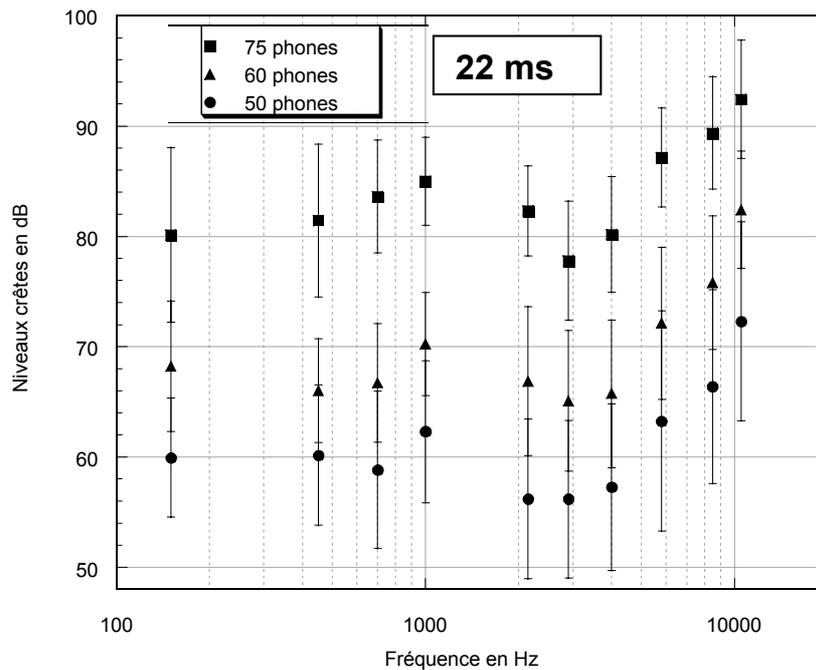


Figure VIII-12 : Lignes isoniques à 50, 60 et 75 phones de sons impulsionnels de 22 ms, déterminées dans le chapitre VI.

Nous avons calculé le niveau d'isonomie de ces sons en utilisant les différents modèles. Les sons avaient pour niveau crête celui mesuré lors de la détermination des lignes isoniques (ordonnée de la figure VIII-12).

Les figures VIII-13, VIII-14 et VIII-15 représentent les niveaux d'isonomie donnés par le modèle de Zwicker 1999 (N_{imp} et N_{max}), par notre « estimateur de sonie impulsionnelle » (ESI) et par le modèle de Moore 2002 (STL_{max}). Les niveaux crêtes des sons sont ceux mesurés pour lesquels les sons sont de niveaux d'isonomie égal à 50, 60 et 75 phones. Ainsi, un modèle qui correspondrait parfaitement à nos données fournirait des points alignés sur une droite horizontale passant par 50, 60 et 75 phones respectivement.

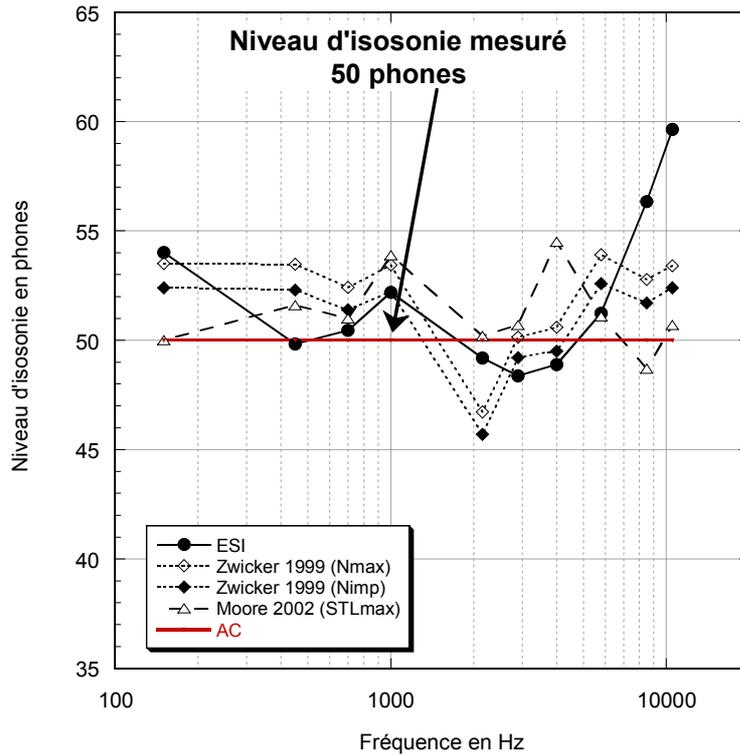


Figure VI-13 : Niveaux d'isophonie calculés, en fonction de la fréquence de la porteuse, de sons impulsionnels de 22 ms dont le niveau d'isophonie mesuré est de 50 phones.

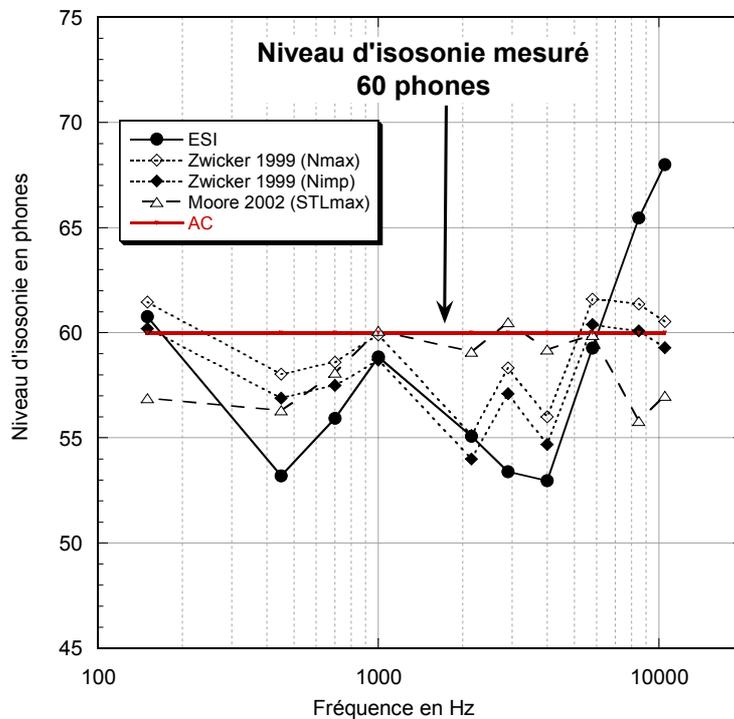


Figure VI-14 : Niveaux d'isophonie calculés, en fonction de la fréquence de la porteuse, de sons impulsionnels de 22 ms dont le niveau d'isophonie mesuré est de 60 phones.

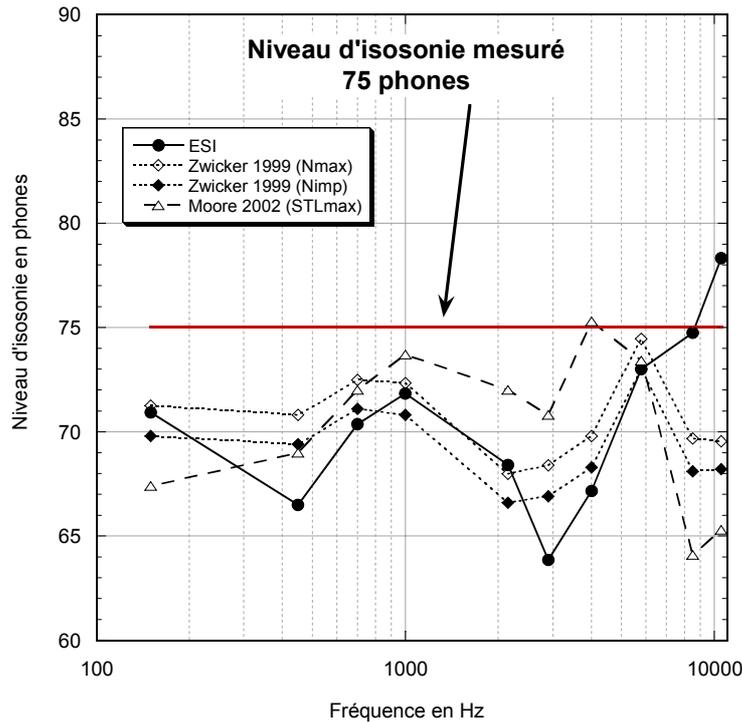


Figure VI-15 : Niveaux d'isophonie calculés, en fonction de la fréquence de la porteuse, de sons impulsionnels de 22 ms dont le niveau d'isophonie mesuré est de 75 phones.

De manière générale, et d'après les figures VIII-13, VIII-14 et VIII-15, les modèles donnent le niveau d'isophonie à moins de 5 phones près. Pour la ligne à 50 phones, les niveaux d'isophonie calculés sont globalement légèrement supérieurs. A 60 phones, au contraire, les modèles donnent des niveaux d'isophonie inférieurs à ceux mesurés. En ce qui concerne la dernière ligne isophonique à 75 phones, les modèles donnent un niveau d'isophonie au-dessous de celui mesuré. On observe aussi que l'écart entre le niveau d'isophonie calculé et mesuré est plus grand qu'à 60 phones. Plus le niveau augmente, plus le niveau d'isophonie calculé est inférieur à celui pour lequel les niveaux des sons ont été ajustés.

L'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) suit les lignes isophoniques, or celui-ci ne tient pas compte des variations de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence. L'ESI dépend de l'énergie et du temps de descente de l'impulsion, soit du niveau du son ajusté. Cela confirme la validité de l'exposant de l'énergie, du moins à 50 et 60 phones.

Le tableau VIII-1 donne le MAR (moyenne des valeurs absolues des écarts), le Rmax (écart maximum), le Rmean (écart moyen) et le Rstd (écart type des écarts moyens) pour les trois lignes isophoniques confondues. En plus des indicateurs calculés à partir du modèle de Zwicker 1999 (Nmax et Nimp), nous avons représenté, dans le tableau VIII-1, le Zwicker 1999 (N5) pour permettre une comparaison plus poussée entre les différents indicateurs.

D'après le tableau VIII-1, trois indicateurs (Nmax, Nimp et STLmax) donnent en moyenne des niveaux d'isophonie proches de ceux mesurés (MAR = 3 phones). Par contre l'écart maximum (Rmax) de ces trois indicateurs peut être de 7 phones pour Zwicker 1999 (Nmax), de 8 phones pour Zwicker 1999 (Nimp) et de 11 phones pour Moore 2002 (STLmax). Les niveaux d'isophonie calculés avec l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) sont comparables à ceux donnés par les modèles (MAR = 4 phones, Rmax = 11 phones). Cependant, l'écart est plus important (5 à 10

phones) pour des sons dont les structures fines sont des hautes fréquences, en particulier pour des niveaux d'isotonie inférieurs à 75 phones.

Lignes isotoniques de sons impulsionnels	
MAR	
Zwicker 1999 (Nmax)	3
Zwicker 1999 (Nimp)	3
Zwicker 1999 (N5)	6
ESI	4
Moore 2002 (STLmax)	3
Rmax	
Zwicker 1999 (Nmax)	7
Zwicker 1999 (Nimp)	8
Zwicker 1999 (N5)	15
ESI	11
Moore 2002 (STLmax)	11
Rmean	
Zwicker 1999 (Nmax)	-1
Zwicker 1999 (Nimp)	-2
Zwicker 1999 (N5)	-6
ESI	-1
Moore 2002 (STLmax)	-2
Rstd	
Zwicker 1999 (Nmax)	3
Zwicker 1999 (Nimp)	3
Zwicker 1999 (N5)	4
ESI	5
Moore 2002 (STLmax)	3

Tableau VIII-1 : Récapitulatifs des indices proposés (définis au chapitre III) afin de pouvoir évaluer l'efficacité des modèles de sonie.

Pour résumer, les modèles ont tendance à donner un niveau d'isotonie inférieur au niveau d'isotonie attendu ($R_{mean} < 0$), en particulier pour des niveaux d'isotonie supérieurs à 50 phones. En effet, à 50 phones, les niveaux d'isotonie calculés sont supérieurs à ceux mesurés. On n'observe pas non plus d'écart constant ($R_{std} > 0$).

Le modèle qui fournit le niveau d'isotonie le plus proche des valeurs attendues est **le Zwicker 1999 (Nmax et Nimp) qui présente un écart moyen de 3 phones** et un écart maximum de l'ordre de 7 ou 8 phones.

Contrairement à ce que nous obtenons ici, dans le chapitre III, les modèles avaient tendance à surestimer les niveaux d'isotonie mesurés des bruits de chantier pour des niveaux élevés et à les sous-estimer pour des niveaux faibles. Notons que les bruits de chantier étaient composés non seulement de sons impulsionnels mais aussi de sons quasi-stationnaires, non stationnaires et des trains d'impulsions. Nous ne retrouvons pas ici, pour des sons impulsionnels, la limite des modèles décrite dans le chapitre III concernant plus particulièrement des sons stationnaires.

VIII-2.2 Intégration temporelle

Nous avons décrit, dans le chapitre VII, l'effet de la durée sur le niveau d'isotonie. Les sons testés étaient soit des créneaux, soit des impulsions dont les niveaux crêtes étaient tous de 72 dB SPL.

Les figures VIII-16 et VIII-17 représentent, en fonction de la durée, respectivement pour les créneaux et les impulsions, les niveaux d'isotonie mesurés et calculés par le modèle de Zwicker et Fastl (N5, Nimp et Nmax), le modèle de Glasberg et Moore (STLmax) et par notre estimateur de sonie d'impulsion (ESI). Les segments verticaux représentent les écarts types à la moyenne des mesures du niveau d'isotonie.

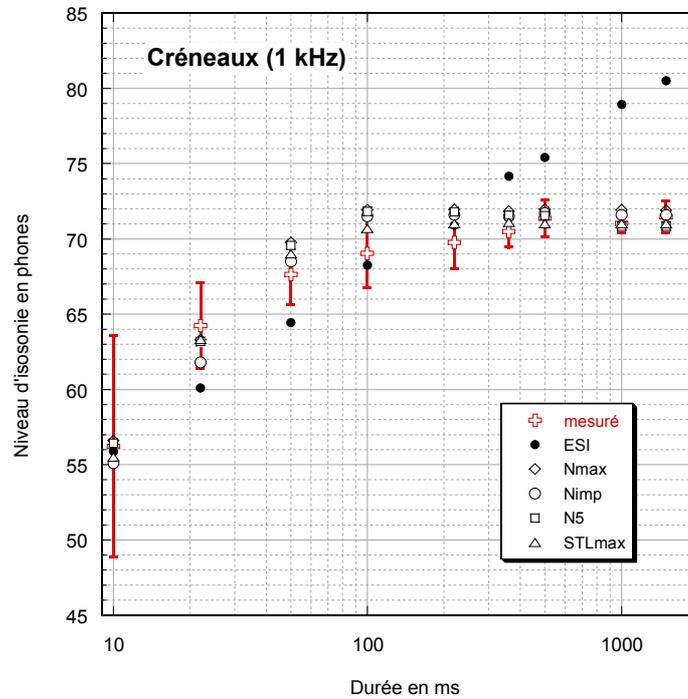


Figure VIII-16: Niveaux d'isotonie calculés des créneaux de 1kHz en fonction de la durée en millisecondes. Les croix correspondent aux niveaux d'isotonie mesurés. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types des mesures du niveau d'isotonie.

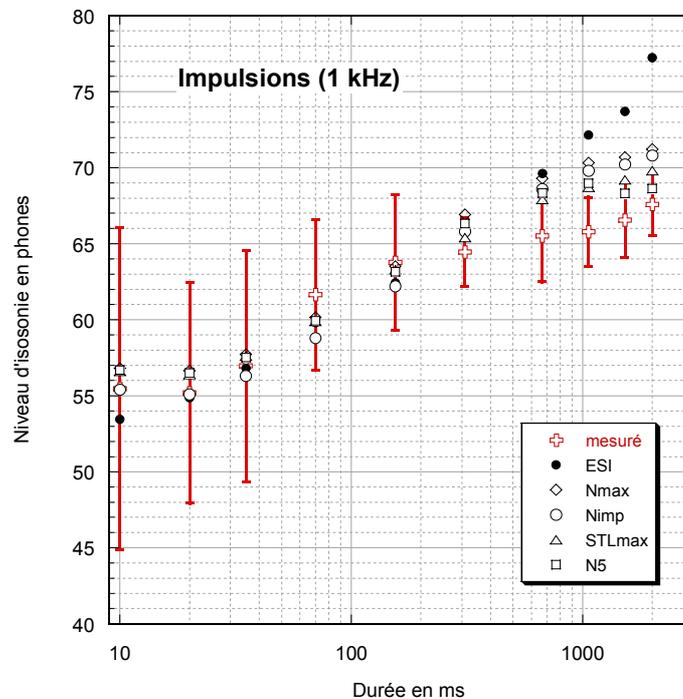


Figure VIII-17: Niveaux d'isotonie calculés des impulsions de 1kHz en fonction de la durée en secondes. Les croix correspondent aux niveaux d'isotonie mesurés. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types des mesures du niveau d'isotonie.

On observe sur la figure VIII-16 que, pour les créneaux, les modèles donnent, à moins de 2 phones près, les niveaux d'isophonie mesurés.

En ce qui concerne les impulsions (figure VIII-17), on observe des écarts plus grands entre les niveaux d'isophonie donnés par les modèles et ceux mesurés, en particulier pour des durées supérieures à 300 ms. Pour ces durées, les valeurs du niveau d'isophonie calculé se situent au-delà des valeurs des écarts types. Pour des durées inférieures à 300 ms, les modèles calculent à moins de 2 phones près en moyenne le niveau d'isophonie mesuré, comme pour les créneaux. Pour les très courtes durées, les créneaux et les impulsions sont très proches perceptivement. Au-delà de 300 ms, on entend clairement la décroissance des impulsions. Les sujets semblent alors se baser sur une pondération entre le maximum de sonie et une sonie moyenne alors que les indicateurs (N_{max} , N_5 , N_{imp}) calculent essentiellement la sonie maximum.

Le tableau VIII-2 fournit les valeurs du MAR, du R_{max} , du R_{mean} et R_{std} pour les modèles et l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI).

MAR	Créneaux	Impulsions
Zwicker 1999 (N_{max})	1	2
Zwicker 1999 (N_{imp})	1	2
Zwicker 1999 (N_5)	1	1
ESI	4	6
Moore 2002 (STL_{max})	1	2
R_{max}		
Zwicker 1999 (N_{max})	3	5
Zwicker 1999 (N_{imp})	2	4
Zwicker 1999 (N_5)	3	3
ESI	9	14
Moore 2002 (STL_{max})	2	3
R_{mean}		
Zwicker 1999 (N_{max})	1	2
Zwicker 1999 (N_{imp})	0	1
Zwicker 1999 (N_5)	1	1
ESI	2	5
Moore 2002 (STL_{max})	0	1
R_{std}		
Zwicker 1999 (N_{max})	1	2
Zwicker 1999 (N_{imp})	1	2
Zwicker 1999 (N_5)	1	1
ESI	5	6
Moore 2002 (STL_{max})	1	1

Tableau VIII-2 : Récapitulatifs des indices proposés (définis au chapitre III) afin de pouvoir évaluer l'efficacité des modèles de sonie concernant les données expérimentales sur l'intégration temporelle de créneaux (colonne du milieu) et d'impulsions (colonne de droite) de 1 kHz.

Globalement, les indicateurs tels que le N_{max} , le N_{imp} , le N_5 ou le STL_{max} prédisent bien l'intégration temporelle (MAR de 1 ou 2 phones et $R_{max} = 5$ phones).

Les résultats montrent que **le niveau d'isophonie maximum (Zwicker 1999 (N_{max})) estime assez bien le niveau d'isophonie mesuré des stimuli que nous avons étudiés.** La sonie

maximum semble être un des principaux critères, sur lequel s'appuie l'auditeur pour juger la sonie. Cependant, lorsque l'auditeur perçoit une décroissance, ce qui est le cas pour des impulsions de durée supérieure à 300 ms, son jugement ne s'appuie plus uniquement sur la sonie maximum mais semble être pondérée. On atteint ici la limite des indicateurs basés sur le maximum du niveau d'isophonie. Pour des durées plus longues (> 1 s), ces indicateurs se rapprochent du niveau d'isophonie mesuré.

L'estimateur de sonie d'impulsion que nous avons proposé donne un niveau d'isophonie avec un MAR de 6 phones. Notons que l'estimateur ESI a été construit pour des sons de durée très courte. **Dans le domaine pour lequel il a été créé, il donne des niveaux d'isophonie proches de ceux mesurés (MAR=2 phones).**

Nous allons calculer maintenant les niveaux d'isophonie sur les données expérimentales concernant l'intégration temporelle en fonction de la fréquence. Ainsi, dans ce qui suit, nous avons calculé les niveaux d'isophonie, obtenus par les différents modèles, de sons décrits au paragraphe VII-1.1. Les fréquences des sons étaient de 125 Hz, 350 Hz, 1 kHz, 3 kHz et 8 kHz. La durée des sons était comprise entre 10 et 500 ms pour les créneaux et entre 10 ms et 3 s pour les impulsions. Tous les sons avaient le même niveau crête de 72 dB SPL. Nous avons représenté sur les figures VIII-18 à VIII-27 les niveaux d'isophonie calculés et mesurés pour des créneaux et des impulsions de diverses durées et fréquences.

Pour synthétiser les résultats que nous pouvons observer sur les figures ci-après, nous avons reporté, dans le tableau VIII-3, les valeurs du Mar, du Rmax, du Rmean et Rstd.

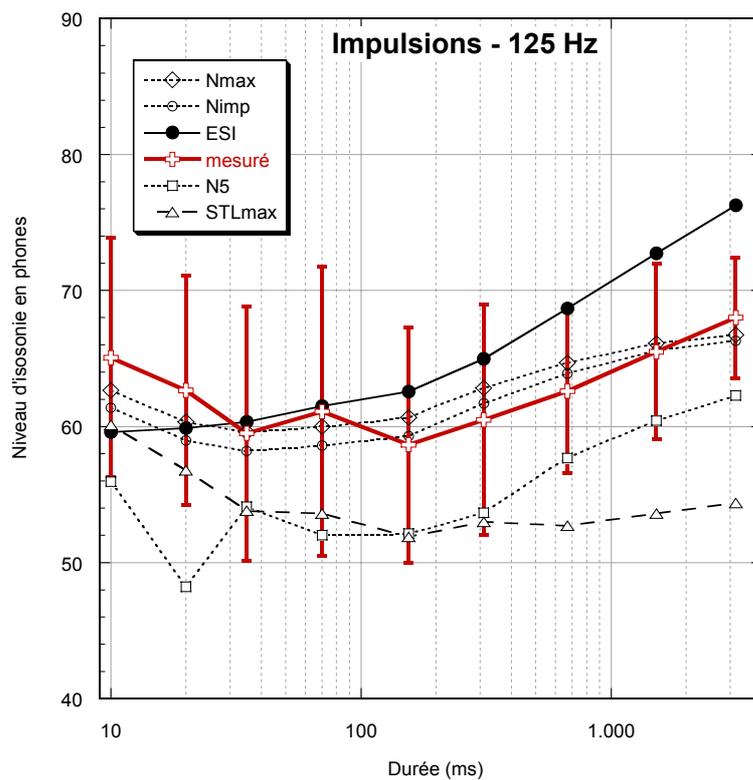


Figure VIII-18 : Niveaux d'isononie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) d'impulsions de 125 Hz en fonction de leur durée.

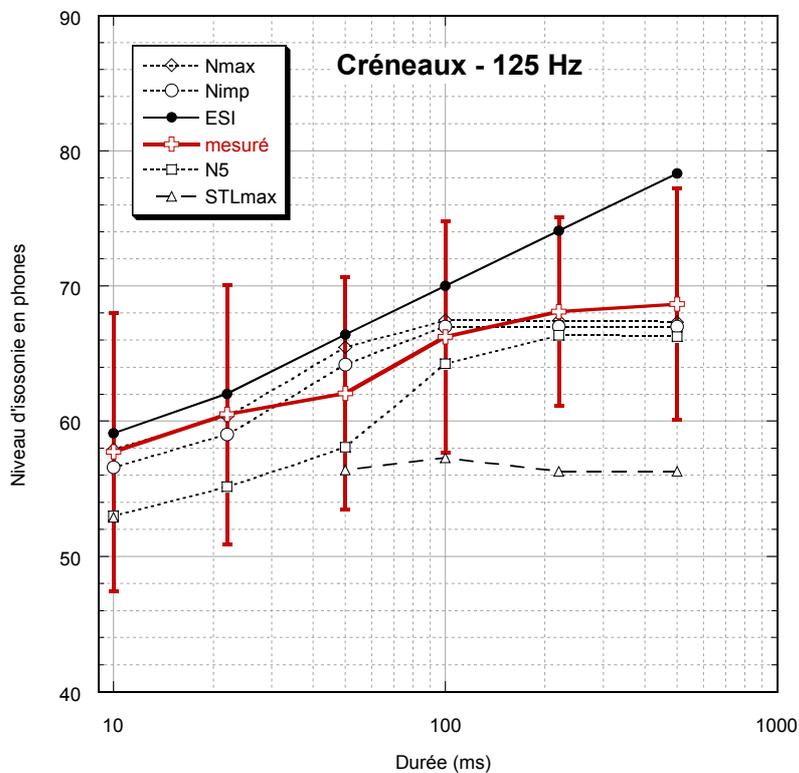


Figure VIII-19 : Niveaux d'isononie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) de créneaux de 125 Hz en fonction de leur durée.

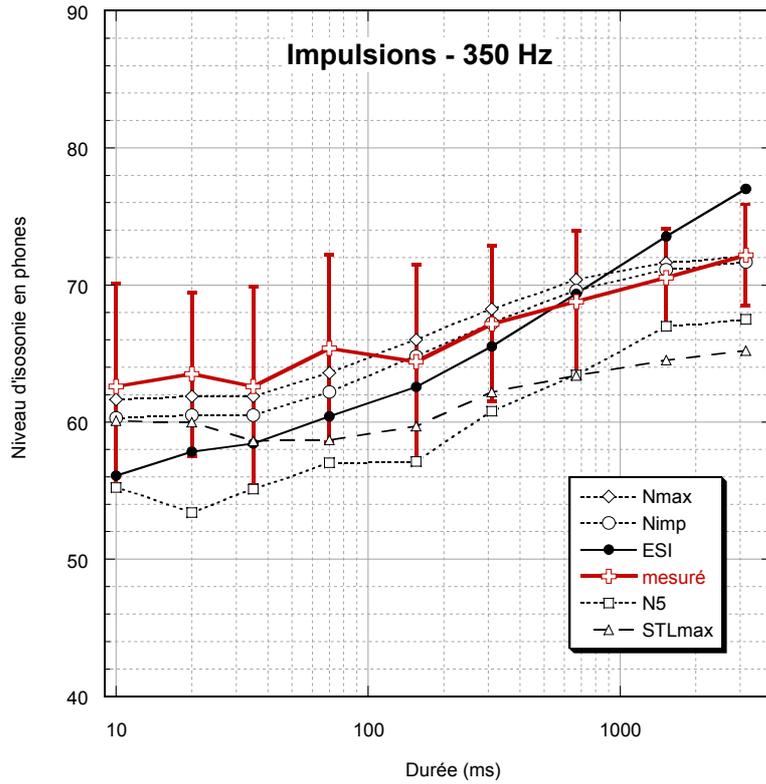


Figure VIII-20 : Niveaux d'isotonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) d'impulsions de 350 Hz en fonction de leur durée.

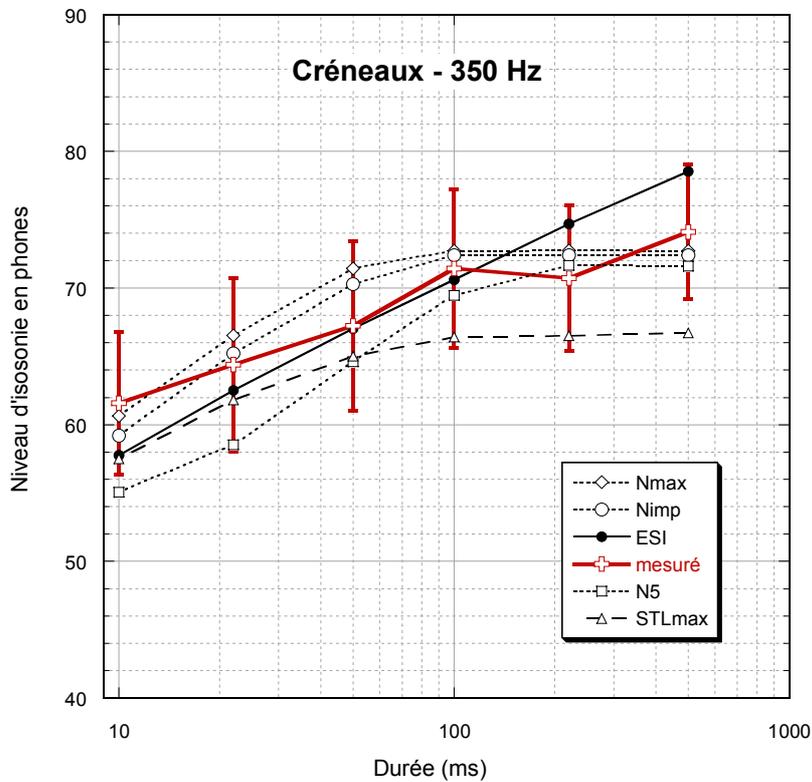


Figure VIII-21 : Niveaux d'isotonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) de créneaux de 350 Hz en fonction de leur durée.

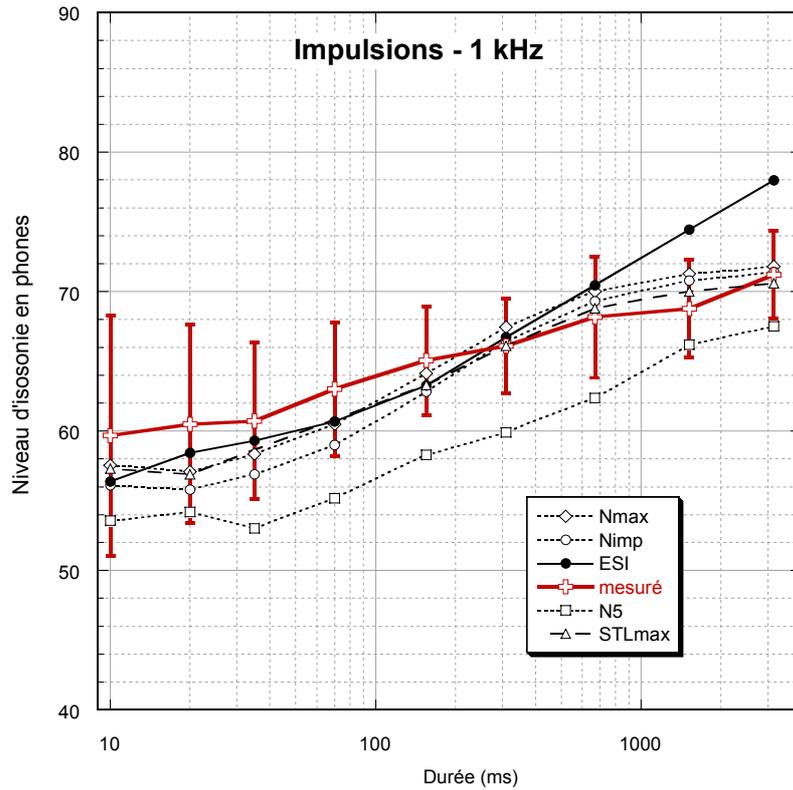


Figure VIII-22 : Niveaux d'isononie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) d'impulsions de 1 kHz en fonction de leur durée.

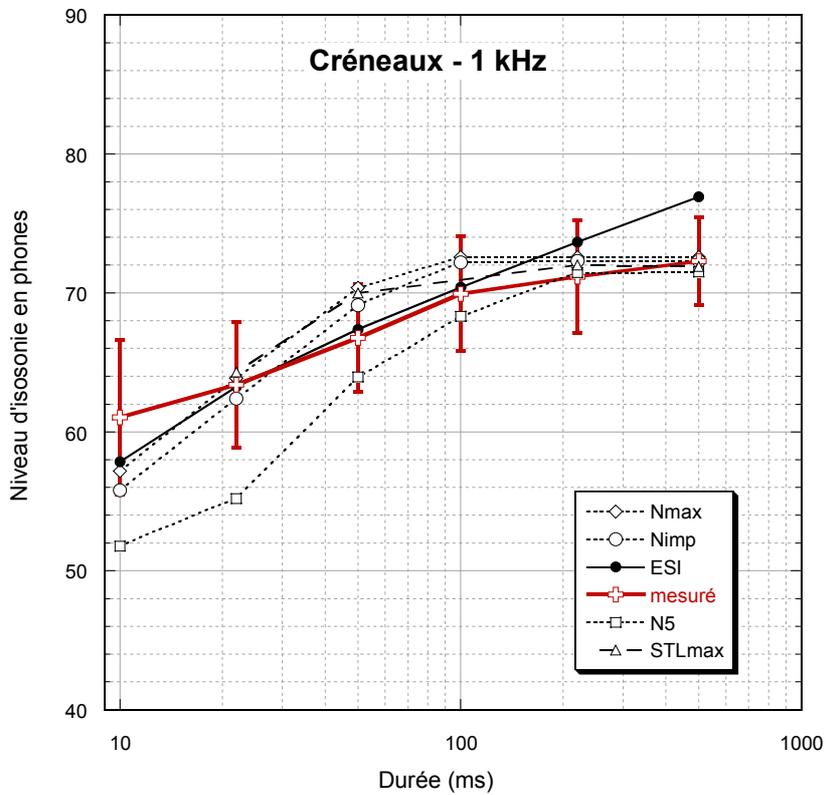


Figure VIII-23 : Niveaux d'isononie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) de créneaux de 1 kHz en fonction de leur durée.

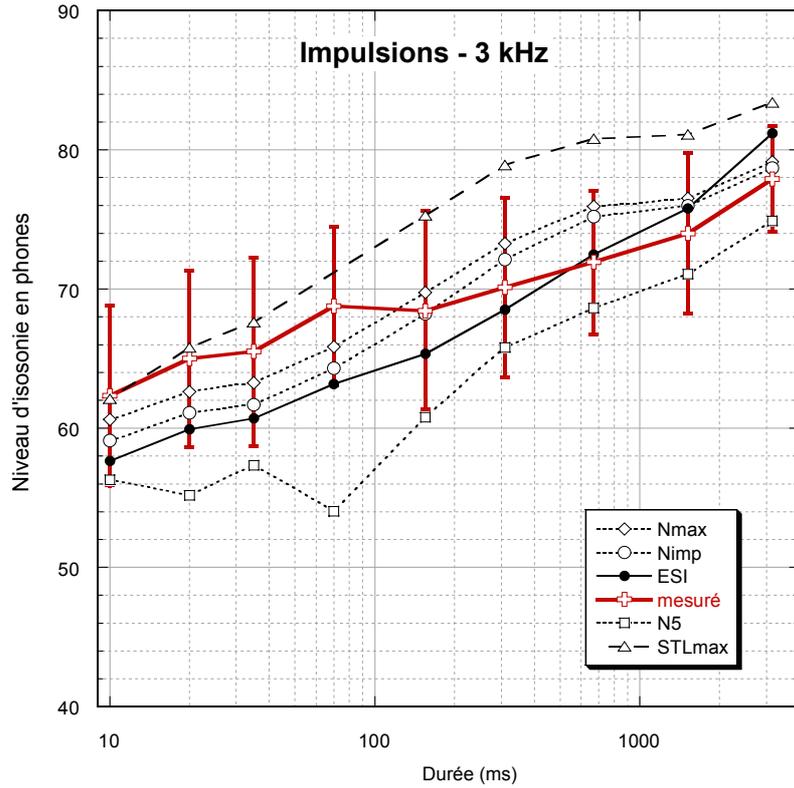


Figure VIII-24 : Niveaux d'isosonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) d'impulsions de 3 kHz en fonction de leur durée.

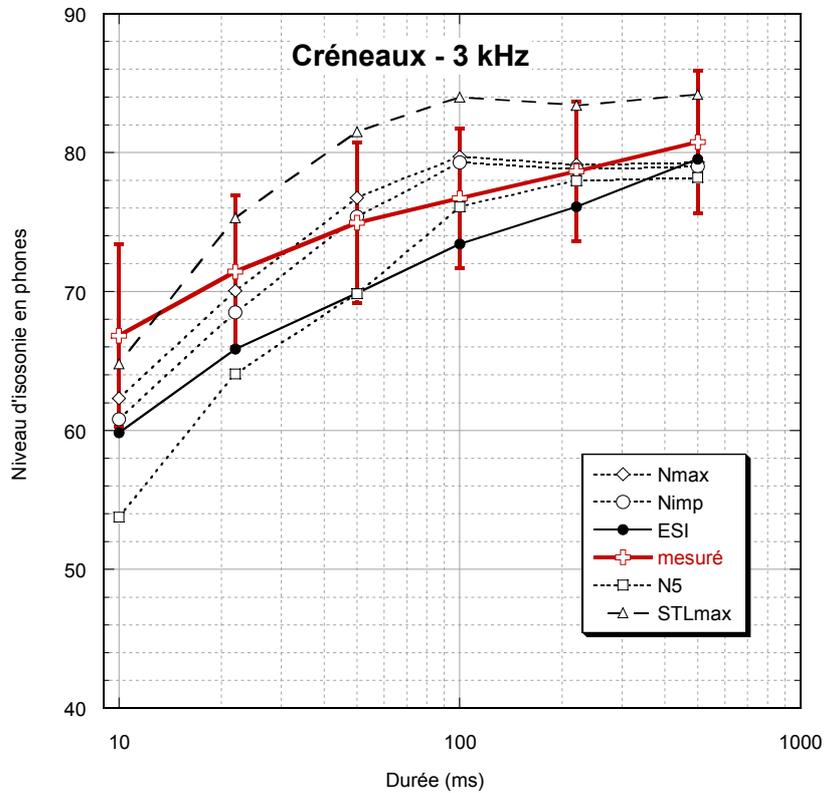


Figure VIII-25 : Niveaux d'isosonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) de créneaux de 3 kHz en fonction de leur durée.

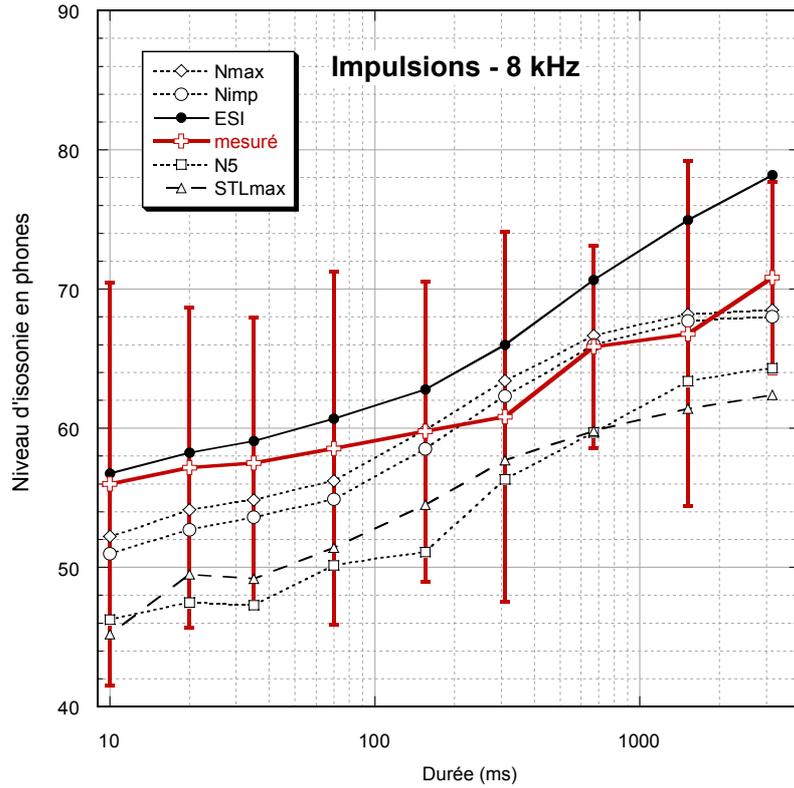


Figure VIII-26 : Niveaux d'isophonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) d'impulsions de 8 kHz en fonction de leur durée.

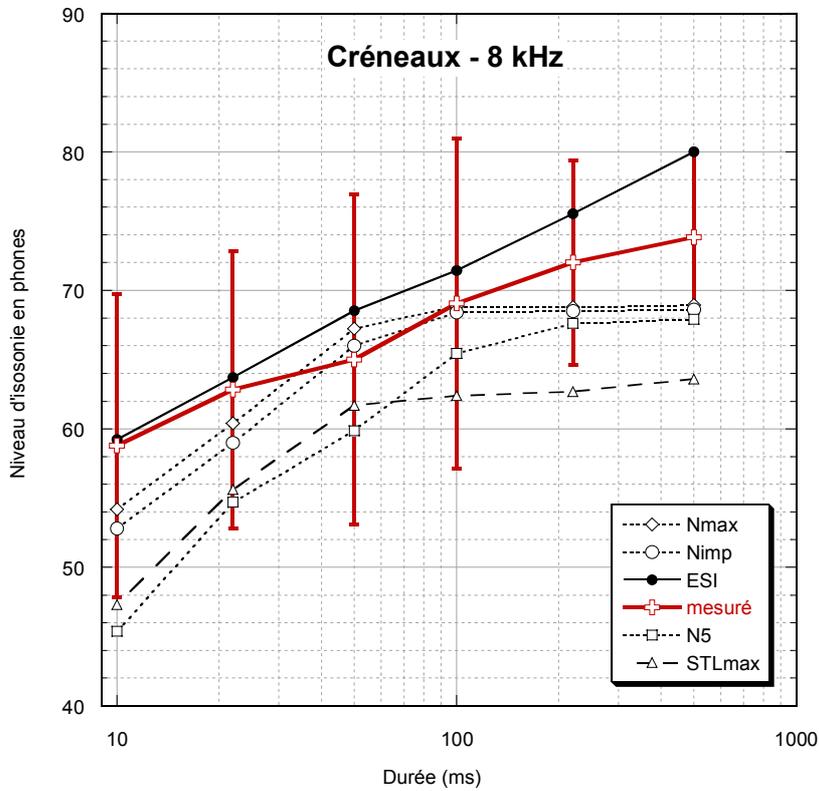


Figure VIII-27 : Niveaux d'isophonie calculés (Nmax, Nimp, ESI, N5 et STLmax) et mesurés (trait épais) de créneaux de 8 kHz en fonction de leur durée.

Créneaux					
MAR	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	1	1	3	4	9
350 Hz	2	2	3	3	4
1 kHz	2	2	4	2	1
3 kHz	2	2	5	4	5
8 kHz	3	3	7	3	7
Moyenne	2	2	4	3	5
Rmax	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	3	2	5	10	12
350 Hz	4	3	6	4	7
1 kHz	4	5	9	5	3
3 kHz	5	6	13	7	7
8 kHz	5	6	13	6	10
Max	5	6	13	10	12
Rmean	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	0	0	-3	4	-9
350 Hz	1	0	-3	0	-4
1 kHz	1	0	-4	1	1
3 kHz	0	-1	-5	-4	4
8 kHz	-2	-3	-7	3	-7
Moyenne	0	-1	-4	1	-3
Rstd	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	2	2	2	3	3
350 Hz	2	2	3	3	2
1 kHz	3	3	4	3	2
3 kHz	3	3	5	2	3
8 kHz	3	3	4	2	3
Moyenne	3	3	4	3	3

Impulsions					
MAR	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	2	2	7	4	8
350 Hz	1	1	7	4	5
1 kHz	2	2	6	3	2
3 kHz	2	3	7	3	5
8 kHz	2	3	7	4	7
Moyenne	2	2	7	4	5
Rmax	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	2	4	14	8	14
350 Hz	2	3	10	6	7
1 kHz	3	5	8	7	4
3 kHz	4	4	15	6	9
8 kHz	4	5	10	8	11
Max	4	5	15	8	14
Rmean	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	0	-1	-7	2	-8
350 Hz	0	-1	-7	-2	-5
1 kHz	-1	-2	-6	0	-1
3 kHz	0	-1	-7	-2	5
8 kHz	-1	-2	-7	4	-7
Moyenne	-1	-1	-7	1	-3
Rstd	Nmax	Nimp	N5	ESI	STLmax
125 Hz	2	2	3	5	3
350 Hz	1	2	2	4	1
1 kHz	2	2	2	4	2
3 kHz	3	3	4	3	4
8 kHz	2	2	2	3	2
Moyenne	2	2	3	4	2

Tableau VIII-2 : Récapitulatifs des indices proposés (définis au chapitre III) afin de pouvoir évaluer l'efficacité des modèles de sonie concernant l'intégration temporelle de créneaux et d'impulsions pour diverses fréquences. A gauche les indices concernant les créneaux et à droite les impulsions.

D'après les valeurs du tableau VIII-2, les écarts entre les niveaux d'isotonie calculée et mesurés, pour chaque fréquence, sont équivalents entre les créneaux et les impulsions.

On observe tout de même que le N5 présente des écarts plus importants pour les impulsions (MAR moyen de 7 phones pour les impulsions et de 4 phones pour les créneaux). De plus, le N5 donne des écarts le plus souvent au-dessous du niveau d'isotonie mesuré ($R_{mean} < 0$) mais pas de manière systématique ($R_{std} \geq 2$).

Il ressort des figures VIII-18 à VIII-27 et du tableau VIII-2, que le Zwicker 1999 (Nmax et le Nimp), quel que soit le signal (créneau ou impulsion) et la fréquence, donnent en moyenne à moins de 2 phones près le niveau d'isotonie mesuré. L'écart maximum pour ces deux indicateurs est de 6 phones, ce qui reste largement acceptable compte tenu de la grande dispersion des

données. Le N_{max} et le N_{imp} , donnent en général (sauf pour les créneaux à 8 kHz) des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux mesurés pour des sons dont les durées sont inférieures à 20 ms. Pour des sons de durées plus longues, ces deux indicateurs ont tendance à surestimer le niveau d'isotonie mesuré. Globalement, le N_{max} donne des écarts répartis uniformément autour du niveau d'isotonie mesuré ($0 < R_{mean} < 1$). Le N_{imp} , quant à lui, a tendance à donner des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux mesurés ($R_{mean} < 0$) mais toujours pas de manière systématique ($R_{std} > 2$).

Le STL_{max} donne un niveau d'isotonie à moins de 2 phones près, par rapport à celui mesuré, uniquement pour les sons de 1 kHz. Le STL_{max} donne des niveaux d'isotonie d'autant plus éloignés de ceux mesurés, que la fréquence de la porteuse des sons brefs est plus éloignée de 1 kHz (voir figures VIII-18 à VIII-27 et tableau VIII-2). En effet, pour les créneaux et les impulsions à des fréquences dont le seuil d'audition est supérieur à celui à 1 kHz (125 Hz, 350 Hz et 8 kHz), le STL_{max} donne un niveau d'isotonie le plus souvent au-dessous de celui mesuré ($R_{mean} < 0$), mais pas avec un biais systématique ($R_{std} \geq 2$). Pour les fréquences dont le seuil d'audition est inférieur à celui de 1 kHz, le STL_{max} surestime le niveau d'isotonie mesuré.

On observe, à partir de ces résultats, que **l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) donne un niveau d'isotonie en moyenne à moins de 4 phones de celui mesuré**. Les écarts les plus grands entre le niveau d'isotonie calculé et mesuré sont obtenus pour des sons à basses et hautes fréquences (10 et 8 phones), de durée supérieure à 1 seconde pour les impulsions et à 200 ms pour les créneaux. Rappelons encore une fois que cet estimateur a été créé pour des sons de très courtes durées. Donc, dans le domaine d'application pour lequel il est prévu, **il est aussi performant que d'autres indicateurs tels que le N_{max} et le N_{imp} sur ce type de sons**. De plus, les valeurs du tableau VIII-2 permettent de montrer que l'estimateur ESI donne des niveaux soit au-dessous, soit au-dessus de ceux mesurés et ne comportent pas de biais systématique ($R_{std} \geq 2$).

Globalement, nous constatons les limites de certains indicateurs, tels le N_5 et le STL_{max} , pour calculer le niveau d'isotonie d'un son bref. Notons tout de même que ces indicateurs sont préconisés par les auteurs pour estimer le niveau d'isotonie de sons variant dans le temps. Il ressort aussi que le N_{max} ou le N_{imp} sont de bons indicateurs pour calculer le niveau d'isotonie de créneaux et d'impulsions dont les structures fines sont des sons purs ($MAR = 2$ phones). Les écarts maximum sont compris entre 4 et 6 phones. En ce qui concerne l'estimateur ESI, celui-ci donne d'aussi bons résultats ($MAR = 3$ et 4 phones) que le N_{max} et le N_{imp} , pour ce type de sons brefs.

Il est intéressant, à présent, de comparer les niveaux d'isotonie calculés et mesurés de signaux de synthèse plus complexes et de sons naturels.

VIII-2.3 Domaine d'application des modèles de sonie en fonction du type de sons

Notre objectif est à présent de tester les modèles de sonie et l'estimateur ESI sur des sons plus complexes que ceux étudiés jusqu'alors. Pour cela, nous avons repris les données expérimentales obtenues au chapitre V. Les sons testés ont été décrits au paragraphe V-2-1.1, il s'agissait de sons impulsionnels, de sons stationnaires et de trains d'impulsions, naturels et synthétiques. Nous avons donc choisi de comparer les données des modèles et de l'estimateur ESI aux niveaux d'isotonie mesurés par la méthode d'ajustement. On rappelle que quatorze auditeurs ont participé aux tests.

Les figures VIII-28, VIII-29 et VIII-30 représentent les niveaux d'isotonie mesurés et calculés respectivement pour des sons stationnaires, des sons impulsionnels et des trains d'impulsions. Nous avons relié les points expérimentaux par des segments pour une meilleure visibilité des différences entre les modèles. Les segments verticaux représentent les écarts types des mesures.

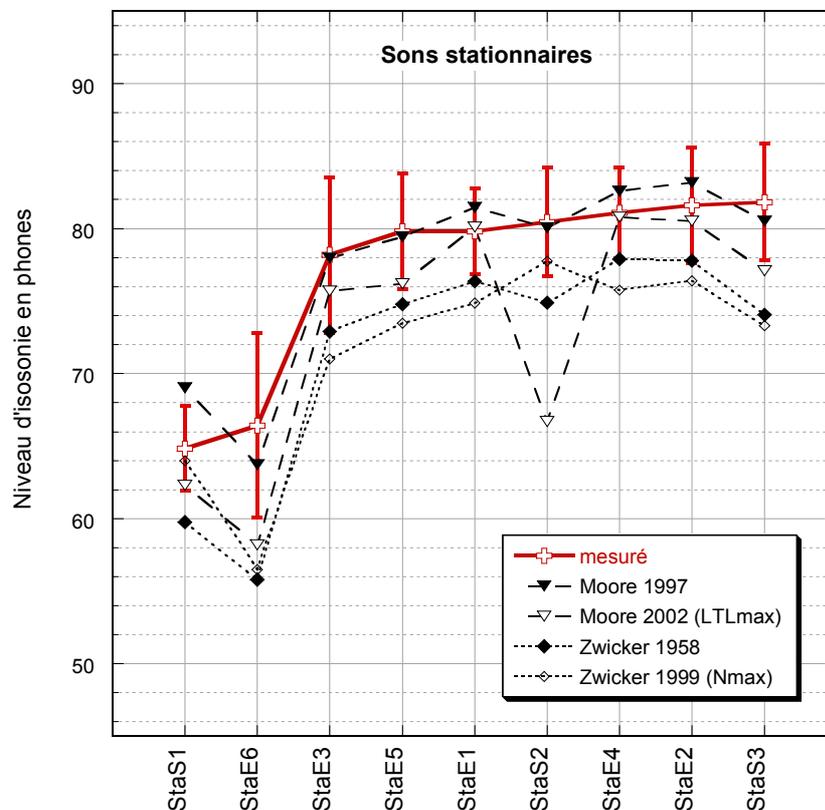


Figure VIII-28 : Niveaux d'isotonie en phones de sons stationnaires mesurés et calculés par le modèle de Moore 1997, le modèle de Moore 2002 (LTLmax), le modèle de Zwicker 1958 et le modèle de Zwicker 1999 (Nmax).

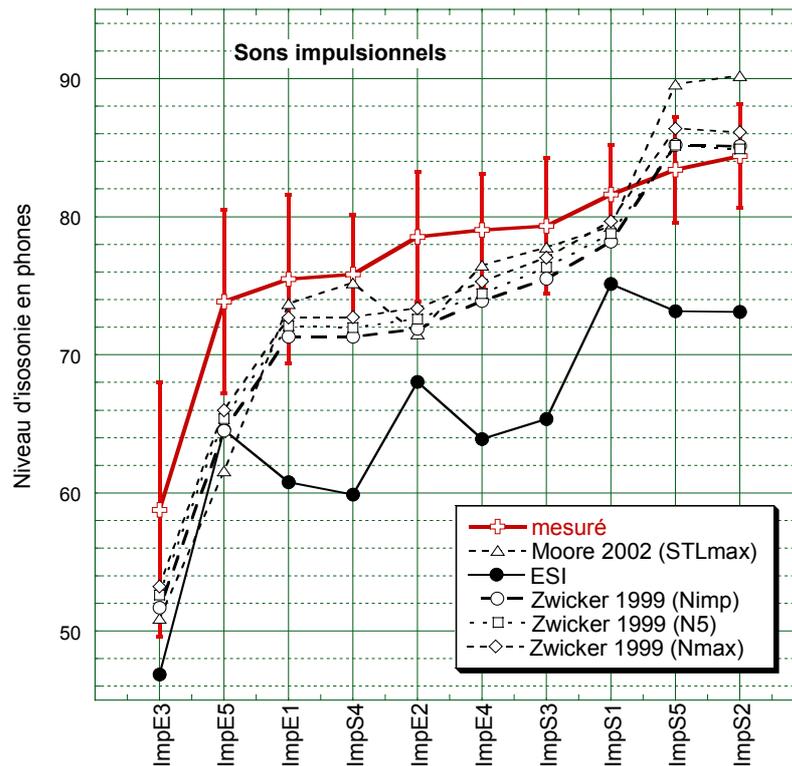


Figure VIII-29 : Niveaux d'isonie en phones de sons impulsionnels mesurés et calculés par le modèle de Moore 2002 (STLmax), l'estimateur ESI et le modèle de Zwicker 1999 (Nimp, N5 et Nmax).

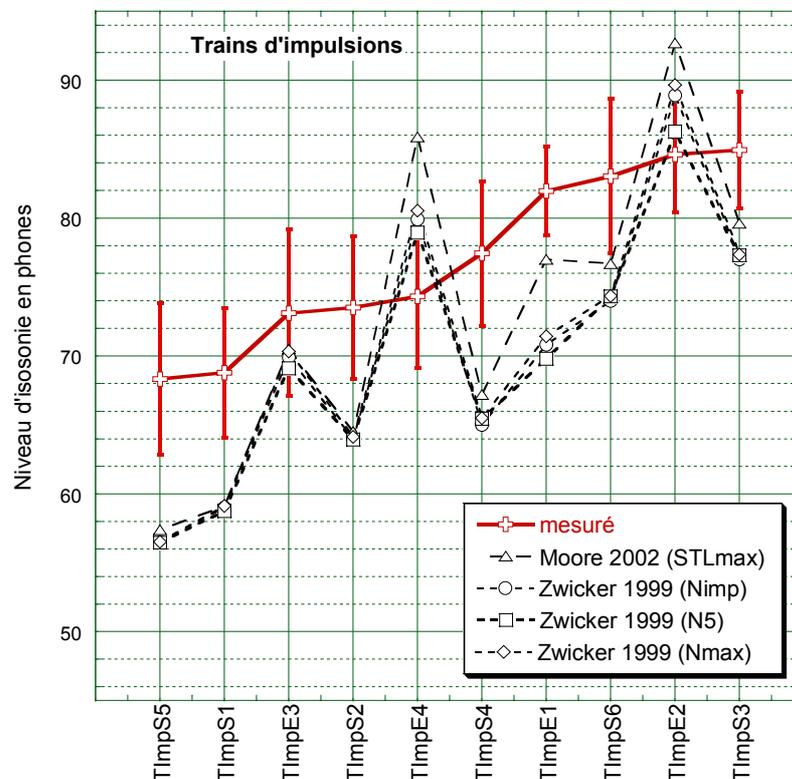


Figure VIII-30 : Niveaux d'isonie en phones des trains d'impulsions mesurés et calculés par le modèle de Moore 2002 (STLmax) et le modèle de Zwicker 1999 (Nimp, N5 et Nmax).

Le tableau VIII-3 récapitule les indices permettant de quantifier les écarts entre les niveaux d'isotonie calculés et mesurés en ce qui concerne les sons stationnaires.

MAR	Stationnaire	Impulsionnel	Train d'impulsions	Moyenne
Zwicker 1958	5			5
Zwicker 1999 (Nmax)	6	4	8	6
Zwicker 1999 (Nimp)	6	5	8	6
Zwicker 1999 (N5)	6	4	8	6
Moore et Glasberg 1997	2			2
ESI		12		10,5
Glasberg et Moore 2002 (STLmax)	4	7	8	6
Rmax	Stationnaire	Impulsionnel	Train d'impulsions	Maximum
Zwicker 1958	11			11
Zwicker 1999 (Nmax)	10	8	12	12
Zwicker 1999 (Nimp)	10	9	12	12
Zwicker 1999 (N5)	10	8	12	12
Moore et Glasberg 1997	4			4
ESI		16		16
Glasberg et Moore 2002 (STLmax)	14	12	12	14
Rmean	Stationnaire	Impulsionnel	Train d'impulsions	Moyenne
Zwicker 1958	-5			-5
Zwicker 1999 (Nmax)	-6	-2	-6	
Zwicker 1999 (Nimp)	-6	-3	-7	
Zwicker 1999 (N5)	-6	-3	-7	-5
Moore et Glasberg 1997	0			0
ESI		-10		-9,5
Glasberg et Moore 2002 (STLmax)	-3	-1	-4	-3
Rstd	Stationnaire	Impulsionnel	Train d'impulsions	Moyenne
Zwicker 1958	2			2
Zwicker 1999 (Nmax)	3	4	7	5
Zwicker 1999 (Nimp)	3	5	7	3
Zwicker 1999 (N5)	2	4	6	4
Moore 1997	2			3
ESI		8		6
Moore 2002(STLmax)	5	6	8	6

Tableau VIII-3 : Récapitulatifs des indices afin de pouvoir évaluer l'efficacité des modèles de sonie concernant des données sur des sons stationnaires, impulsionnels et des trains d'impulsions complexes.

De manière générale, les modèles ont tendance à donner des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux mesurés ($R_{mean} < 0$) à l'exception du modèle de Moore (1997) pour les sons stationnaires et pour qui les niveaux d'isotonie sont répartis uniformément autour de ceux mesurés ($R_{mean} = 0$). On ne constate pas non plus de biais systématique ($R_{std} \geq 2$) sur l'ensemble des résultats.

En ce qui concerne les sons stationnaires, le modèle de Zwicker (1958) sous-estime en moyenne de 5 phones le niveau d'isotonie mesuré. C'est le modèle de Moore (1997) qui donne les niveaux d'isotonie les plus proches de ceux mesurés pour les sons stationnaires ($MAR = 2$ phones et $R_{max} = 4$ phones). Comme dans le chapitre III, on observe que le modèle de Zwicker (1958) donne des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux donnés par le modèle de Moore (1997). Par contre, dans le chapitre III, le modèle de Zwicker (1958) donnait des niveaux d'isotonie plus proches de ceux mesurés que le modèle de Moore (1997). Les sons étudiés et le groupe

d'auditeurs étaient différents de ceux de cette étude, ce qui peut expliquer cette légère différence dans la précision des modèles par rapport aux mesures.

Les modèles prévus pour les sons non stationnaires (N_{max} et STL_{max}) donnent des écarts moyens, par rapport aux mesures du niveau d'isotonie mesuré, compris entre 4 et 6 phonses et des écarts maximum de 10 à 14 phonses. Pour les sons étudiés ici, non seulement ces modèles donnent des niveaux d'isotonie éloignés de ceux mesurés mais ils ne rejoignent pas non plus les niveaux d'isotonie calculés par les modèles prévus pour les sons stationnaires.

Pour les sons impulsionnels, c'est le modèle de Zwicker 1999 qui donne les écarts les plus faibles par rapport aux niveaux d'isotonie mesurés ($M_{ar} = 4$ phonses et $R_{max} = 8$ phonses). Le modèle de Moore 2002 (STL_{max}) donne des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux mesurés pour des niveaux d'isotonie faibles et supérieurs pour des niveaux d'isotonie élevés. L'estimateur ESI donne des niveaux d'isotonie toujours inférieurs à ceux mesurés. Il semble sous-estimer d'avantage les niveaux d'isotonie mesurés pour des niveaux élevés. Ce résultat a aussi été observé lors de la comparaison des modèles sur les résultats des lignes isotoniques de sons impulsionnels. Il est important de souligner ici que l'estimateur ESI a été ajusté sur un nombre d'échantillons sonores limité, obtenus avec une méthode d'estimation directe. Nous avons vu dans le chapitre V, que cette méthode avait tendance à donner des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux obtenus par la méthode d'ajustement. Ceci peut donc expliquer que l'estimateur ESI donne, pour ces données, des niveaux d'isotonie inférieurs à ceux mesurés par la méthode d'ajustement.

Enfin, en ce qui concerne les trains d'impulsion, même si tous les modèles donnent des valeurs équivalentes, aucun ne donne des niveaux d'isotonie proches de ceux mesurés (M_{AR} de l'ordre de 8 phonses et R_{max} de 12 phonses).

Pour notre corpus de sons (stationnaires, impulsionnels et trains d'impulsions), les modèles de Zwicker 1999 et de Moore 2002 donnent des niveaux d'isotonie équivalents avec un écart moyen de 6 phonses et un écart maximum de l'ordre de 12 phonses par rapport aux niveaux d'isotonie mesurés. Il est important de souligner les limites de tous les modèles concernant les trains d'impulsions avec des écarts moyens de l'ordre de 8 phonses.

VIII-3 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude du domaine d'application et des limites des modèles de sonie et de l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) sur des données expérimentales de la littérature et acquises durant ce travail de thèse.

Une première limite a été mise en avant dans cette première partie concernant les modèles de Zwicker (1958) et de Zwicker et Fastl (1999). En effet, ces deux modèles, basés sur le même principe, considèrent une valeur de l'excitation identique au sein d'une même bande critique. Il n'y a donc pas d'effet de la fréquence sur le niveau d'isotonie de sons de même niveau de pression et de fréquences différentes comprises dans une même bande critique. On observe un tel palier lorsqu'on trace des lignes isotoniques, en particulier à basse fréquence (en-dessous de 100 Hz, pour le modèle de Zwicker (1958) et en-dessous de 50 Hz pour le modèle de Zwicker et Fastl (1999)). Ces deux modèles auront tendance à donner un niveau d'isotonie plus faible de celui mesuré pour des sons riches en basses fréquences (inférieures à 100 Hz).

Nous constatons, à travers cette étude, que les modèles de sonie de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997), donnent pour des sons stationnaires des niveaux d'isotonie proches de ceux

mesurés. Le modèle de Moore et coll. (1997) semble cependant plus précis en ce qui concerne des sons stationnaires complexes, en particulier ceux riches en basses fréquences.

Nous sommes allés plus loin dans l'étude des limites des modèles en comparant les niveaux d'isonomie calculés aux niveaux d'isonomie mesurés de sons impulsionnels de synthèse mais aussi de sons stationnaires, des trains d'impulsion et des sons impulsionnels naturels.

Tout d'abord, nous avons étudié les limites des modèles sur les lignes isosoniques de sons impulsionnels que nous avons établies. Tous les modèles prévus pour des sons non stationnaires (N_{max} , N_{imp} , STL_{max}) prédisent à moins de 5 phones près le niveau d'isonomie mesuré. On peut tout de même observer que plus le niveau d'isonomie mesuré augmente, plus le niveau d'isonomie calculé est inférieur à ce dernier. Seul l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) présente une déficience pour des fréquences très éloignées de 1 kHz.

Nous avons ensuite, comparé les calculs obtenus par les modèles aux mesures du niveau d'isonomie de créneaux et d'impulsions de 1 kHz dont les durées allaient de 10 millisecondes et 3 secondes. La limite des modèles se situe pour des impulsions de durée supérieures à 300 ms. Pour ces durées, les indicateurs utilisés (N_{max} , N_{imp} , STL_{max}) donnent des valeurs supérieures aux niveaux d'isonomie mesurés de plus de 2 phones. Cela peut paraître faible comme différence, mais pour ce type de son, la dispersion des mesures est inférieure à 2 phones. L'estimateur de sonie d'impulsion ne prédit plus correctement le niveau d'isonomie pour des durées supérieures à 300 ms.

Nous avons, par la suite, étendu notre étude à des sons impulsionnels de durée et de fréquence différentes. Les durées variaient de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes et les fréquences étaient comprises entre 125 Hz et 8 kHz. On a ainsi pu montrer les limites du STL_{max} et du N_5 . En effet, pour ces deux indicateurs, les écarts dépassent 4 phones. Les écarts sont d'autant plus élevés que les fréquences sont plus élevées pour le N_5 . Quant au STL_{max} , il prédit moins bien le niveau de sons impulsionnels de durée variable aux basses (125 Hz) et hautes fréquences (8 kHz).

L'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) prédit assez bien les niveaux d'isonomie mesurés, à moins de 4 phones près en moyenne, de sons dont la durée est inférieure à 300 ms. Les écarts sont d'autant plus grands que les fréquences sont plus éloignées de 1 kHz et que la durée est supérieure à 300 ms pour les créneaux et à 1 s pour les impulsions.

Pour les sons impulsionnels que nous avons testés, il semble que le modèle le mieux adapté au calcul du niveau d'isonomie est le modèle de Zwicker et Fastl (1999). Plus précisément, ce sont les indicateurs N_{max} et N_{imp} qui estiment en moyenne le mieux le niveau d'isonomie mesuré ($MAR=4$ phones). Par contre on notera que l'écart maximum (R_{max}) est de l'ordre d'une dizaine de phones ce qui reste une valeur élevée pour estimer correctement le niveau d'isonomie de tout type de son. Il semble que ces indicateurs soient plus fiables sur des sons de synthèse ($MAR=2$ phones). En effet, sur les expériences comportant des sons réels de l'environnement (stationnaires, non stationnaires et impulsionnels) le MAR moyen s'élève à 7 phones.

Nous avons aussi montré les limites des modèles sur les trains d'impulsions. En effet, pour ce type de son, aucun modèle ne donne un niveau d'isonomie proche de celui mesuré.

Pour résumer, les indicateurs tels que le N_{max} et le N_{imp} , issus du modèle de Zwicker et Fastl (1999), sont en moyenne les plus précis et les plus stables, avec tout de même un R_{max} de 10 phones, pour calculer le niveau d'isonomie de sons stationnaires et impulsionnels.

IX

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche a permis d'étudier non seulement d'un point de vue scientifique la sonie de sons impulsionnels mais aussi, d'un point de vue de la métrologie, les modèles de sonie dans le but de permettre une meilleure utilisation de ceux-ci. Une de nos volontés, et une des difficultés et nouveautés, était de travailler avec des sons impulsionnels « naturels ». Nous nous sommes donc principalement intéressés non seulement à des sons impulsionnels de synthèse mais aussi à des sons impulsionnels de notre environnement sonore. La durée des sons était comprise entre quelques millisecondes et quelques centaines de millisecondes.

Notre démarche a été tout d'abord de synthétiser les données de la littérature concernant la sonie des sons impulsionnels et de montrer les limites des indicateurs actuels pour estimer la sonie de ce type de son (chapitres I, II et III). Une autre étape de la thèse a été de déterminer la forme générale des sons impulsionnels « naturels » d'un point de vue physique. Un autre travail essentiel a été de concevoir un estimateur de sonie pour des sons impulsionnels (chapitre IV). Nous avons alors posé le problème de la méthode de mesure. L'objectif suivant était alors de déterminer la méthode de mesure de la sonie la mieux adaptée selon le type de sons (chapitre V). Pour avancer sur l'étude des modèles, nous avons besoin de données expérimentales sur le niveau d'isotonie d'impulsions que nous avons décrites dans le chapitre IV. Nous avons alors étudié l'influence de la fréquence et de la durée sur la sonie des sons impulsionnels (chapitre VI et VII). Enfin, la dernière partie de la thèse, plus appliquée, a été consacrée à la détermination des domaines d'applications et des limites des différents modèles et estimateur de sonie (chapitre VIII).

L'analyse bibliographique a montré que peu d'études avaient été réalisées sur la sonie des sons impulsionnels. Il en ressort cependant qu'elle dépend essentiellement du niveau, de la durée et du contenu spectral mais aussi de l'énergie et du temps de montée. Une des principales lacunes de ces travaux de recherche est le peu d'études sur des sons impulsionnels naturels. En effet, la plupart des auteurs ont étudié des signaux dont la forme temporelle était des créneaux.

Un autre point important que nous pouvons retenir de ces travaux est une grande disparité dans les résultats. Par exemple, la définition d'un son impulsionnel mais aussi l'influence de la fréquence sur la sonie ou encore la valeur de la durée critique sont encore sujets à études car il n'y a pas d'unanimité dans les résultats. Il semble que cette disparité soit en partie due aux différentes méthodes utilisées pour mesurer la sonie et à la différence des stimuli étudiés.

Nous avons ensuite étudié des signaux naturels que nous avons enregistrés. La grande différence que nous avons pu observer entre ces signaux et ceux de la littérature est l'absence de partie entretenue. En effet, tous les signaux impulsionnels présentaient un temps de montée rapide suivi immédiatement d'une décroissance plus ou moins lente dont la forme était de type exponentiel. Notre étude a donc été réalisée sur ce type de signaux, naturels et de synthèse. Nous avons donc réalisé une régression linéaire sur les valeurs logarithmiques des caractéristiques physiques et du niveau d'isotonie pour définir les meilleures corrélations. Ainsi, sur ce type de signaux, nous avons montré que la sonie (S) dépend essentiellement de l'énergie (E) comme pour les sons stationnaires ($S=kE^{0,3}$).

Nous avons aussi montré qu'un autre paramètre intervient pour des sons de même énergie, c'est le temps de descente. L'influence du temps de descente est plus marquée pour des sons de niveaux peu élevés (niveaux crêtes inférieurs à 70 dB SPL) et pour des bandes de bruit. La relation entre la sonie et le temps est de la même forme qu'entre la sonie et l'énergie. En effet, Meunier et Rabau (2002) ont montré qu'une fonction puissance liait le temps de descente à la sonie ($S=KTd^{0,1}$). Ils ont aussi montré que ce coefficient diminue de moitié pour une augmentation du niveau de 15 dB.

Nous avons alors tenu compte dans notre estimateur de sonie pour les sons impulsionnels non seulement de l'énergie mais aussi du temps de descente. On obtient ainsi une très bonne corrélation entre la sonie calculée par notre estimateur et la sonie mesurée ($R=0,89$).

Un autre aspect essentiel de la thèse a été de déterminer la méthode de mesure du niveau d'isotonie la mieux adaptée selon le type de son étudié et en particulier pour les sons impulsionnels. Nous avons donc choisi d'étudier quatre méthodes de mesure de la sonie faisant partie des plus utilisées. Il s'agissait d'une méthode de mesure de la sonie, l'estimation directe sans référence, et de trois méthodes de mesure du niveau d'isotonie, la méthode d'ajustement, une méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles et une méthode adaptative à poursuites multiples. Ces méthodes ont été testées sur trois types de sons, des sons stationnaires, des sons impulsionnels et des trains d'impulsions.

La méthode d'ajustement présente le meilleur compromis entre durée du test et précision attendue. En effet, pour des écarts types équivalents cette méthode dure quatre fois moins longtemps que la méthode adaptative simple et à poursuites multiples. Les écarts types obtenus sont de l'ordre de 3 phones pour les sons stationnaires, 5 phones pour les sons impulsionnels et 4 phones pour les trains d'impulsions. Nous avons aussi déterminé la variabilité intra-individuelle qui est de 2 phones en moyenne.

Notons aussi que la méthode d'estimation directe est une méthode fiable qui permet de calculer rapidement le niveau d'isotonie d'un grand nombre de sons avec cependant une grande variabilité (6 phones en moyenne). Les méthodes adaptatives simple et à poursuites multiples ont aussi montré une bonne stabilité des résultats, avec par exemple des écarts types de l'ordre de 3 phones obtenus avec la méthode adaptative à poursuites multiples pour les trains d'impulsions. Mais les durées des tests sont très longues. En effet, ils durent 80 minutes pour dix sons. Un dernier résultat important est que toutes ces méthodes donnent globalement le même niveau d'isotonie même si on peut observer une sous-estimation systématique, mais pas toujours significative, du niveau d'isotonie obtenu avec la méthode d'estimation directe.

Par ailleurs, afin de mieux connaître l'influence de la fréquence sur la sonie, nous avons étudié les lignes isosoniques à 50, 60 et 75 phones de sons impulsionnels de 57 ms. Nous pouvons retenir de ce travail, que les lignes isosoniques ont des formes relativement similaires à celles des sons stationnaires mais le seuil est plus élevé pour les sons impulsionnels, d'environ 10 dB SPL. Une des principales différences se situe dans les basses fréquences. En effet, les lignes isosoniques de sons impulsionnels sont plates en dessous de 500 Hz alors que celles des sons stationnaires (norme ISO R 226, 2003) remontent.

Nous avons aussi étudié les fonctions de sonie de sons impulsionnels de 1 kHz et de durées différentes. Nous avons mis en avant une discontinuité dans la fonction de sonie. Ce résultat est en accord avec ceux de Buus et coll. (1997) obtenus pour des sons brefs en créneaux. En effet, dans notre étude, la pente de la fonction de sonie pour des niveaux crêtes supérieurs à 68 dB SPL est de l'ordre de 0,3. Pour des niveaux crêtes inférieurs à 68 dB SPL la pente de la fonction de sonie est d'autant plus raide que la durée du son impulsionnel est plus courte (0,3 pour un temps de descente (T_d) de 600 ms, 0,4 pour $T_d=200$ ms, et 0,5 pour $T_d=20$ ms). Nous avons aussi montré que les fonctions de sonie de sons impulsionnels étaient moins raides que celles de sons stationnaires.

En plus de la durée, nous avons étudié l'influence de la fréquence sur la fonction de sonie d'un son impulsionnel de 57 ms. Les porteuses étaient de 450 Hz, 1 kHz et 2,9 kHz. De la même manière que pour les sons purs de 1 kHz de différentes durées, les pentes des fonctions de sonie présentent une discontinuité. Nous n'avons cependant pas montré d'influence de la fréquence sur les pentes des fonctions de sonie de ces sons impulsionnels. Les pentes des fonctions de sonie sont de l'ordre de 0,6 pour des niveaux crêtes inférieurs à 68 dB SPL et de l'ordre de 0,4 pour des niveaux crêtes supérieurs à 68 dB SPL.

Nous avons ensuite étudié plus précisément l'influence de la durée sur la sonie de sons impulsionnels et de sons en créneaux d'amplitude constante. Pour des créneaux dont les durées sont comprises entre 10 ms et 500 ms et des impulsions de durées comprises entre 10 ms et 3 s, il n'y a pas d'influence significative de la fréquence sur la variation du niveau d'isotonie avec la durée.

Dans une deuxième expérience, nous avons montré que l'intégration temporelle de sons en créneaux peut être modélisée par une fonction exponentielle du type :

$$L_t = L_{\text{comp}} + 10 \text{Log}(1 - e^{-(t/\tau)})$$

où L_t est le niveau que doit avoir le son de comparaison (son long de 1 s) pour avoir la même sonie que le son test (créneau d'intensité $I(t)$), t représente la durée du stimulus et τ la constante de temps. L_{comp} est le niveau des créneaux dont la durée dépassent la durée critique.

Cela nous a permis de déterminer, **pour les créneaux, une durée critique de l'ordre de 380 ms.**

En ce qui concerne les impulsions que nous avons synthétisées, nous n'avons pas mis en évidence de durée critique. Nous avons cependant montré que l'intégration temporelle, pour des durées comprises entre 70 ms et 3 s, peut être modélisée par une fonction logarithmique de la durée :

$$L_t = k + 10m \text{Log}(t)$$

où L_t est le niveau d'isotonie du son impulsionnel, t est la durée, k est une constante et m la pente de la fonction logarithmique.

L'apport de ce travail a aussi été d'établir, pour des sons impulsionnels de formes « naturelles » et de sons brefs en forme de créneaux, un grand nombre de données expérimentales de niveau d'isotonie. Ces données nous ont permis non seulement de pouvoir comparer les valeurs du niveau d'isotonie obtenu par les différents modèles (Zwicker 1958, Moore 1997, Zwicker 1999 et Moore 2002) et l'estimateur de sonie d'impulsion (ESI) que nous avons mis au point, mais aussi d'étudier leurs domaines d'application.

L'étude des domaines d'application et des limites des modèles et du nouvel estimateur de sonie d'impulsion (ESI) est un travail essentiel, d'un point de vue de la métrologie, pour permettre une meilleure utilisation de ceux-ci selon le type de son étudié.

Pour des sons stationnaires, les modèles de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997) fournissent des niveaux d'isotonie proches de ceux mesurés. On constate toutefois que le modèle de Moore et coll. (1997) est plus précis que celui de Zwicker pour des sons basse et haute fréquences et pour des sons complexes.

Le modèle de Glasberg et Moore (2002) est le seul à avoir été ajusté sur les lignes isotoniques modifiées (ISO 526, 2003). Il a cependant tendance à surestimer de plus de 4 phones le niveau d'isotonie mesuré pour des niveaux élevés de sons stationnaires à basse fréquence. En ce qui concerne les sons impulsionnels, le modèle de Glasberg et Moore (2002) donne de bons résultats pour des sons de 1 kHz. Les écarts par rapport aux niveaux d'isotonie mesurés sont d'autant plus grands que la fréquence du son impulsionnel est plus éloignée de 1 kHz et que les niveaux d'isotonie sont plus élevés. Pour des sons impulsionnels complexes, ce modèle sous-estime les niveaux d'isotonie mesurés faibles et surestime les niveaux d'isotonie élevés.

Nous avons aussi montré que deux indicateurs calculés à partir du niveau d'isotonie en fonction du temps selon le modèle de **Zwicker et Fastl (1999) donnent de bons résultats** avec un MAR moyen de 4 phones. Ces indicateurs sont le niveau d'isotonie maximum (**Nmax**) et un indicateur que nous avons proposé, noté **Nimp**. Ces indicateurs semblent tout de même être mieux adaptés pour des sons non stationnaires de synthèse (MAR = 2 phones) que pour des sons non stationnaires naturels (MAR = 6 phones). L'écart maximum avec les mesures obtenu avec ces indicateurs pour calculer le niveau d'isotonie peut être de 14 ou 15 phones pour les sons impulsionnels, ce qui reste une valeur élevée par rapport aux valeurs de la dispersion des mesures (de l'ordre de 4 phones). Notons tout de même que les écarts les plus importants sont ceux concernant les trains d'impulsions, sons pour lesquels aucun modèle ne donne un niveau d'isotonie proche de celui mesuré. Ces deux indicateurs permettent tout de même une première approximation rapide du niveau d'isotonie de sons stationnaires et impulsionnels.

Enfin, l'estimateur de sonie d'impulsion donne des niveaux d'isophonie proches de ceux mesurés pour des sons dont les durées sont inférieures à 300 ms pour des créneaux et à 1 s pour des impulsions. Il a cependant tendance, pour ces durées, à surestimer les niveaux d'isophonie de sons impulsionnels dont les fréquences sont élevées et à sous-estimer les niveaux d'isophonie élevés. Pour des sons plus complexes, on a vu que l'estimateur ESI, ajusté sur des données expérimentales obtenues avec une méthode d'estimation directe, sous-estime les niveaux d'isophonie obtenus avec la méthode d'ajustement.

Il est encore difficile de calculer systématiquement de manière précise le niveau d'isophonie global de sons non stationnaires et impulsionnels. Nous pensons que le modèle de Glasberg et Moore (2002), utilisant des ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) comme filtres auditifs au lieu de bandes critiques figées, semble mieux adapté au calcul du niveau d'isophonie de sons complexes. Nous avons montré que l'écart entre le niveau d'isophonie calculé et mesuré dépend du niveau des sons. Il serait donc peut être pertinent de tenir compte des différences de pente de la fonction de sonie en fonction du niveau. Enfin, il sera nécessaire de réaliser d'autres mesures du niveau d'isophonie de trains d'impulsions afin d'étudier plus précisément ce type de son.

Ce travail de thèse nous a donné un aperçu général de résultats concernant les lignes isophoniques et les fonctions de sonie de sons impulsionnels ainsi que l'intégration temporelle. Cependant, il manque certaines données pour affiner et confirmer nos conclusions. En effet, en ce qui concerne les lignes isophoniques de sons impulsionnels, il serait intéressant d'avoir plus de données pour des fréquences inférieures à 500 Hz et comprises entre 1 et 2 kHz pour pouvoir confirmer l'allure générale que nous avons obtenue. Ceci permettrait d'ajuster les modèles plus précisément pour les sons impulsionnels. Il serait ensuite intéressant d'établir les fonctions de sonie de sons impulsionnels sur plus de points expérimentaux et plus d'auditeurs pour confirmer la différence de pente entre des niveaux crêtes faibles et élevés. Comparer ces données à des créneaux brefs et des sons stationnaires permettrait aussi de vérifier que les faibles valeurs des pentes des fonctions de sonie ne sont pas dues au groupe d'auditeurs. Enfin, des données supplémentaires sur des impulsions de 1 kHz de durées inférieures à 100 ms permettraient de modéliser l'intégration temporelle de sonie pour des durées très courtes, ce que nous n'avons pu faire dans notre étude.

Ce travail de recherche a reçu le soutien du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable pour continuer notre étude afin de développer dans un premier temps un estimateur stable de sonie de sons impulsionnels et dans un deuxième temps un estimateur de sonie de n'importe quel type de bruit. Nous prévoyons donc dans le cadre de ce projet de poursuivre nos recherches sur la sonie des sons impulsionnels d'un point de vue scientifique et industriel.

RÉFÉRENCES

- Berglund B., "Relationship between loudness and annoyance for ten community sounds", *Environ. Int.*, 16, 523-531, 1990.
- Blommer M., Otto N., Wakefield G., Feng B.J., Jones C., "Calculating the loudness of impulsive sounds", *SAE Transactions*, 1995.
- Boone M. M., "Loudness measurements on pure tone and broad band impulsive sounds", *Acustica* 29, 198-204, 1973.
- Boulet I. et Boussard P., "Pré-étude psychoacoustique sur les bruits de chantier", rapport final IB/RC/1087, ADEME, contrat n°00.04.102, 2001.
- Buus, S., Florentine, M., and Poulsen, T., "Temporal integration of loudness, loudness discrimination, and the form of the loudness function", *J. Acoust. Soc. Am.*, 101, 669-680, 1997.
- Canévet G., *Cours de psychoacoustique*, Marseille, LMA, 2001-2002.
- Canévet G., Teghtsoonian R. et Teghtsoonian M., "A comparison of loudness change in signals that continuously rise or fall in amplitude", *Acustica/Acta Acustica*, 89, 339-345, 2003.
- Canévet, G., Hellman, R., and Scharf, B., "Group estimation of loudness in sound fields", *Acustica* 60, 277-282, 1986.
- Canévet G., Germain R., Marchioni A. et Scharf B., "Adaptation de sonie", *Acustica*, 49, 239-244, 1981.
- Cavé C. et Chocholle R., "Intégration temporelle auditive : effet du niveau sur la durée critique", *Revue d'Acoustique*, n°50, 178-179, 1979.
- Chalupper J. et Fastl H., "Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners", *Acustica*, 88, 378-386, 2002.
- Chocholle R. et Saulnier Ch., "Les lignes isosoniques pour des sons de durée brève : 20 ms", *Revue d'Acoustique*, n°37, 93-97, 1976.
- Cops A. et Myncke H., "Mesures subjectives et objectives du niveau de sonie des signaux sonores impulsifs : un projet de recherche international", *Revue d'Acoustique* n°37, 98-104, 1976.
- Damongeot A., "Etude psycho-acoustique des bruits impulsifs d'hélicoptères", *Revue d'Acoustique* n° 48, 60-69, 1979.
- Ekman G., Berglund B. et Berglund U., "Loudness as a function of the duration of auditory stimulation", *Scan. J. Psy.* 7, 201-208, 1966.

Fastl H. et al., "Contributions to Psychological Acoustics", Results of the Sixth Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, edited by August Schick, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 1993.

Fastl H. et Schmid W., "Comparison of loudness analysis systems", In Proc. inter-noise'97 Vol.II 981-986, 1997

Fastl H., "Evaluation and measurement of perceived average loudness", Fifth Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, Schick A., Hellbrück J. Et Weber R., BIS. Oldenburg, 205-216, 1991.

Fastl H., "The psychoacoustics of sound-quality evaluation", *Acustica* 83, 754-764, 1997.

Fletcher H. et Munson W.A., "Loudness, its definition, measurement and calculation", *J. Acoust. Soc. Am.*, 5, 82-108, 1933.

Florentine M., Buus S. et Poulsen T., "Temporal integration of loudness as a function of level", *J. Acoust. Soc. Am.* 99 (3), 1633-1644, 1996.

Florentine M., Epstein M. et Buus S., "Loudness for long and short tones", *Fechnerday, The Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, 19-23 octobre, Leipzig, Allemagne, 2001.

Gabrielson A. et Sjögren H., "Perceived sound quality of sound-reproducing systems", *J. Acoust. Soc. Am.* 65 (4), 1019-1033, 1979.

Garner W.R., "The loudness and loudness matching of short tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, 21, 398-401, 1949.

Gelfand, S.A., Hearing, "An introduction to psychological and physiological acoustics", Third Edition, Marcel Dekker, Inc., USA, 1998.

Gerken G. M., Bhat V. K. H. et Hutchinson-Clutter M., "Auditory temporal integration and the power function model", *J. Acoust. Soc. Am.* 88 (2), 767-778, 1990.

Gescheider, G.A., *Psychophysics, Method, Theory, and Application*, Second Edition, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, USA, 1985.

Glasberg B. R. et Moore B. C. J., "A model of loudness applicable to time-varying sounds", *J. Audio Eng. Soc.*, 50, n° 5, 331-342, 2002.

Green D. M., Birdsall T.G. et Tanner W.P. Jr., "Signal detection as a function of signal intensity and duration", *J. Acoust. Soc. Am.*, 29, 523-531, 1957.

Gusky R., "Psychological Methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information", *Acustica*, 83, 765-774, 1997.

Gustaffson B., "The loudness of transient sounds as a function of some physical parameters", *J. Sound. Vib.*, 37(3), 389-398, 1974.

- Hellman R.P. et Zwislocki J.J., "Some factors affecting the estimation of loudness", *J. Acoust. Soc. Am.*, 33, 687-694, 1961.
- Hellman R.P. et Zwislocki J.J., "Monaural loudness function at 1000 cps and interaural summation", *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, 856-865, 1963.
- ISO 532 B, "Méthode de calcul du niveau d'isotonie", norme internationale, 1975.
- ISO R 226, "Lignes isotoniques normales pour sons purs écoutés en champ libre et seuil d'audition binaurculaire en champ libre", 1961.
- ISO 226, "Normal equal loudness level contours for pure tones under free-field listening conditions", 1987.
- ISO 1996/1-1982 (F), "Acoustique - Caractérisation et mesurage du bruit de l'environnement – Partie 1 : Grandeurs et méthodes fondamentales", 1996.
- ISO 226, "Normal equal loudness level contours", 2003.
- Jestead, W., "An adaptative procedure for subjective judgements", *Percept. Psychophys.* 28, 85-88, 1980.
- Kato T., Namba S. et Kuwano S., "A measurement of equal loudness contour of impulsive sounds by magnitude estimation", *J. Acoust. Soc. Jpn. (J)*, 27, 21-32, 1993.
- Kuwano S. et Namba S., "Continuous judgement of level-fluctuating sounds and the relationship between overall loudness and instantaneous loudness", *Psychology Research*, 47, 27-37, 1985.
- Levitt H., "Transformed up-down procedures in psychoacoustics", *J. Acoust. Soc. Am.* 49, 467-477, 1971.
- Lévy-Leboyer C., "12 ans de recherches sur la gêne due au bruit. Bilan des recherches françaises et étrangères 1976-1997", Institut de Recherches et d'Applications en Psychologie du Travail, rapport, 1988.
- Liénard P., "Décibels et indices de bruits", Masson et Cie, 1974.
- Marvit P., Florentine M. et Buus S., "A comparison of psychophysical procedures for level-discrimination thresholds", *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (6), 3348-3361, 2003.
- Masaoka K., Ono K. et Komiyama S., "A measurement of equal-loudness level contours for tone burst", *Acoust. Sci. & Tech.*, 22(1), 35-39, 2001.
- Mathias M., "La pratique de l'acoustique dans le bâtiment", Centre d'assistance technique et de documentation, Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics.
- Meunier S. et Marchioni A., "Relations entre les caractéristiques physiques et les attributs subjectifs des signaux acoustiques", rapport final, Programme interdisciplinaire de recherche sur la ville, 1998.

- Meunier S. et Rabau G., "How does the loudness of impulsive sounds depends on energy and duration", Proceedings of the Forum Acusticum Sevilla 2002, Séville, Espagne, 16-20 septembre 2002.
- Miller G.A., "The perception of short bursts of noise", J. Acoust. Soc. Am., 20, 160-170, 1948.
- Moore B. C. J. et Glasberg B. R., "Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns", J. Acoust. Soc. Am., 74, 750-753, 1983.
- Moore B. C. J. et Glasberg B. R., "A revision of Zwicker's loudness model", Acustica, Vol. 82, 335-345, 1996.
- Moore B. C. J., Glasberg B. R. et Baer T., "A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness", J. Audio Eng. Soc, Vol.45, n°4, 224-240, 1997.
- NF S31-010, "Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement", 1996.
- Niese H., "Die Trägheit der Lautstärkebildung in Abhängigkeit vom Schallpegel", Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 68, 143-152, 1959.
- Ohta K., Kuwano S. et Namba S., "Sound quality of impulsive sounds in relation to their physical properties", Technoloy Reports Of The Osaka University, 49, n° 2360, 189-199, 1999.
- Parizet E., Deumier S. et Milland E., "Car road noise annoyance : Significant timbre parameters and inter-individual variability", Acustica – acta acustica, 82, Suppl. 1, S 216, 1996.
- Pedersen O. J., Lyregaard P. E. et Poulsen T. E., "The round robin test on evaluation of loudness level of impulsive noise", Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report n°22, 1977.
- Plomp R. et Bouman M.A., "Relation between hearing threshold and duration for tones pulses", J. Acoust. Soc. Am., 31, 749-758, 1959.
- Port E., "Über die Lautstärke einzelner kurzer Schallimpulse", Acustica, 13, 212-223, 1963.
- Poulsen T. et Han L.A., "The binaural free field hearing threshold for pure tones from 125 Hz to 16 kHz", Acust. Acta Acust., 86, 333-337, 2000.
- Reichardt W., "Zur Trägheit der Lautstärkebildung", Acustica, 15, 345-354, 1965.
- Reichardt W., "Subjective and objective measurement of the loudness level of single and repeated impulses", J. Acoust. Soc. Am., 47(6), part 2, 1557-1562, 1970.
- Reichardt W. et Niese H., "Choice of sound duration and silent intervals for test and comparison signals in the subjective measurement of loudness level", J. Acoust. Soc. Am., 47, 1083-1090, 1970.
- Robinson D.W. et Dadson R.S., "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones", Brit. J. Appl. Phys., 7, 166-181, 1956.

Ross R., Coles A., Garinther G.R., Hodge D.C. et Rice C.G., "Hazardous exposure to impulse noise", *J. Acoust. Soc. Am.*, 43(2), 336-343, 1968.

Rumeau M., "Contribution à la caractérisation physique de bruits impulsionnels sur la base d'expertises effectuées par le laboratoire central de la préfecture de police", Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Technologie de Compiègne, 1980.

Scharf B., "Loudness summation under masking", *J. Acoust. Soc. Am.*, 33, 503-511, 1961.

Scharf B., "Loudness", in *Handbook of perception*, edited by E. C. Carterette and M. P. Friedman, Academic Press New York, 187-242, 1978.

Scharf B. et Buus S., "Stimulus, Physiology, Thresholds", in *Handbook of perception and Human Performance Vol. I*, edited by Boff K. R., Kaufman L. And Thomas J. P., Academic Press New York, 1986.

Scharf B. et Houtsma A. J. M., "Loudness", in *Handbook of perception and Human Performance Vol. I*, edited by Boff K. R., Kaufman L. And Thomas J. P., Academic Press New York, 1986.

Schlauch, R. S. et Wier, C.C., "A method for relating loudness matching and intensity-discrimination data", *J. Speech Hear. Res.* 30, 13-20, 1987.

Small A. M., Brandt J. F. et Cox. P. G., "Loudness as a function of signal duration", *J. Acoust. Soc. Am.* 34, 513-514, 1962.

Stephens S. D. G., "Methodological factors influencing loudness of short duration sounds", *J. Sound Vib.* 37(2), 235-246, 1974.

Stevens S.S., "The measurement of loudness", *J. Acoust. Soc. Am.*, 27, 815-820, 1955.

Stevens S.S., "Calculation of the loudness of complex noise", *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 807-832, 1956.

Stevens S.S., "The direct estimation of sensory magnitudes", *Loudness, Am. J. Psychol.*, 69, 1-25, 1956.

Stevens S.S., "Concerning the form of the loudness function", *J. Acoust. Soc. Am.*, 29, 603-606, 1957.

Susini P., "Perception évolutive et globale de sons non stationnaires", Thèse de doctorat de l'Université du Maine, spécialité Acoustique, 1999.

Susini P. et McAdams S., "Psychophysical validation of a proprioceptive device by cross-modal matching of loudness", *Acta Acustica*, 86, 515-525, 2000.

Susini P., McAdams S. et Smith B. K., "Global and continuous loudness estimation of time-varying levels", *Acustica/Acta Acustica*, 88, 536-548, 2002.

Suzuki Y. et Takeshima H., "Equal-loudness-level contours for pure tones", *J. Acoust. Soc. Am.* 116 (2), 918-933, 2004.

Takehima H., Susuki Y. et Kono S., "Growth of loudness of a tone burst with a duration up to 10 seconds", J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 9, n° 6, 295-300, 1988.

Vigran E., Gjaevenes K. et Arnesen G., Two experiments concerning rise time and loudness, J. Acoust. Soc. Am., 36(8), 1468-1470, 1964.

Watson C. S. et Gengel R. W., Signal duration and signal frequency in relation to auditory sensitivity, J. Acoust. Soc. Am. 46 (4), 989-997, 1969.

Weber R., "The continuous loudness judgement of temporally variable sounds with an "analog" category procedure", in Proc. Of 5th Oldenburg Symp. On Psycholog. Ac., 267-294, 1991.

Zölzer U., "Digital audio signal processing", John Wiley et Son Ltd, 1997.

Zwicker E., "Übe psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit, Acustica", Vol. 8, 237-258, 1958.

Zwicker E., "Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 62, n°3, p 675-682, 1977.

Zwicker E., "Dependence of post-masking on masker duration and its relation to temporal effects in loudness", J. Acoust. Soc. Am., 75(1), p 219-223, 1984.

Zwicker E., Deuter K. et Peisl W., "Loudness meters based on ISO 532 B with large dynamic range", Inter'Noise 85, Proceedings 1985 International Conference on Noise Control Engineering, 1985.

Zwicker E. et Fastl H., "Psychoacoustics: Facts and models", 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1999.

Zwicker E., Fastl H. et Dallmayr C., "BASIC-program for calculating the loudness of sounds from their 1/3-oct. band spectra according to ISO 532B", Acustica 55, 63-67, 1984.

Zwicker E. et Feldtkeller R., "Psychoacoustique", Masson, Paris, 1981.

ANNEXE I : VALORISATION DE LA THESE

Les travaux de cette thèse ont conduit GENESIS à implanter, dans le logiciel d'expertise acoustique LEA qu'elle développe, un module psychoacoustique incluant une première version de l'estimateur de sonie pour des sons impulsionnels.

Ce logiciel, destiné à l'analyse de signaux acoustiques et au design sonore industriel, dispose de fonctions classiques d'analyse temporelle et fréquentielle des signaux. Il propose de plus des fonctions innovantes d'analyse et de sculpture de représentations temps-fréquences qui ont été développées en collaboration avec le CNRS-LATP (Laboratoire d'analyse, topologie et probabilités).

Comme le montre la figure 1, la conception s'appuie sur une collaboration représentée, pour le module psychoacoustique et dans le cadre de ma thèse, par le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique.



Figure A2-1 : fenêtre « à propos » de LEA

La figure 2 donne un aperçu de l'intégration du module psychoacoustique dans LEA. On peut voir le calcul des décibels et des décibels pondérés, souvent considérés dans le monde industriel comme une première approximation de l'intensité perceptive d'un son. On distingue aussi la courbe de sonie en fonction du temps que l'implémentation du modèle de Zwicker et Fastl permet d'obtenir. On accède aussi aux attributs de la courbe de sonie en fonction du temps : N5, N10 et maximum. Enfin, une première version de notre algorithme d'estimation de la sonie d'un son impulsionnel est présente dans le module.

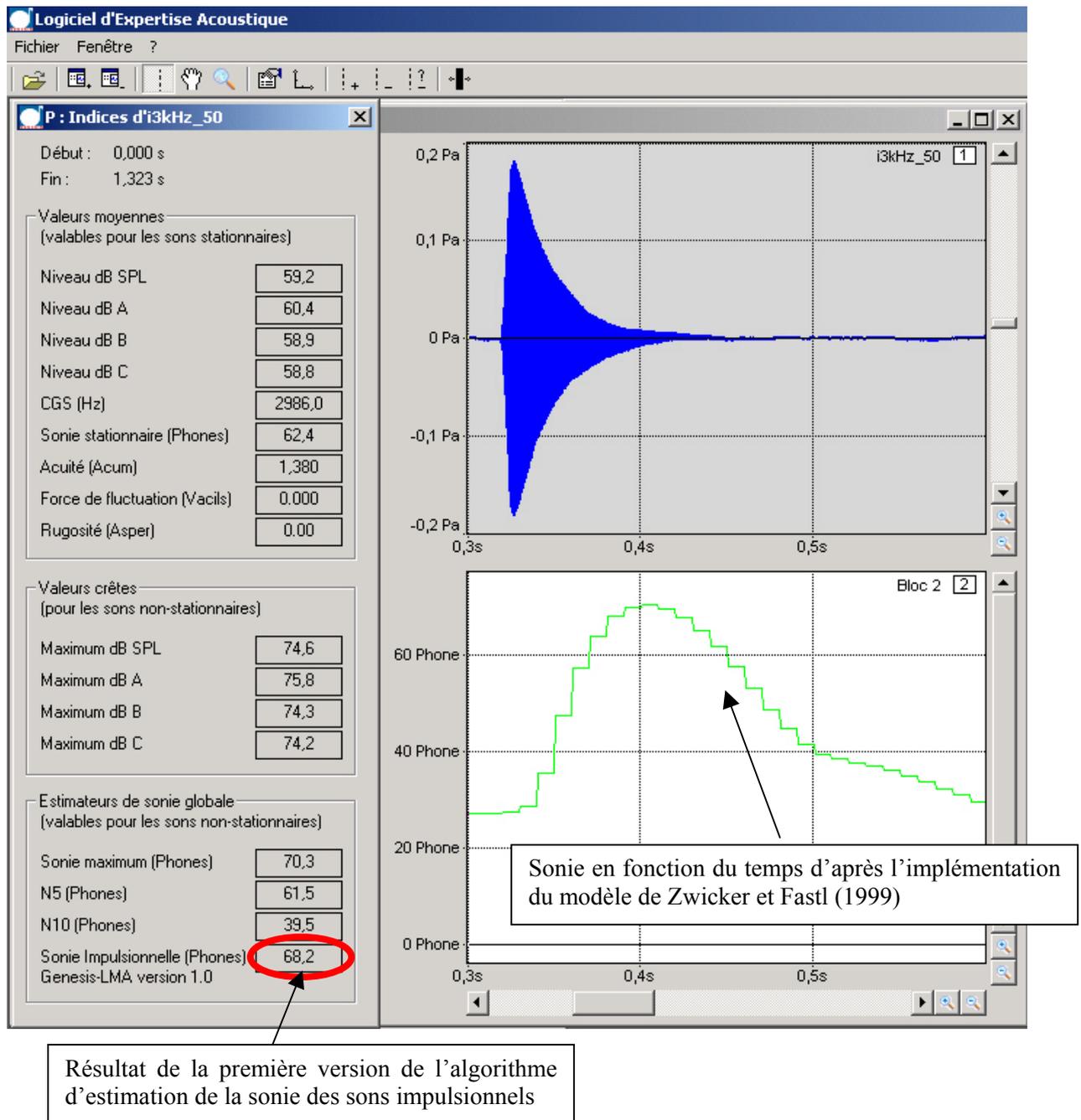


Figure AII-2 : aperçu du module psychoacoustique de LEA

ANNEXE II : PUBLICATIONS PERSONNELLES

Marozeau J., Boulet I., Meunier S., Gagneux F. et Boussard P., *Evaluation d'estimateurs de sonie*, Acoustique & Techniques n°39, p 27-34, 2005.

Boulet I., Marozeau J. et Meunier S., *Temporal summation of loudness as a function of frequency and temporal pattern*, 33rd International Congress and Exposition on noise control engineering (Internoise), Prague, République Tchèque, 22-25 aout 2004.

Boulet I., *Comparison between four methods of loudness estimation of stationary and non-stationary sounds*, 7^{ème} Congrès Français d'Acoustique (CFA) et 30^{ème} Congrès de la Société Allemande d'Acoustique (DAGA), Strasbourg, France, 22-25 mars 2004.

Boulet I. et Rabau G., *Gêne des bruits de chantier : approche psychoacoustique*, 6^{ème} Congrès Français d'Acoustique (CFA), Lille, France, 8-11 avril 2002.

Boussard P. et Boulet I., *Simulation et perception des environnements sonores : comparaison des techniques de reproduction et influence de la sonie*, Acoustique & Techniques n°26, p 26-29, 2001.

Meunier S., Boulet I. et Rabau G., *Loudness of impulsive sound*, actes du 17th International Congress on Acoustics (ICA), Rome, Italie, 2-7 septembre 2001.

Boulet I. et Boussard P., *Etude d'expertise pour le calcul de descripteurs psychoacoustiques*, rapport IB/RC/1294, , 01 dB, 2001.

Boulet I. et Boussard P., *Etude psychoacoustique « caractérisation des nuisances de bruits de chantier »*, rapport final IB/RC/1087, ADEME, Ministère de l'Environnement, 2001.

Résumé

La sonie, intensité subjective d'un son est un paramètre psychoacoustique primordial dans l'évaluation de la gêne et dans les études sur la qualité sonore. Il existe à l'heure actuelle des modèles qui estiment bien la sonie de sons stationnaires, tels ceux de Zwicker (1958) et de Moore et coll. (1997). D'autres modèles (Zwicker et Fastl (1999) et Glasberg et Moore (2002)) existent pour calculer la sonie en fonction du temps mais présentent certaines limites pour donner la sonie globale de sons non stationnaires et en particulier de sons impulsionnels. Le but de ce travail de thèse est d'étudier la sonie de sons impulsionnels afin de pouvoir en proposer un estimateur pour éviter de mettre en œuvre des tests psychoacoustiques longs et onéreux, seul moyen aujourd'hui de connaître précisément la sonie de tels sons. L'originalité de ce travail a été de s'intéresser à des sons impulsionnels possédant une attaque rapide, pas de palier et une décroissance de forme exponentielle. Le choix de ces sons est basé sur l'observation de sons naturels que nous avons pu recenser dans notre environnement sonore. Un premier algorithme (ESI) a été proposé pour calculer la sonie à partir de caractéristiques physiques du signal telles que l'énergie et le temps de descente. Nous avons déterminé les lignes isosoniques, les fonctions de sonie et l'intégration temporelle de sons impulsionnels pour, non seulement déterminer les relations entre la sonie et les paramètres physiques du signal (fréquence, niveau et durée), mais aussi tester les modèles et en déterminer les domaines d'application. Les résultats de nos recherches étant en partie dédiés au domaine industriel et à la métrologie, nous nous sommes principalement intéressés au niveau d'isotonie, exprimé en phons. En effet, cette unité est plus pratique car elle est plus proche du niveau de pression, exprimé en dB SPL ou en dB(A), utilisé plus fréquemment. Nous avons donc déterminé la méthode de mesure du niveau d'isotonie la mieux adaptée à nos types de sons. Ainsi, la méthode d'ajustement a été retenue parmi quatre autres méthodes, pour sa fiabilité, sa stabilité et sa rapidité. Toutes ces données ont contribué à déterminer des domaines d'application et des limites des modèles de sonie déjà proposés et de notre nouvel estimateur ainsi qu'à proposer un nouvel indice (Nimp), calculé à partir du modèle de Zwicker et Fastl (1999), pour donner une première approximation du niveau d'isotonie de sons impulsionnels.

Summary

Loudness, the subjective intensity of a sound is a paramount psychoacoustic parameter in the evaluation of noisiness and in studies on sound quality. There are currently models which estimate correctly the loudness of stationary sounds, such as those of Zwicker (1958) and Moore and coll. (1997). Other models (Zwicker and Fastl (1999) and Glasberg and Moore (2002)) exist to calculate loudness as a function to time but present some limits in giving the total loudness of nonstationary sounds and in particular of impulsive sounds. The aim of this doctoral work is to study the loudness of impulsive sounds in order to propose an estimator of it to avoid running psychoacoustic tests, which are long and expensive, but are the only mean today for determining precisely the loudness of such sounds. The originality of this work is to be focussed on impulsive sounds having a fast attack, not stage and a decrease of exponential form. The choice of these sounds is based on the observation of natural sounds which are commonly found in our sound environment. A first algorithm (ESI) was proposed to calculate loudness from physical characteristics of the signal such as energy and decay time. We determined the equal-loudness contours, the loudness functions and the temporal summation of impulsive sounds not only to determine the relations between the loudness and the physical parameters of the signal (frequency, level and duration), but also to test the models and to determine their applicability. The results of our research being partly dedicated to the industrial field and metrology, we are mainly interested in the loudness level, expressed in phons. Indeed, this unit is more practical because it is closer to the sound pressure level, expressed in dB SPL or dB(A), used more frequently. Thus, we determined the method of measurement of the loudness level best suited to our types of sounds. Thus, the method of adjustment was chosen among four other methods, for being reliable, stable and quick. All these data contributed to determine applicability and limits of the already existing loudness models and our new estimator (ESI). These data also contributed to propose a new index (Nimp), calculated from the model of Zwicker and Fastl (1999), to give a first approximation of the loudness level of impulsive sounds.