

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
PH.D.

PAR
JORIS BRUN-BERTHET

MÉTHODE DE CHOIX DE MODÈLES ACOUSTIQUES À L'AIDE DE PLANS
D'EXPÉRIENCES - APPLICATION À UN TÉLÉPHONE MAINS-LIBRES

MONTRÉAL, le 26 MAI 2004

© droits réservés de Joris Brun-Berthet

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Frédéric Laville, Directeur de thèse
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Marc Thomas, Président du jury
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Raymond Panneton, Examineur externe
Département de Génie Mécanique, Université de Sherbrooke

M. Yves Beauchamp, Examineur
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 MARS 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

MÉTHODE DE CHOIX DE MODÈLES ACOUSTIQUES À L'AIDE DE PLANS D'EXPÉRIENCES - APPLICATION À UN TÉLÉPHONE MAINS-LIBRES

Joris Brun-Berthet

SOMMAIRE

Ce document présente une adaptation de la méthode des plans d'expériences à l'acoustique.

La méthode des plans d'expériences est conçue pour modéliser un système, ou un procédé, de façon empirique, à l'aide d'une caractérisation systématique du système basée sur un critère statistique. Cette méthode est utilisée pour la caractérisation d'un système lorsqu'une méthode théorique est impossible ou trop longue. Cette technique n'est pas commune en acoustique. Elle a tout de même été employée dans quelques cas d'application pour déterminer quels paramètres affectent la réponse acoustique d'un système ou d'un produit. La variable ou la réponse évaluée était une variable discrète tandis que, dans la méthode proposée, c'est une variable à valeurs multiples, un spectre de fréquence, qui constitue un outil plus pratique pour une analyse acoustique avancée.

Les résultats sont présentés sur un spectre en fréquence dans lequel l'effet du facteur est une courbe en grandeur physique (dB) et le test de Fisher est représenté par deux courbes correspondant aux limites inférieure et supérieure de signification de l'effet de l'erreur. Ces deux courbes sont aussi en dB. La méthode est appliquée à un téléphone mains libres où, dans le but de développer un modèle de prédiction, il est important de déterminer quels facteurs structuraux affectent la réponse acoustique du téléphone et dans quelles gammes de fréquence.

Les résultats sur la caractérisation du système et l'analyse des phénomènes physiques sont validés de trois manières : premièrement, avec une conception expérimentale complémentaire, deuxièmement, avec une méthode expérimentale plus classique et, troisièmement, avec une simulation sur ordinateur.

USING EXPERIMENTAL DESIGN TO CHOOSE AN ACOUSTICAL MODEL - APPLICATION TO A HANDS-FREE TELEPHONE

Joris Brun-Berthet

ABSTRACT

This document presents an adaptation of the experimental design method (more precisely called statistical design and analysis of experiments) to acoustics.

Experimental design is an efficient method to find an empirical relation whenever a theoretical one cannot be obtained or would be too difficult to obtain. This technique is not common in acoustics where it has been used in a few application cases to determine what product or process parameters affect the acoustic response. The response variable was single valued whereas, in the proposed method, it is a multi-valued variable, a frequency spectrum, which constitutes a more practical tool for an advanced acoustic analysis.

The results are presented on a spectrum plot where the factor effect is given in the physical quantity (dB) and the Fisher test of significance is presented as two plots of the lower and upper significance limits (also in dB). The method is applied to a hands-free telephone where, for subsequent modeling purposes, the method determines which structural factors affect the telephone acoustic response and what are the associated frequency ranges.

The results are validated three ways : first, with a complementary experimental design, second, with a more classical experimental method, and, third, with a computer simulation.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce à l'entreprise MITEL Networks et au CRSNG sous la direction du Professeur Frédéric Laville, à l'École de technologie supérieure, que je tiens particulièrement à remercier pour m'avoir permis de faire ce doctorat et m'avoir soutenu malgré l'échéance qui n'en finissait plus d'être repoussée.

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont laissé partir loin tout en sachant que je n'étais pas près de revenir, ainsi que mes amis restés en France avec qui je viens de fêter avec plaisir mes 33 ans.

Merci aussi à tous mes proches de Montréal, dont certains ont d'ailleurs participé brillamment à ce travail, et qui supportent mes théories et mes blagues douteuses jusqu'à des heures parfois très avancées de la nuit. Merci à Delphine pour son soutien et sa touche finale sur ce document.

Je dois remercier également les différents stagiaires qui se sont succédés sur ce projet, ainsi que tous les gens du laboratoire avec qui j'ai pu échanger des idées.

Je tiens à remercier ma conjointe qui a dû attendre souvent de longues heures jusqu'à aujourd'hui.

Pour finir, je tiens à dédier cette thèse à mes filles et à tout l'amour qu'elles me donnent au quotidien.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique industrielle	2
1.1.1 Les normes de qualité	2
1.1.2 Développement de produit	3
1.2 Problématique scientifique	6
1.3 Objectifs	6
1.4 Démarche	6
1.5 Contenu	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Modèle acoustique en téléphonie	9
2.2 Modèle acoustique	10
2.2.1 Modèle de haut-parleur	11
2.2.2 Modèle de boîtier	11
2.2.3 Modèle de microphone	12
2.3 Plans d'expériences	12
2.3.1 Plans d'expériences comme méthode de choix de modèles	12
2.3.2 Plans d'expériences avec des modèles numériques	12
2.3.3 Plans d'expériences appliqués à l'acoustique	13
CHAPITRE 3 TRAVAUX PRÉLIMINAIRES - MODÉLISATION NUMÉRIQUE	14
3.1 Modélisation d'un téléphone commercial	14

3.2	Conception d'un prototype à géométrie simplifiée et analyse numérique	19
3.3	Conclusion sur les travaux préliminaires	24
CHAPITRE 4 ADAPTATION DE LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES		26
4.1	Principes des plans d'expériences	26
4.2	Tables orthogonales	28
4.3	Mise en place du plan d'expériences	28
4.4	Illustration de l'intérêt de la méthode des plans d'expériences	29
4.4.1	Étude de la précision de la mesure	30
4.4.1.1	Selon la méthode classique (un facteur à la fois)	30
4.4.1.2	Selon la méthode des plans d'expériences	31
4.4.2	Effet des interactions	32
4.4.2.1	Selon la méthode classique	33
4.4.2.2	Selon la méthode des plans d'expériences	34
4.5	Adaptation de la méthode pour l'acoustique	36
4.5.1	Évaluation de l'effet en grandeurs physiques	36
4.5.2	Représentation des effets en fonction de la fréquence	40
4.6	Conclusion sur la méthode présentée	40
CHAPITRE 5 UTILISATION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE		43
5.1	Définition du plan d'expériences	44
5.1.1	Système	44
5.1.2	Réponses	44
5.1.3	Facteurs	45
5.1.4	Plan d'expériences choisi	48
5.2	Résultats du plan	51
5.2.1	Effets des facteurs	51
5.2.1.1	Facteur BLOC	51
5.2.1.2	Facteur GRILLE	53
5.2.1.3	Facteur FUIITE	54
5.2.1.4	Facteur TROU	55
5.2.1.5	Facteur MOUSSE	56
5.2.1.6	Facteur PLAQUE	57
5.2.1.7	Facteur ÉPAISSEUR	58
5.2.2	Effets des interactions	60
5.3	Conclusion sur les résultats expérimentaux	61
CHAPITRE 6 VALIDATION DES RÉSULTATS OBTENUS		63
6.1	Validation de la méthodologie des plans d'expériences par une analyse approfondie de la limite de signification	63
6.1.1	Vérification des effets des interactions triples	64

6.1.2	Utilisation d'un plan d'expérience complet	65
6.1.2.1	Vérification des effets des facteurs	67
6.1.2.2	Uniformité de l'amplitude de l'effet de l'erreur en fonction de la fréquence	67
6.1.2.3	Origine des maxima	68
6.2	Comparaison des résultats du plan d'expériences par l'utilisation d'une méthode classique expérimentale d'identification des chemins de transmission	70
6.2.1	Chemin vibratoire (isolations (1) et (3))	72
6.2.2	Chemin acoustique extérieur (isolations (2) et (3))	73
6.2.3	Chemin acoustique intérieur (isolations (1) et (2))	74
6.2.4	Vérification de la séparation des chemins de transmission	75
6.3	Validation des effets du plan d'expériences et interprétations des phénomènes physiques à l'aide d'une simulation informatique	76
6.3.1	Validation de l'effet de la grille	77
6.3.2	Validation de l'effet du boîtier et de la cavité à partir des prototypes	81
6.3.2.1	Validation de l'effet du boîtier	88
6.3.2.2	Deuxième validation de l'effet du boîtier	90
6.3.2.3	Validation de l'effet de la cavité	91
6.4	Conclusion sur la validation de la caractérisation des effets par plans d'expériences	95
CONCLUSION		97
ANNEXES		99
1	Utilisation de simulation analytique	99
2	Vérification des effets des facteurs	105
3	Effet des interactions doubles non représentées	107
BIBLIOGRAPHIE		113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Comparaison entre les fréquences des modes de cavité calculées analytiquement, numériquement et mesurées à l'aide du prototype 23
Tableau II	Liste d'expériences selon la méthode classique 30
Tableau III	Liste d'expériences pour le plan d'expériences fractionné - Table orthogonale 31
Tableau IV	Liste d'expériences selon la méthode classique 33
Tableau V	Liste d'expériences selon le plan d'expériences complet - Table orthogonale 34
Tableau VI	Exemple d'un plan d'expériences à deux facteurs ($k = 2$) avec deux mesures ($n = 2$) 37
Tableau VII	Facteurs et niveaux du plan d'expériences 47
Tableau VIII	Déroulement des expériences selon la table orthogonale choisie pour le plan d'expériences 52
Tableau IX	Plan d'expériences complet 66
Tableau X	Modes de structure et de cavité 83

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Trois fonctions de transfert normalisées selon les normes ITU pour mesurer la qualité acoustique d'un téléphone mains-libres 3
Figure 2	Processus de développement d'un nouveau produit avec prise en compte de l'acoustique 4
Figure 3	Exemple d'itération possible à l'étape de conception (étape 3) 5
Figure 4	Téléphone commercial (Superset 410) modélisé numériquement 15
Figure 5	Superset 410 - maillage de la structure en éléments de surface 16
Figure 6	Superset 410 - premier mode vibratoire partie haute et partie basse du modèle de téléphone 18
Figure 7	Superset 410 - maillage de la cavité en élément de volume et représentation d'un mode de cavité 18
Figure 8	Superset 410 - réponse acoustique - comparaison entre la mesure expérimentale et le calcul numérique 19
Figure 9	Prototype de téléphone mains-libres utilisé 20
Figure 10	Prototype - premier mode vibratoire du haut-parleur - mesure $F = 313$ Hz - calcul $F = 300$ Hz 21
Figure 11	Maillage structural d'un prototype de téléphone 21
Figure 12	Prototype - premier mode vibratoire $F = 145$ Hz - premier mode de cavité $F = 792$ Hz 22
Figure 13	Prototype - identification des modes de cavité calculés sur une mesure de pression dans un coin à l'intérieur de la cavité 24
Figure 14	Prototype - réponse acoustique - comparaison entre la mesure expérimentale et le calcul numérique 25
Figure 15	Représentation d'un système ou principe avec tous les éléments reliés au système 27

Figure 16	Mise en place d'un plan d'expériences en plusieurs étapes	29
Figure 17	Principe de la représentation des résultats proposés pour un plan d'expériences acoustique	41
Figure 18	Chemins de transmission utilisés pour le choix des facteurs du plan d'expériences	46
Figure 19	Prototype et facteurs utilisés pour le plan d'expérience - première illustration	48
Figure 20	Prototype et facteurs utilisés pour le plan d'expérience - deuxième illustration	49
Figure 21	Effet de la variable Bloc	53
Figure 22	Effet du facteur GRILLE	54
Figure 23	Effet du facteur FUIITE	55
Figure 24	Effet du facteur TROU	56
Figure 25	Effet du facteur MOUSSE	57
Figure 26	Effet du facteur PLAQUE	58
Figure 27	Effet du facteur ÉPAISSEUR	59
Figure 28	Représentation des premiers modes propres du prototype	60
Figure 29	Effet d'une interaction double entre les facteurs MOUSSE et ÉPAISSEUR	61
Figure 30	Interaction entre les facteurs TROU et ÉPAISSEUR	61
Figure 31	Vérification de l'effet des interactions triples	64
Figure 32	Vérification de l'effet du facteur GRILLE.	67
Figure 33	Comparaison des limites de signification du plan d'expérience initial (plan factoriel fractionné) et du plan d'expérience fait pour la validation (plan factoriel complet)	68
Figure 34	Exemple du lien entre les mesures de réponse acoustique (courbe du haut) et la limite de signification due au terme d'erreur (courbe du bas)	69

Figure 35	Différentes isolations utilisées pour séparer les chemins de transmission . . .	71
Figure 36	Réponse acoustique dans les 3 configurations citées ainsi que le bruit de fond et la mesure sans aucun traitement	72
Figure 37	Contribution du rayonnement du boîtier excité par voie vibratoire sur la réponse acoustique du téléphone.	73
Figure 38	Contribution du rayonnement du haut-parleur sur la réponse acoustique du téléphone	74
Figure 39	Contribution du rayonnement du boîtier excité par voie acoustique intérieure sur la réponse acoustique du téléphone	75
Figure 40	Comparaison entre la somme des trois chemins de transmission et la réponse du système complet	76
Figure 41	Pression acoustique à 50 cm du haut-parleur du S410 avec et sans la grille	78
Figure 42	Représentation du résonateur de Helmholtz équivalent au système membrane-tube-grille	78
Figure 43	Maillage de la membrane du haut-parleur et de la grille du S410	80
Figure 44	Pression acoustique dans la position normalisée (calcul)	80
Figure 45	Représentation de la membrane et de la force d'excitation appliquée	85
Figure 46	Domaines et frontières de calcul pour le prototype numérique	85
Figure 47	Variable de validation : pression à 50 cm.	86
Figure 48	Les cinq configurations de calcul pour la validation par simulation numérique	87
Figure 49	Représentation des réponses pour les cinq (5) configurations entre 0 et 1000 Hz	88
Figure 50	Différence de rayonnement avec (config. 1) ou sans (config. 2) prise en compte du boîtier - Cavité couplée avec le boîtier	89
Figure 51	Différence entre les deux configurations précédentes	89
Figure 52	Différence de rayonnement avec (config. 3) ou sans (config. 4) prise en compte du boîtier - Cavité et boîtier non couplés	90

Figure 53	Différence entre les deux configurations précédentes	91
Figure 54	Différence de rayonnement entre boîtier couplé (config. 1) et boîtier non-couplé avec la cavité (config. 3)	92
Figure 55	Différence entre les deux configurations	92
Figure 56	Différence de rayonnement entre membrane du haut-parleur couplée (config. 4) et non-couplé avec la cavité (config. 5)	94
Figure 57	Différence entre les deux configurations	95
Figure 58	Vérification de l'effet du facteur MOUSSE	106
Figure 59	Vérification de l'effet du facteur ÉPAISSEUR	106
Figure 60	Effet de l'interaction entre les facteurs PLAQUE et ÉPAISSEUR	108
Figure 61	Effet de l'interaction entre les facteurs FUIITE et ÉPAISSEUR	108
Figure 62	Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et ÉPAISSEUR	109
Figure 63	Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et FUIITE	109
Figure 64	Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et MOUSSE	109
Figure 65	Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et PLAQUE	110
Figure 66	Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et TROU	110
Figure 67	Effet de l'interaction entre les facteurs MOUSSE et FUIITE	110
Figure 68	Effet de l'interaction entre les facteurs MOUSSE et PLAQUE	111
Figure 69	Effet de l'interaction entre les facteurs PLAQUE et FUIITE	111
Figure 70	Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et FUIITE	111
Figure 71	Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et MOUSSE	112
Figure 72	Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et PLAQUE	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ITU	International Telecommunication Union
SS_A	Somme des carrés pour le facteur A
MS_A	Moyenne de la somme des carrés pour le facteur A
$df(A)$	Nombre de degré de liberté réservé pour le facteur A
dB	décibel
$V[\text{Effet}(A)]$	Variance de l'effet du facteur A

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le développement récent de la technologie "Full Duplex" pour les téléphones mains-libres, où le haut-parleur et le microphone fonctionnent simultanément, a engendré de nouveaux problèmes du point de vue de la qualité acoustique. Ces problèmes sont, d'une part, la qualité de la transmission du signal acoustique par les deux transducteurs dans le téléphone et, d'autre part, l'importance du couplage entre ces deux transducteurs. Ces problèmes peuvent être résolus par deux méthodes : premièrement, par un traitement électronique du signal, deuxièmement, grâce à un effort sur la conception acoustique. Si la première de ces deux méthodes est bien établie et très courante, la deuxième est cependant au stade d'essais et erreurs et n'intervient que trop tard dans le développement du nouveau produit.

Le projet est né d'un contact entre l'entreprise MITEL Networks, Kanata, Ontario et l'École de technologie supérieure, Montréal, Québec. La compagnie voulait se munir d'un outil de prédiction afin de travailler sur l'amélioration de leur téléphone le plus tôt possible dans la conception de nouveaux produits. En effet, les performances acoustiques des téléphones mains-libres sont fixées par des normes et l'évaluation de la performance d'un nouveau produit implique la conception d'un prototype de test. Un outil de prédiction permet de concevoir des prototypes par simulation avant la conception de prototypes réels afin de réduire le nombre d'itérations dans la conception d'un produit.

L'introduction présente d'abord le contexte industriel pour le développement des téléphones mains-libres et ensuite les objectifs de ce travail ainsi que la démarche adoptée pour répondre à ces objectifs.

1.1 Problématique industrielle

1.1.1 Les normes de qualité

La qualité des téléphones est évaluée grâce à la vérification de normes imposées par une organisation internationale : l'International Telecommunication Union. Les normes [1, 2] pour les téléphones mains-libres imposent la vérification de 3 fonctions de transfert. Ces trois fonctions sont représentées dans la figure 1 :

1. Le rapport de la pression acoustique à l'oreille sur le signal téléphonique reçu (cette fonction de transfert représente le signal acoustique émis par le haut-parleur, provenant du signal électrique reçu par le téléphone, qu'entend un utilisateur positionné à 50 cm du téléphone).
2. Le rapport du signal téléphonique émis sur la pression acoustique de la voix (cette fonction représente le signal électrique émis par le téléphone, provenant du signal acoustique de la voix de l'utilisateur positionné à 50 cm, capté par le microphone du téléphone).
3. Le rapport du signal téléphonique émis sur le signal téléphonique reçu (cette fonction représente le signal capté par le microphone du téléphone provenant du haut-parleur).

Les trois fonctions de transfert doivent satisfaire un patron en fonction de la fréquence. Les deux premières fonctions de transfert caractérisent la qualité de la transformation entre signaux acoustiques et signaux électriques. Il est demandé, pour la réception et l'émission du signal téléphonique, que la réponse soit la plus fidèle possible au signal initial. Pour ces deux mesures, cela signifie qu'il faut avoir une réponse la plus uniforme possible sur toute la gamme de fréquence utilisée. La dernière fonction de transfert caractérise le couplage entre le microphone et le haut-parleur. Il s'agit en fait du signal capté par le microphone et provenant du haut-parleur. Ce signal doit être minimisé.

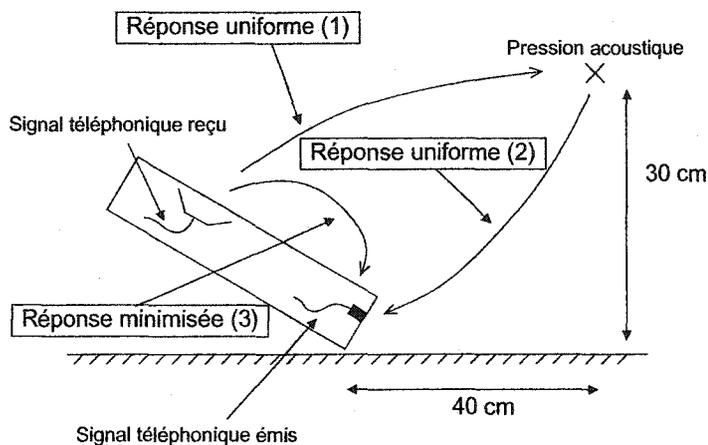


Figure 1 Trois fonctions de transfert normalisées selon les normes ITU pour mesurer la qualité acoustique d'un téléphone mains-libres (Les numéros 1, 2 et 3 correspondent aux numéros utilisés dans le texte lors de la définition des fonctions de transfert)

1.1.2 Développement de produit

Dans un contexte industriel, un nouveau téléphone mains-libres doit répondre aux normes définies précédemment. Malheureusement, dans le cas de l'acoustique, ces vérifications sont faites à l'étape finale de la conception d'un nouveau téléphone. Si l'une de ces normes n'est pas valide, la modification du produit engendre un coût très élevé, puisque celle-ci intervient très tard dans le processus de conception.

Avec un modèle de prédiction, l'acoustique pourrait intervenir à plusieurs étapes dans le développement de produit. La partie droite de la figure 2 représente les différentes étapes du développement d'un nouveau produit. La partie gauche de cette même figure indique de quelle façon l'acoustique interviendrait dans ce processus.

La première étape (étape 1) est appelée étape de pré-concept. Une idée d'un produit est proposée. Ensuite, vient l'étape de l'avant-projet (étape 2). La finalité de cette étape est de rédiger un document qui décrit les caractéristiques du nouveau produit ainsi qu'un plan de développement. Pour arriver à ce stade, une équipe pluridisciplinaire impliquant toutes les unités

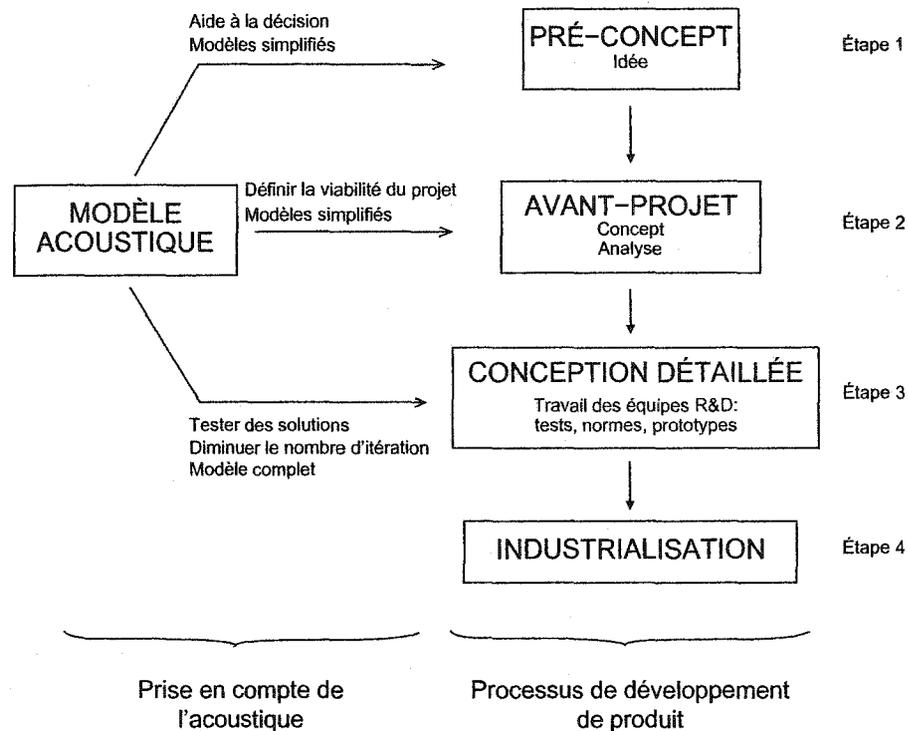


Figure 2 Processus de développement d'un nouveau produit avec prise en compte de l'acoustique

importantes de l'entreprise est créée. Cette équipe va commencer par tester tous les éléments nécessaires à la fabrication du produit tout en tenant compte des caractéristiques prévues et du coût. Ensuite vient l'étape 3. Cette étape est l'étape de conception détaillée. C'est principalement ici que toutes les équipes de R&D interviennent. Un produit est créé, celui-ci est donc prêt à être fabriqué sous forme de prototype. Ce prototype servira à vérifier la conformité du produit par rapport aux normes. Lorsque le modèle final satisfait toutes les exigences, il y a alors l'étape d'industrialisation (étape 4).

Dans ce processus de conception globale, un certain nombre d'itérations sont faites afin de faire converger le produit vers les spécifications désirées. Les itérations interviennent dans les trois premières étapes du processus. À chacune de ces étapes, l'utilisation du modèle apporterait une amélioration sur la conception finale. À l'étape 2, un travail peut par exemple être fait sur le positionnement du haut-parleur, sur le choix de la forme, ou encore sur le volume de

la cavité. Dans ce cas, le modèle peut intervenir comme outil d'aide aux choix, car il permet de comparer facilement des solutions techniquement envisageables et de choisir la meilleure possible. L'étape à laquelle le modèle est le plus important est l'étape de conception. En effet, à ce stade, le produit est alors prêt à être fabriqué pour être testé. Le processus de conception est schématisé sur la droite de la figure 3.

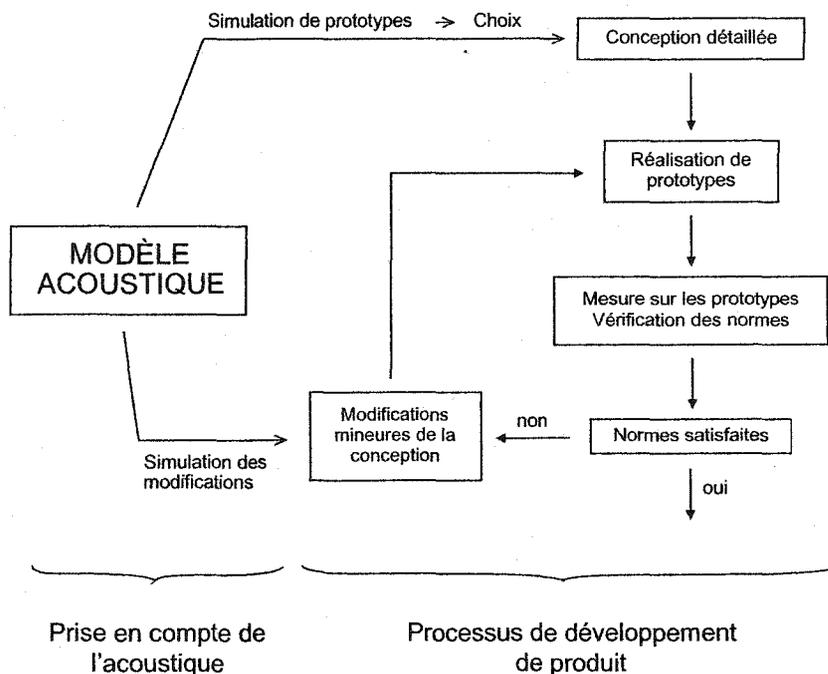


Figure 3 Exemple d'itération possible à l'étape de conception (étape 3)

Le produit est fabriqué sous forme de prototype, puis il est testé. Ensuite, des modifications doivent être faites jusqu'à ce que le produit satisfasse à toutes les normes et recommandations. Le coût de la conception dépend du nombre d'itération et du temps mis à ajuster le produit. Un modèle, ici, permettrait d'économiser sur le nombre de prototypes à fabriquer, en intervenant de deux façons différentes (partie gauche de la figure 3). Premièrement, dès l'étape de conception détaillée, un premier modèle complet peut être fait avant la construction du premier prototype pour compléter des choix. Deuxièmement, dans le processus de modifications, un deuxième modèle peut être fait de façon à simuler les modifications plutôt que de construire des nouveaux prototypes.

1.2 Problématique scientifique

Le développement d'un modèle de téléphone est possible grâce aux différents outils existants. Néanmoins, plusieurs problèmes se posent pour la mise en œuvre d'un modèle acoustique de téléphone mains-libres :

- le choix du type de modèle à utiliser;
- le choix de la bande de fréquence;
- le choix du niveau de détail à prendre en compte.

Ces choix sont nécessaires afin d'optimiser les ressources informatiques.

1.3 Objectifs

L'*objectif général* est d'utiliser le problème posé par la modélisation acoustique du téléphone mains-libres pour développer une méthode générale afin de déterminer les effets des éléments structuraux sur la réponse acoustique d'un produit manufacturé. Cette détermination est faite afin d'obtenir le maximum d'informations sur le système pour le développement d'un modèle acoustique de prédiction. L'analyse de ces informations permet d'identifier les phénomènes physiques à prendre en compte dans le modèle et de choisir le type de modèle le plus approprié. Cet objectif général peut être subdivisé en deux objectifs spécifiques :

- Le *premier objectif spécifique* de ce travail est de définir une méthode de caractérisation expérimentale. Celle-ci s'appuie sur une analyse par plan d'expérience adaptée à l'acoustique et aux systèmes dont les réponses dépendent de la fréquence;
- Le *deuxième objectif spécifique* est la mise en application de la méthode sur un téléphone mains-libres ainsi que la validation de la méthode et des résultats de la méthode avec des analyses complémentaires.

1.4 Démarche

Trois étapes sont proposées pour répondre aux objectifs définis dans la section précédente.

La *première étape* est le développement de la méthode de caractérisation à partir d'une méthode de plans d'expériences. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'une table orthogonale, définie en fonction du nombre d'éléments (ou facteurs) et du nombre d'états (ou niveaux) pour chaque élément, dans le but de définir la liste d'expériences à réaliser. Cette méthode est ensuite adaptée aux contraintes reliées à l'acoustique : c'est-à-dire l'utilisation de grandeurs physiques et l'analyse d'un phénomène en fonction de la fréquence sur une plage importante.

La *deuxième étape* est la mise en application de la méthode proposée pour la caractérisation acoustique d'un téléphone mains-libres en un point de mesure de la pression acoustique défini dans la figure 1. Cette caractérisation permet de recueillir de nombreuses informations sur le système pour le développement d'un modèle de prédiction utiles pour la conception d'un nouveau produit.

La *troisième étape* est la validation de la méthode et des résultats de la méthode par trois approches différentes. Premièrement, une analyse statistique complémentaire est utilisée pour vérifier les effets des interactions d'ordre 3 et la variabilité de la limite de signification. Deuxièmement, la validation est faite à l'aide d'une étude avec une méthode expérimentale d'identification de chemins de transmission. Troisièmement, un modèle numérique est utilisé.

1.5 Contenu

Suite à cette introduction qui constitue le chapitre 1, une revue de littérature est présentée dans le chapitre 2. Celle-ci est d'abord faite sur le problème général du téléphone mains-libres, puis, sur la modélisation des différentes parties du téléphone, et enfin, sur les plans d'expériences ainsi que sur les applications à l'acoustique. Dans le chapitre 3, des modélisations préliminaires sont présentées. Celles-ci sont faites sur un téléphone existant ainsi que sur un prototype de téléphone mains-libres conçu dans le cadre de cette étude. Ensuite, dans le chapitre 4, la théorie des plans d'expériences, illustrée d'un court exemple, est énoncée. Le chapitre 5 présente le plan d'expériences principal ainsi que tous les résultats importants obtenus avec cette application de la méthode. Enfin, le chapitre 6 contient une validation des

résultats en trois étapes : premièrement, une validation à l'aide d'études complémentaires par plans d'expériences, deuxièmement, une validation avec une étude des chemins de transmissions et, troisièmement, une validation avec des modèles informatiques.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Pour ce travail, les recherches ont été faites en téléphonie et principalement sur les problèmes spécifiques aux téléphones mains-libres et à la modélisation acoustique. Puis, sur les techniques de modélisation du système ainsi que des transducteurs afin de définir de façon précise les informations essentielles à obtenir avec la méthode de caractérisation proposée. Et enfin, sur l'utilisation de la méthode des plans d'expérience comme méthode d'aide de choix de modèle, et, dans le cas d'un grand nombre de variable de sortie appelée également fonction réponse.

2.1 Modèle acoustique en téléphonie

Les premières recherches ont été faites dans le domaine de la téléphonie mains-libres. Les publications trouvées traitent ce problème uniquement du point de vue traitement du signal. La principale étude qui sert de référence est celle de Eberhard Hänsler [3], 1992, qui présente, dans une étude bibliographique de plus de 100 articles, tous les aspects du traitement du signal développés pour les mains-libres jusqu'au jour de l'étude. Un deuxième article, de 1994 et du même auteur [4], vient compléter le premier de plus de 80 références supplémentaires. Il est expliqué dans ces deux articles que pour résoudre le problème du téléphone mains-libres, il faudrait pouvoir reproduire une réplique électronique du système. Cela permettrait d'effectuer le découplage du haut-parleur et du microphone sans restriction pour le système et sans perte de confort pour l'utilisateur. Le modèle du système devrait aussi être adaptatif et donc être contrôlé par le signal de la parole. De nombreuses références liées aux problèmes de bruit et d'écho existent, entre autres une étude bibliographique datant de 2000 [5]. Par contre, sur l'acoustique du téléphone mains-libres, une seule étude a été trouvée : Birkett, A. N. et Goubran R. A. en 1995 [6]. Celle-ci présente une des limitations des techniques de signal. Dans cet article, il est mentionné que l'un des problèmes majeurs est l'importance des phénomènes de vibration sur l'appareil, qui peuvent entraîner, à cause de chocs (par exemple

des touches ou du combiné), des phénomènes non linéaires que le traitement de signal ne peut pas corriger. Il est d'ailleurs suggéré en conclusion, pour l'amélioration des performances acoustiques, de se focaliser d'abord sur les vibrations avant d'utiliser le traitement numérique du signal.

2.2 Modèle acoustique

Ce document ne présente pas de recherche dans le domaine de la modélisation. Les techniques de modélisation sont plutôt présentées comme un outil de validation de la méthode expérimentale proposée. Beaucoup de modèles existent dans le domaine de l'acoustique. La littérature présente des modèles aussi bien analytiques que numériques. Ils permettent d'aborder les problèmes de rayonnement acoustique des structures. Les méthodes utilisées sont principalement des méthodes de calcul numérique par éléments finis et éléments de frontière. Des modèles analytiques ont aussi été utilisés uniquement pour faire des validations simples, ils sont présentés en annexe. Les modèles développés ont été faits à l'aide de logiciels commerciaux. Ils sont donc directement utilisables dans le cas du développement industriel d'un produit.

Les domaines d'application de la modélisation acoustique sont principalement reliés au transport (automobile, aéronautique, etc.). L'un des logiciels permettant ce type d'application est I-DEAS avec le module Vibro-Acoustique. Ce logiciel a été utilisé dans les modèles numériques présentés par la suite.

Cette section propose des références utiles pour la modélisation acoustique des différents éléments du téléphone mains-libres. Premièrement, la source qui est le haut-parleur positionné sur le boîtier. Celui-ci constitue la source principale de rayonnement du système. Néanmoins, une partie des vibrations, transmises par le haut-parleur à l'ensemble du boîtier ainsi qu'au microphone, influe sur les réponses acoustiques définies dans le chapitre précédent. Les modèles disponibles pour le boîtier et les microphones sont aussi présentés.

2.2.1 Modèle de haut-parleur

La littérature présente plusieurs modèles de haut-parleur. Les premiers sont des modèles électroacoustiques discrets. Ce sont des modèles limités à l'étude du premier mode de la membrane du haut-parleur. Celui-ci est considéré comme un système résonant avec une analogie électrique ou mécanique (masse-ressort). Ces types de modèles sont présentés dans les ouvrages de référence de M. Rossi [7] et de L. Beranek [8]. Ils sont limités en fréquence et ne permettent pas de couvrir la bande de fréquence d'intérêt.

Il existe néanmoins des modèles analytiques continus. Dans ce cas, il est possible de couvrir la bande de fréquence au complet, mais peu de modèles ont une solution analytique. Un modèle de membrane simplement appuyée, issu de l'ouvrage de R. J. Gibert [9], et présenté dans l'annexe 1, permet d'étudier le comportement d'une membrane. Toutefois, il n'est pas possible de calculer tous les modes vibratoires. De plus, l'expression du rayonnement de la membrane, dans le cas d'une membrane de forme spécifique et de condition limite réaliste, n'est pas soluble.

Le type de modèle le plus approprié est l'utilisation d'outils numériques par éléments finis et éléments de frontière. Plusieurs articles y réfèrent. Les deux premiers, [10] en 1998 et [11] en 1999, présentent la modélisation d'un haut-parleur électrodynamique. Ces modèles permettent de déterminer la réponse acoustique du haut-parleur dans certaines conditions de rayonnement. Un autre article [12], en 1999, présente un outil numérique d'optimisation de la conception d'un haut-parleur.

2.2.2 Modèle de boîtier

Pour le boîtier du téléphone, des modèles analytiques ainsi que des modèles numériques ont été trouvés. La méthode des éléments finis présentée par exemple dans les ouvrages de Zienkiewicz [13] et de J.L. Batoz [14], permet de modéliser mécaniquement les phénomènes vibratoires du boîtier. Les articles de A. J. Pretlove [15, 16] présentent un modèle vibratoire analytique dans lequel une plaque est couplée à une boîte rectangulaire. L'ouvrage de C.

Lesueur [17] présente les méthodes de calcul de rayonnement des structures aussi bien analytiques que numériques. De plus, des articles de couplage fluide-structure ont aussi été trouvés : par exemple Kirkup, S.M. et Jones, M.A. [18] présentent le modèle couplé d'un fluide contenu à l'intérieur d'une boîte.

Comme dans le cas du haut-parleur, des outils commerciaux de modélisation numérique ont été utilisés.

2.2.3 Modèle de microphone

L'étude des réponses normalisées d'un téléphone mains-libres implique un travail de modélisation sur les microphones de ces téléphones. Un travail expérimental sur la caractérisation électroacoustique d'un microphone et sur sa modélisation, de façon discrète, a été fait, parallèlement à ce travail au laboratoire de l'université par Anaïs Lépine. Ce travail a utilisé des modèles de membrane disponibles dans la littérature [19, 20] pour déterminer les paramètres mécaniques d'un microphone de téléphone mains-libres. Il n'est pas présenté dans cette thèse car il n'est pas utilisé dans la méthode des plans d'expériences.

2.3 Plans d'expériences

2.3.1 Plans d'expériences comme méthode de choix de modèles

Les recherches sur la méthode des plans d'expériences ont d'abord été faites dans l'utilisation de cette méthode pour le choix de modèle. Un exemple est présenté par G. Abdunour [21] en 1995.

2.3.2 Plans d'expériences avec des modèles numériques

Ensuite, des recherches sur l'utilisation des plans d'expérience avec des modèles de calcul numérique sont illustrées par les deux articles suivants [22, 23], qui présentent des exemples dans lesquelles l'analyse par plans d'expériences se fait à partir de modèles numériques. Le système étudié est donc un système numérique et les paramètres (dimension des éléments

du maillage par exemple) peuvent être changés à chaque calcul. Dans ce type d'application, l'étude est faite sans répétition, car deux calculs du même modèle fournissent des résultats identiques.

2.3.3 Plans d'expériences appliqués à l'acoustique

L'utilisation des plans d'expériences dans le domaine de l'acoustique est peu fréquente. Seulement quelques articles ont été trouvés sur le sujet. Les plans d'expériences ont été utilisés pour trouver l'origine des variations de la mesure de la valeur globale en dB(A) du niveau de bruit généré par un disque dur d'ordinateur [24]. Ils ont aussi été utilisés pour déterminer quels sont les paramètres qui affectent le niveau globale en dB(A) du bruit du système d'entraînement des soupapes d'un moteur à combustion interne en 1993 [25] ou bien encore pour trouver les paramètres de conception qui affecte la qualité sonore d'un véhicule en utilisant trois indicateurs à valeur unique en 1991 [26]. D'autre part, le directeur de recherche, en collaboration avec d'autres, l'a proposé pour le développement d'un processus de rivetage plus silencieux en utilisant un niveau globale en dB(A) [27] ou pour réduire la variabilité du niveau de bruit généré à une fréquence unique par un échangeur d'air [28]. Cependant, dans tous ces cas la variable dépendante est une valeur discrète et aucune référence n'a été trouvée de cas où cette variable permet une analyse en fonction de la fréquence, ce qui serait utile en acoustique.

CHAPITRE 3

TRAVAUX PRÉLIMINAIRES - MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Ce chapitre est une présentation des travaux préliminaires de modélisation de téléphone mains-libres par un logiciel d'acoustique numérique commercial : le module Vibro-Acoustique du logiciel I-DEAS.

Ces travaux servent à identifier les problèmes et à mettre en évidence les limites des outils de modélisation numérique pour un système complexe. Tous les détails de la modélisation ne sont donc pas présentés. Ces travaux suscitent ainsi l'intérêt d'étudier le système d'une façon précise et systématique afin d'avoir plus d'informations pour faire des choix permettant d'optimiser les modèles.

La modélisation d'un téléphone mains-libres se fait en plusieurs étapes : premièrement, la caractérisation vibratoire de la source de bruit et de tous les éléments mécaniques du système, le haut-parleur et le boîtier, ainsi que la caractérisation acoustique de la cavité lorsque celle-ci est fermée; deuxièmement, la caractérisation acoustique du rayonnement du haut-parleur dans différentes configurations, c'est-à-dire avec un baffle ou avec les faces avant de chaque téléphone concerné; et enfin, l'ajustement du modèle en fonction des premiers résultats et des paramètres physiques des matériaux utilisés.

Ce chapitre présente la modélisation de deux types de téléphone. Le premier est un téléphone commercial existant. Le deuxième est un prototype dont la géométrie a été simplifiée.

3.1 Modélisation d'un téléphone commercial

Le Superset 410 (S410) est un modèle commercial de téléphone mains-libres de la compagnie MITEL Networks dont le microphone est positionné sur l'avant de l'appareil et le haut-parleur en dessous du combiné. Cette section présente la première modélisation de ce modèle de téléphone. Cette modélisation a été faite sans le combiné. La géométrie du haut-parleur est représentée sur la figure 4.

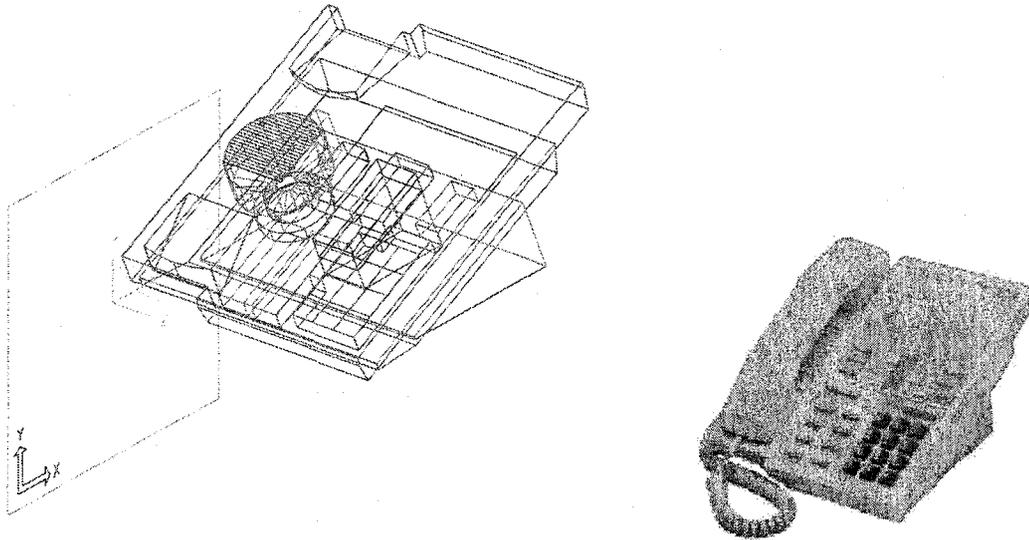


Figure 4 Téléphone commercial (Superset 410) modélisé numériquement

La géométrie du boîtier du téléphone ainsi que celle du haut-parleur sont dessinées sous forme de facette. Les arrondis de la structure n'apportant pas de modification significative du point de vue de la réponse acoustique n'ont pas été dessinés afin d'uniformiser la taille et la forme des éléments. L'uniformisation des éléments permet de réduire le temps de calcul et les risques de divergences.

Les maillages ont été faits avec I-DEAS. La dimension des éléments a été choisie afin de répondre au critère d'analyse jusqu'à une fréquence de 5000 Hz. La condition est qu'il faut au moins deux (2) éléments par longueur d'onde pour les ondes de flexion de la structure.

La longueur d'onde est le rapport de la vitesse de l'onde sur la fréquence

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \frac{2\pi}{\omega}$$

Pour une onde de flexion

$$c = c_B = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}}$$

avec B la rigidité en flexion

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

La longueur d'onde s'exprime donc :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt[3]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}} \quad (3.1)$$

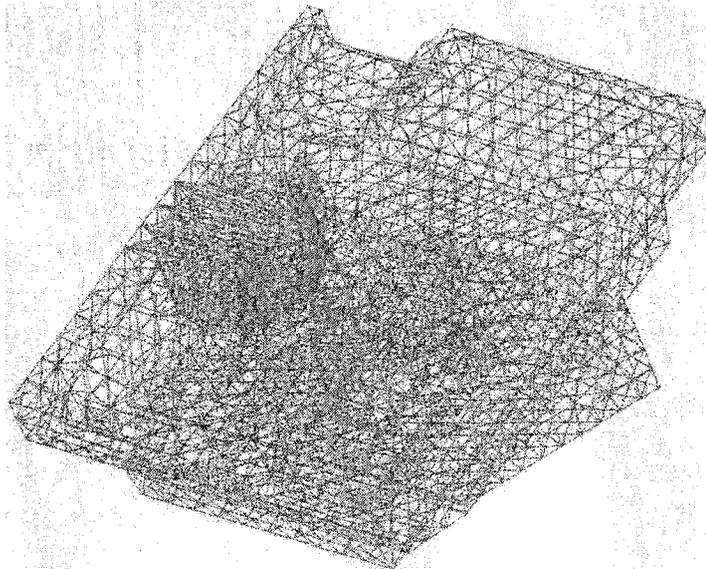


Figure 5 Superset 410 - maillage de la structure en éléments de surface

Le boîtier est en plastique "CYCOLAC T" de densité $\rho = 1.04$, de module d'Young $E = 2,3$ GPa et d'épaisseur 3 mm. Les caractéristiques de la membrane sont presque semblables c'est-à-dire : $\rho = 1.1$ et $E = 2,4$ GPa et l'épaisseur est d'environ 0,3 mm. Par hypothèse, $\nu = 0,3$. La figure 5 présente le maillage utilisé.

La dimension moyenne des éléments pour le boîtier est inférieure à 8 mm et la dimension moyenne des éléments pour la membrane est inférieure à 2,5 mm.

Compte tenu des longueurs d'onde calculées avec la relation 3.1, le nombre d'éléments par longueur d'onde vérifie les critères de maillage :

$$\lambda_{boîtier} = 42 \text{ mm}, \quad (3.2)$$

$$\lambda_{membrane} = 13 \text{ mm}. \quad (3.3)$$

Pour les phénomènes acoustiques, la longueur d'onde utilisée pour définir la dimension des éléments est la longueur d'onde du son dans l'air, soit pour une limite à 5000 Hz,

$$\lambda_{air} = \frac{c}{f} = 68 \text{ mm}, \quad (3.4)$$

et la dimension maximale des éléments est inférieure à 18 mm.

Des mesures de caractérisation acoustique et vibratoire du système permettent de raffiner, d'ajuster ou de modifier le maillage en fonction des résultats expérimentaux. Les mesures qui sont faites sont des mesures d'identification expérimentale des fréquences propres pour les différentes parties de la structure et pour la cavité. Celles-ci ont ensuite été comparées aux analyses modales numériques.

La figure 6 présente l'analyse modale numérique pour les premiers modes des parties inférieures et supérieures du boîtier du téléphone.

La figure 7 représente le maillage de la cavité. Le maillage fait pour la cavité doit être moins précis que celui utilisé pour la structure compte tenu des phénomènes physiques mis en jeu et des longueurs d'onde associées. La figure 7 montre aussi une représentation pour un mode de cavité présent au environ de 800 Hz.

Le modèle numérique peut alors être utilisé pour prédire la réponse acoustique du système en fonction des conditions d'utilisation. Dans ce premier modèle, un calcul est fait dans les

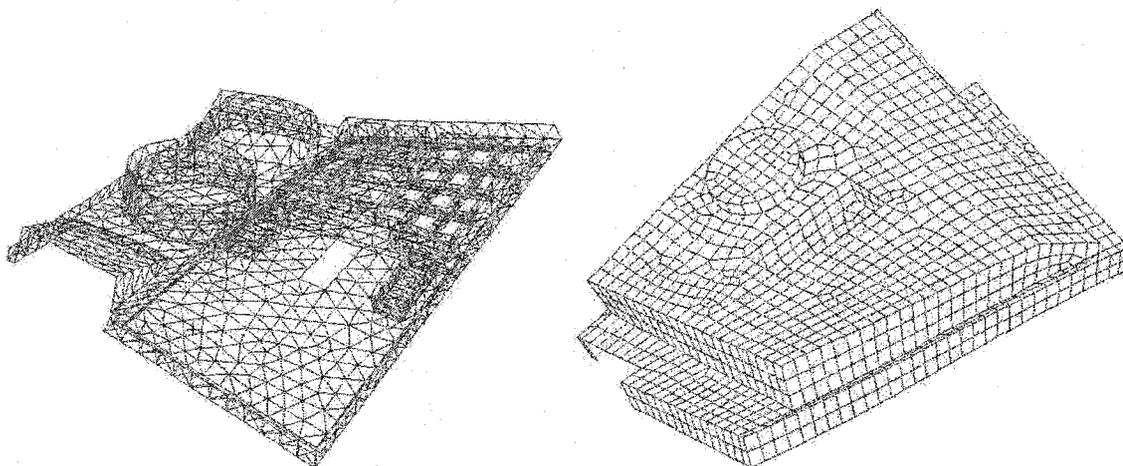


Figure 6 Superset 410 - premier mode vibratoire partie haute et partie basse du modèle de téléphone

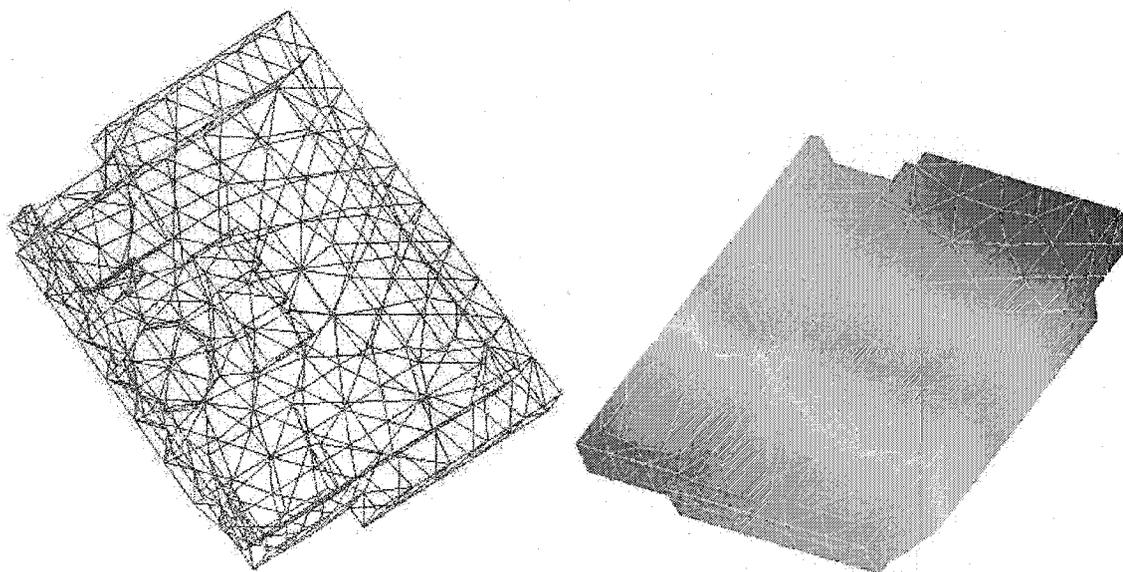


Figure 7 Superset 410 - maillage de la cavité en élément de volume et représentation d'un mode de cavité

conditions normalisées décrites dans les documents [1] et [2]. Le résultat du modèle représenté dans les maillages précédents permet d'obtenir la réponse de la figure 8.

Cette dernière permet de comparer le résultat expérimental et le résultat du modèle. Ce premier calcul permet d'identifier une première limite pour la modélisation en fonction du niveau

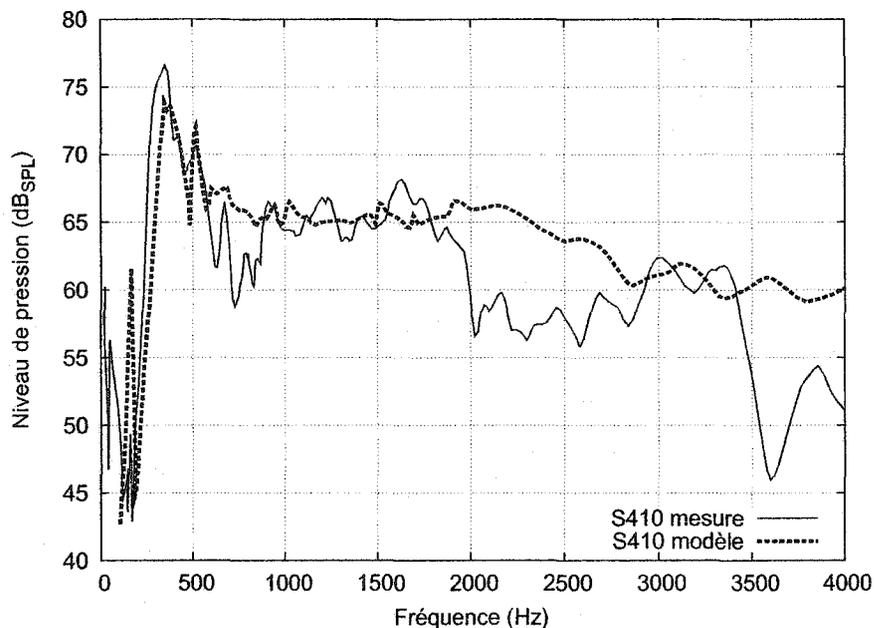


Figure 8 Superset 410 - réponse acoustique - comparaison entre la mesure expérimentale et le calcul numérique

de détail pris en compte dans le maillage du système. Le modèle est représentatif jusqu'à environ 2000 Hz. Au-delà de cette fréquence, le modèle doit être amélioré.

Pour augmenter la bande de fréquence dans laquelle le modèle est valide, il faut être capable de trouver les éléments (boîtier, source, ...) ou les phénomènes physiques (couplage, cavité ouverte, ...) manquants et de faire un choix sur la façon de les prendre en compte.

3.2 Conception d'un prototype à géométrie simplifiée et analyse numérique

L'utilisation de la méthode des plans d'expériences, présentée dans les chapitres suivants, nécessitait d'effectuer des mesures sur un téléphone qu'il faut modifier plusieurs fois pour obtenir toutes les combinaisons de facteur requises par le plan d'expériences. Une approche originale a été proposée pour répondre à ce besoin. Si, au lieu de prendre un téléphone existant pour le modifier, un prototype dont la géométrie est très simple est créé, il sera alors très facile de concevoir et fabriquer les éléments nécessaires à la réalisation des diverses combinaisons de

facteur. Cette approche présente d'autres avantages : La géométrie simple permet pour certains phénomènes une résolution analytique, elle facilite grandement la modélisation numérique et elle permet aussi d'interpréter plus facilement les phénomènes physiques.

Le prototype est conçu à partir des dimensions approximatives d'un téléphone réel et des mêmes matériaux. Le haut-parleur, la grille devant le haut-parleur ainsi que le microphone sont des équipements réels de téléphone mains-libres de la compagnie. Ce prototype est montré à la figure 9.

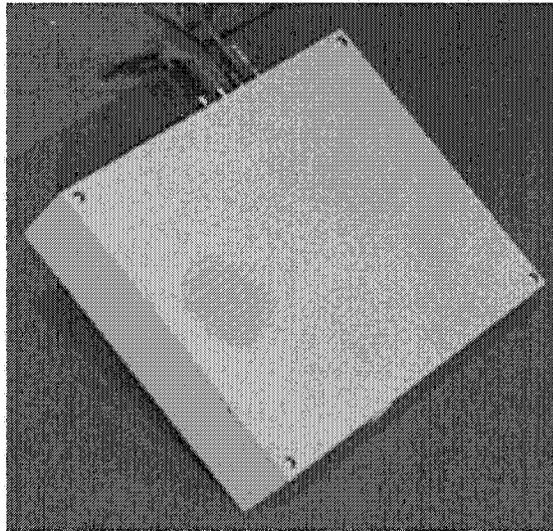


Figure 9 Prototype de téléphone mains-libres utilisé

Dans cette section, la modélisation numérique de ce prototype est présentée ainsi que les interprétations physiques associées.

Le haut-parleur, différent de celui du modèle de téléphone précédent, a d'abord été caractérisé. La figure 10 représente le premier mode de la membrane du haut-parleur provenant d'une analyse modale expérimentale comparé à celui trouvé avec une analyse modale numérique. L'écart en fréquence entre ces deux résultats est inférieur à 5 %, ce qui est acceptable compte tenu des écarts expérimentaux sur ce premier mode pour plusieurs haut-parleurs du même modèle.

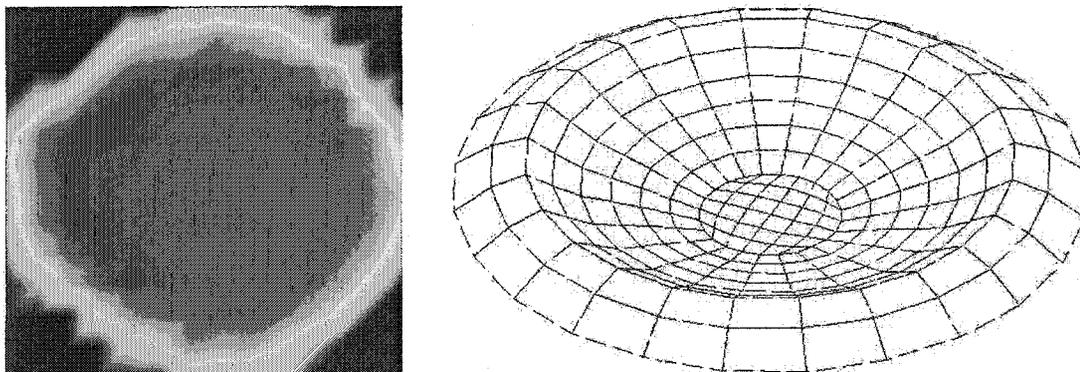


Figure 10 Prototype - premier mode vibratoire du haut-parleur - mesure $F = 313$ Hz - calcul $F = 300$ Hz

La figure 11 représente le maillage vibratoire complet utilisé pour ce modèle. Les mêmes critères que pour le téléphone précédent ont été utilisés pour faire les maillages.

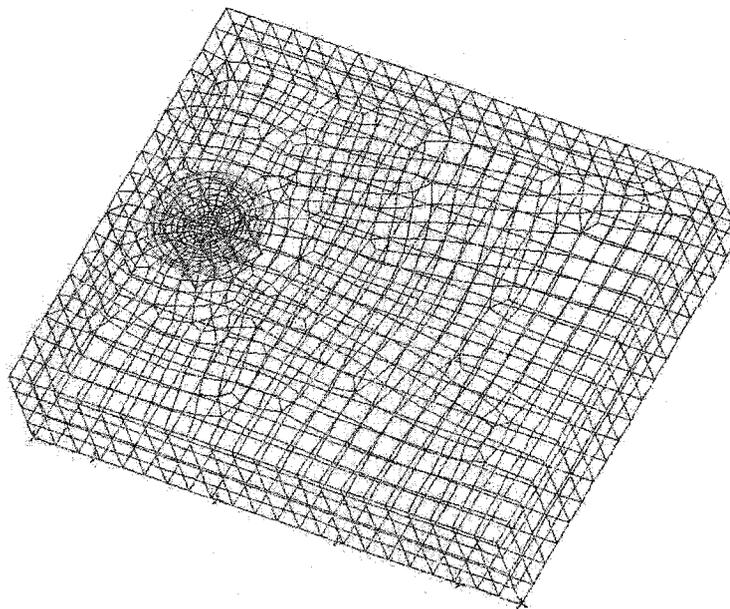


Figure 11 Maillage structural d'un prototype de téléphone

Le modèle permet ensuite de calculer les modes vibratoires du système ainsi que les modes acoustiques. Un exemple est représenté dans la figure 12 pour le premier mode vibratoire et le premier mode de cavité.

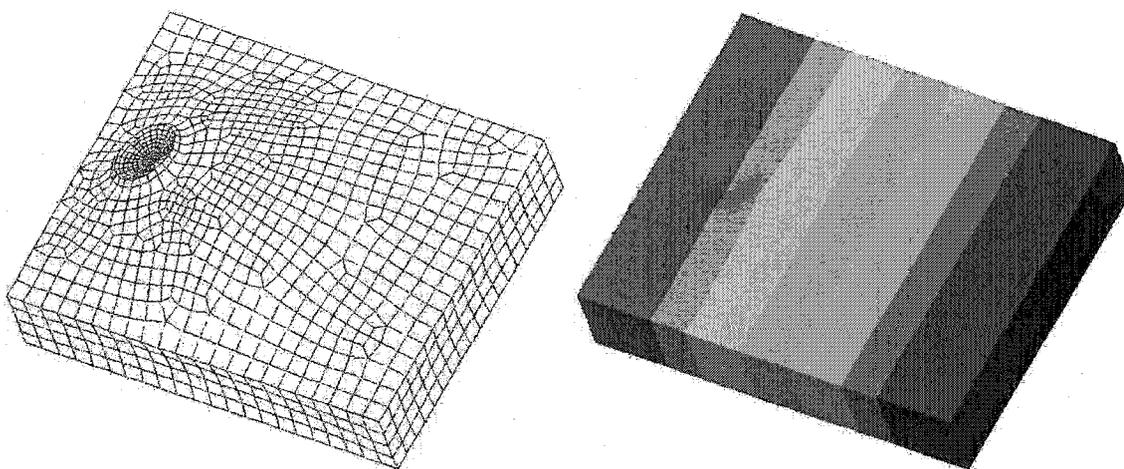


Figure 12 Prototype - premier mode vibratoire $F = 145$ Hz - premier mode de cavité $F = 792$ Hz

Pour le prototype, une mesure supplémentaire permettant de valider le modèle a été proposée. Cette mesure a été faite à l'aide d'un microphone de téléphone, étalonné approximativement en comparaison avec un microphone de mesure. Cette mesure représente le niveau de pression en un point situé dans un coin (pour voir le maximum de mode) à l'intérieur de la cavité du boîtier. Le tableau I présente une comparaison entre le modèle analytique de cavité à parois rigides présenté dans l'annexe 1, le modèle numérique du prototype et les résultats de la mesure.

La figure 13 représente cette mesure expérimentale ainsi que les premiers modes vibratoires visibles et tous les modes acoustiques de cavité compris dans la bande de fréquence d'intérêt, calculés numériquement et identifiés sur la mesure.

L'analyse détaillée de cette figure permet d'identifier un mode de plaque à environ 220 Hz, ainsi que le premier mode de membrane à 340 Hz. Cette figure explique l'importance des amplitudes retrouvées dans les différents modes de cavité. Les modes, dont l'amplitude est importante, sont représentés en haut de la figure. Pour ces modes, la source vibratoire (la membrane du haut-parleur) est située à proximité d'un ventre du mode acoustique. Pour les modes acoustiques représentés en bas de la figure, la source vibratoire est localisée dans une

ligne nodale du mode comme le montre la figure. Cette mesure permet d'expliquer et donc de valider le calcul modal acoustique entre 0 et 2500 Hz.

Tableau I

Comparaison entre les fréquences des modes de cavité calculées analytiquement, numériquement et mesurées à l'aide du prototype

Mode	Fréquence analytique (Hz)	Fréquence I-DEAS (Hz)	Fréquence expérimentale (Hz)	erreur %
(0,0,0)	0	0	0	0
(1,0,0)	793	787	800	1,6
(0,1,0)	972	957	975	1,8
(1,1,0)	1254	1242	1270	2,2
(2,0,0)	1585	1577	1610	2
(2,1,0)	1859	1970		
(0,2,0)	1944	1968	2070	5
(1,2,0)	2099	2138	2240	4,5
(3,0,0)	2378	2398	2400	0
(2,2,0)	2508	2563		
(3,1,0)	2569	2623		
(0,3,0)	2915	2982		

La représentation suivante (figure 14) est la comparaison entre le modèle numérique et la mesure expérimentale de la réponse acoustique du système. Cette figure montre la précision du modèle pour la gamme de fréquence considérée.

L'utilisation du prototype a permis d'améliorer la compréhension des phénomènes liés à la cavité. Néanmoins, la limite en fréquence reste encore assez faible (2500 Hz) compte tenu de la bande de fréquence d'intérêt pour la téléphonie classique (3400 Hz) et du développement de la téléphonie large bande (7000 Hz). Comme pour le téléphone réel, les données expérimentales disponibles pour faire ces modèles n'ont donc pas permis de faire les bons choix sur les éléments à modéliser.

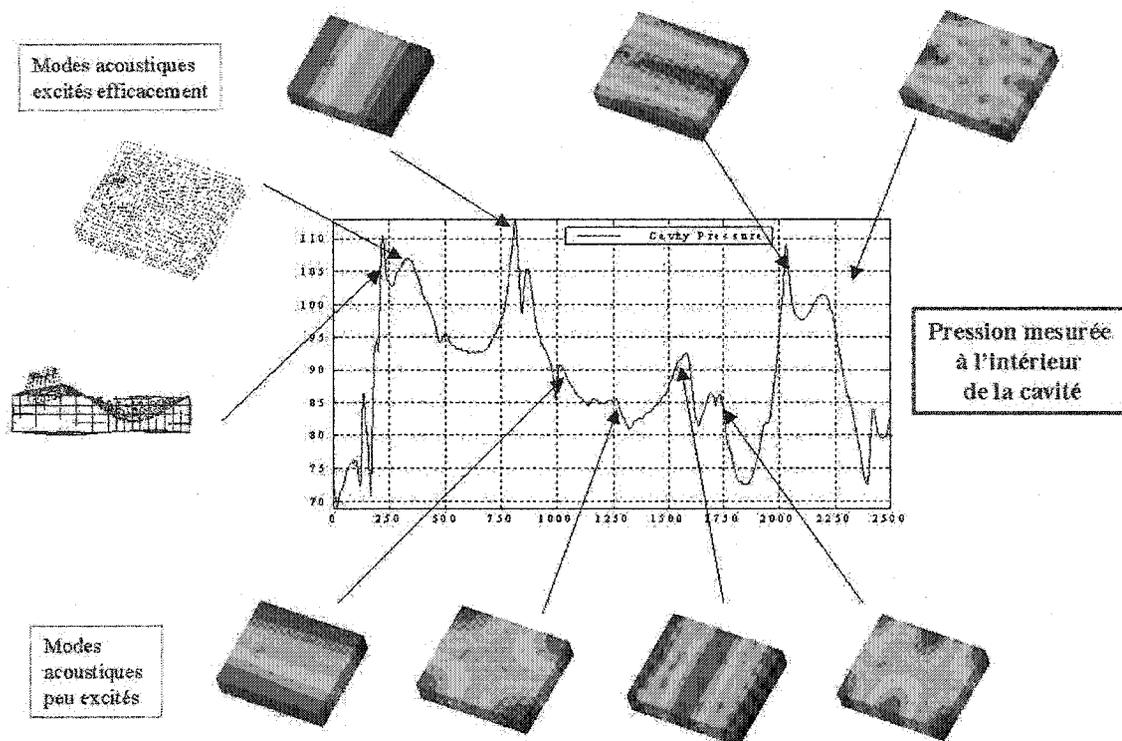


Figure 13 Prototype - identification des modes de cavité calculés sur une mesure de pression dans un coin à l'intérieur de la cavité

3.3 Conclusion sur les travaux préliminaires

Les résultats des premières modélisations ont mis en évidence la nécessité de choisir judicieusement les éléments à modéliser et le niveau de détail à prendre en compte, afin de pouvoir accroître la bande de fréquence dans laquelle le modèle peut être utilisé. Les méthodes classiques de caractérisation expérimentale ne permettent pas d'obtenir suffisamment d'informations, ces modèles ont mis en évidence la nécessité d'étudier et d'identifier les phénomènes physiques avec une méthode plus complète.

Pour cela, l'utilisation de la méthode des plans d'expériences est proposée. Cette méthode, présentée dans le chapitre 4 et adaptée pour l'acoustique à l'analyse en fréquence, va servir d'outil d'aide à la décision sur le niveau de détail et sur le choix des modèles.

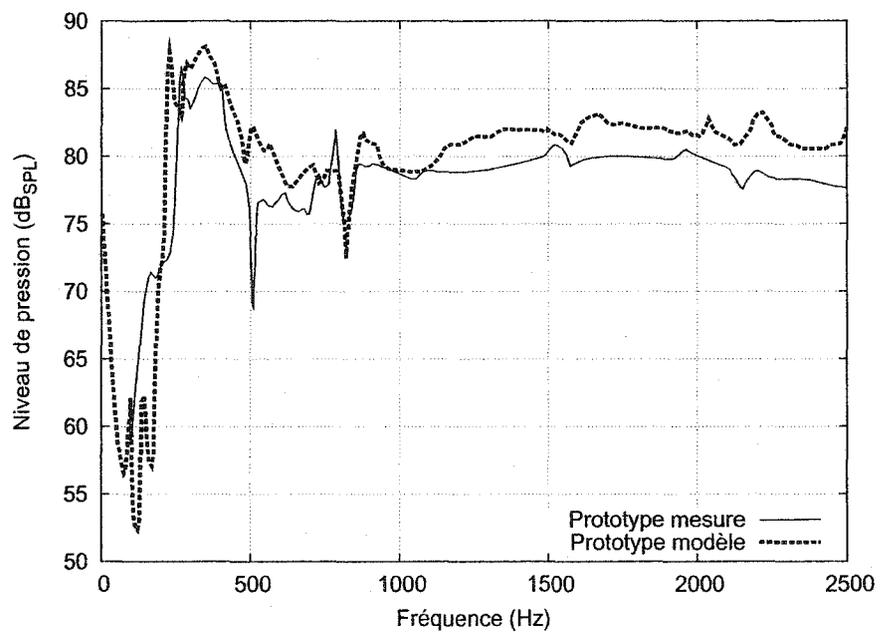


Figure 14 Prototype - réponse acoustique - comparaison entre la mesure expérimentale et le calcul numérique

CHAPITRE 4

ADAPTATION DE LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES À L'ACOUSTIQUE

Un plan d'expériences est une méthode qui permet d'établir des relations entre les causes (facteurs) et les effets (réponses). Cette méthode est une analyse statistique d'une série d'expériences dans laquelle toutes les variables varient en même temps. Le nombre d'expériences est optimisé grâce à l'utilisation de tables orthogonales.

La méthode des plans d'expériences est ici utilisée pour faire une étude expérimentale d'un système acoustique. L'utilisation de cette méthode à l'acoustique nécessite une adaptation spécifique de la méthode.

Après l'énoncé des principes des plans d'expériences, ce chapitre propose un exemple simple présentant les intérêts de la méthode sur les résultats expérimentaux. Ensuite, la méthode utilisée dans ce document ainsi que les relations mathématiques utiles sont exposées, et enfin, les adaptations faites pour utiliser cette méthode dans le domaine de l'acoustique sont décrites.

4.1 Principes des plans d'expériences

Pour déterminer l'influence des facteurs sur un système, lorsque celui-ci est défini, la méthode classique consiste à tester l'effet des facteurs sur une réponse choisie en ne faisant varier qu'un seul facteur à la fois à chaque expérience. Les autres facteurs sont alors maintenus constant dans un état quelconque. Dans le cas où tous les facteurs sont indépendants, l'analyse permet de trouver l'effet du facteur étudié. Si les facteurs ne sont pas indépendants, l'effet du facteur trouvé est conditionnel de l'état dans lequel se trouve les autres facteurs du système. L'utilisation de la méthode classique signifie implicitement que l'effet de chaque facteur est totalement indépendant de l'effet des autres facteurs. Toutefois, la dépendance entre les facteurs n'est ni étudiée ni évaluée. Pour vérifier cette hypothèse, il est nécessaire de modifier les autres facteurs plusieurs fois et de recommencer à chaque fois l'étude sur le facteur initiale.

Par opposition à la méthode classique, le principe des plans d'expériences est l'utilisation de tables orthogonales pour concevoir et structurer une série d'expériences ainsi que pour en extraire les résultats. L'effet d'un facteur calculé à partir de cette méthode est un effet moyen tenant compte de toutes les possibilités sur l'état des autres facteurs. Lors des mesures, tous les facteurs vont varier en même temps, suivant un ordre défini dans une table orthogonale. L'utilisation de cette table apporte de nombreux avantages. Premièrement, chaque information provient de toutes les mesures du plan d'expériences. Il y a donc une meilleure précision dans les données récupérées. Deuxièmement, ce type d'étude permet d'obtenir non seulement des informations sur l'effet des facteurs, mais aussi sur les interactions entre les différents facteurs pour le même nombre d'expériences. Troisièmement, l'effet d'un facteur est indépendant de l'effet des autres facteurs. L'effet est appelé effet absolu. Dans la méthode classique, l'étude d'un facteur se fait en maintenant tous les autres constants. L'effet du facteur trouvé dépend donc de la configuration des autres facteurs. L'effet est appelé effet conditionnel : le facteur A a tel effet à condition que le facteur B soit dans tel état.

Soit, un système ou un procédé tel que défini dans la figure 15. Ce système, par exemple

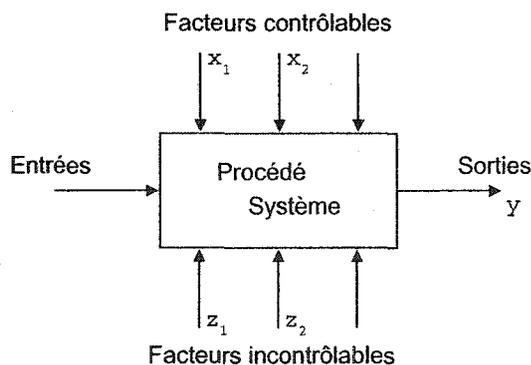


Figure 15 Représentation d'un système ou principe avec tous les éléments reliés au système

un véhicule ou un téléphone mains-libres dans le cas présent, est défini par des entrées et des sorties. Celles-ci peuvent être : soit le produit transformé, soit une mesure de qualité du produit. Le système est aussi défini par différents facteurs, contrôlables ou non. Le but d'un plan d'expériences est d'optimiser le système en fonction de la sortie désirée. Les applications

sont l'amélioration soit du procédé ou de la fiabilité, ou la diminution du coût ou du temps de développement.

4.2 Tables orthogonales

La méthode des plans d'expériences repose sur la théorie des tables orthogonales. Une table orthogonale est une matrice dans laquelle chaque colonne est un vecteur, et tous les vecteurs sont orthogonaux deux à deux. L'orthogonalité permet de calculer l'effet de chaque colonne. Celui-ci est indépendant des effets des autres colonnes.

Le principe des plans d'expériences est de concevoir les expériences en fonction de tables orthogonales et d'utiliser des méthodes statistiques afin de mener à bien l'analyse.

Si chaque ligne de la table représente la description d'une expérience et que chaque colonne sur une ligne représente l'état d'un facteur dans l'expérience correspondante, alors, grâce aux propriétés des tables orthogonales, il est possible d'extraire l'influence de chaque facteur sur le système à partir d'un nombre d'expériences choisi avec un degré de confiance correspondant au nombre d'expériences total.

4.3 Mise en place du plan d'expériences

Le schéma suivant (figure 16) présente les différentes étapes à suivre pour la mise en place d'un plan d'expériences.

Le déroulement d'une analyse, à l'aide d'un plan d'expériences avec choix des paramètres, suit les étapes suivantes. D'abord, la définition du système ainsi que de la réponse du système à connaître ou modéliser, ainsi que les facteurs susceptibles de modifier cette réponse. La liste des facteurs doit être la plus complète possible pour ensuite être réduite aux facteurs à tester dans le plan d'expériences. Les autres facteurs (non testés) sont alors considérés comme négligeables ou devront être maintenus à un état constant. Ensuite, le nombre de facteurs pour l'étude, ainsi que le nombre de niveaux est défini. Dans le cadre de cette étude, à chaque facteur deux (2) niveaux sont associés. Le nombre de facteur permet ensuite de choisir le

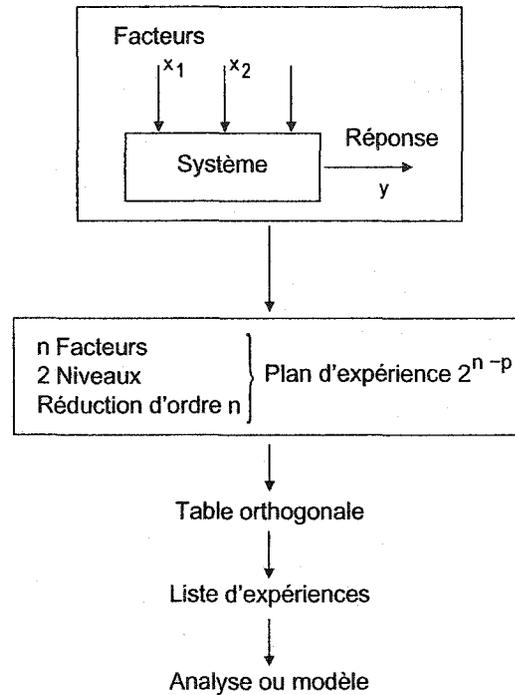


Figure 16 Mise en place d'un plan d'expériences en plusieurs étapes

niveau de précision du plan d'expériences en fonction de la réduction choisie. L'étape suivante est la définition de la table orthogonale correspondante au plan d'expériences. Cette table orthogonale constitue la liste des expériences. Enfin, l'analyse statistique peut être réalisée à partir des résultats des expériences.

4.4 Illustration de l'intérêt de la méthode des plans d'expériences

Dans cette partie, la méthode des plans d'expériences est comparée à une méthode traditionnelle. Dans la méthode des plans d'expériences, tous les facteurs à évaluer sont modifiés à chaque expérience contrairement à la méthode classique où l'étude des facteurs se fait de façon indépendante. Deux avantages en découlent. Premièrement, la précision de la mesure pour le même nombre d'expériences est plus grande. Deuxièmement, l'effet du facteur calculé est indépendant de l'effet des autres facteurs. La méthode sera d'abord illustrée par un exemple simple. La théorie sera ensuite expliquée.

Soit un système dépendant de trois (3) facteurs A, B et C . Pour mesurer l'effet de ces facteurs, quatre (4) expériences sont faites. La valeur de chacune des mesures est notée y_i avec $i = 1, 2, \dots, n$. La variance de chaque mesure est considérée identique et égale à $V(y)$.

Les notations utilisées dans cette section sont inspirées de l'ouvrage de D.C. Montgomery [29] sur la méthode des plans d'expériences cité en référence.

4.4.1 Étude de la précision de la mesure

Dans un premier temps, une étude sur la différence de la variance du résultat en fonction de la méthode expérimentale utilisée est présentée.

4.4.1.1 Selon la méthode classique (un facteur à la fois)

Le tableau II présente la liste des expériences.

Tableau II

Liste d'expériences selon la méthode classique

mesures	A	B	C
y_1	-1	-1	-1
y_2	1	-1	-1
y_3	-1	1	-1
y_4	-1	-1	1

L'effet des facteurs est calculé avec les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Effet}(A) = y_2 - y_1, \\ \text{Effet}(B) = y_3 - y_1, \\ \text{Effet}(C) = y_4 - y_1. \end{array} \right.$$

Chaque relation représente la variation d'un seul facteur, ainsi que la conservation de tous les autres facteurs à leur état initial.

La variance sur les effets est calculée en fonction de la variance sur les mesures initiales, soit pour le facteur A.

$$\begin{aligned} V[\text{Effet}(A)] &= V(y_2 - y_1), \\ &= V(y_2) + V(y_1), \\ &= 2V(y). \end{aligned}$$

4.4.1.2 Selon la méthode des plans d'expériences

Une étude avec un plan d'expériences du même système avec trois (3) facteurs peut se faire aussi avec un plan d'expériences factoriel complet. Ce genre d'analyse nécessite $2^3 = 8$ expériences et une table orthogonale. Afin de comparer avec l'étude précédente un plan d'expériences factoriel fractionné est utilisé. Ce choix permet d'avoir le même nombre d'expériences que pour la méthode classique, c'est-à-dire $2^{3-1} = 4$ expériences. Le tableau III présente la liste des expériences. Les trois vecteurs du tableau A, B et C sont orthogonaux.

Tableau III

Liste d'expériences pour le plan d'expériences fractionné - Table orthogonale

mesures	A	B	C
y_1	-1	1	-1
y_2	1	1	1
y_3	1	-1	-1
y_4	-1	-1	1

L'effet des facteurs est calculé à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} \text{Effet}(A) = \frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4}{2}, \\ \text{Effet}(B) = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{2}, \\ \text{Effet}(C) = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{2}. \end{cases}$$

La variance du facteur A est :

$$\begin{aligned} V[\text{Effet}(A)] &= V\left(\frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4}{2}\right), \\ &= \frac{1}{4} 4V(y), \\ &= V(y). \end{aligned}$$

La variance obtenue avec l'utilisation de la méthode des plans d'expériences est inférieure d'un facteur deux par rapport à la variance obtenue avec les résultats provenant de la méthode classique pour le même nombre d'expériences.

4.4.2 Effet des interactions

Le deuxième avantage des plans d'expériences est la quantification des interactions entre les facteurs au même titre que la quantification des effets des facteurs. Avec le plan d'expériences précédent, compte tenu de la dimension réduite (fractionnée) du plan d'expériences, il n'était pas possible d'évaluer l'effet des interactions. Afin d'évaluer cet effet, le même plan d'expériences factoriel est utilisé, cependant celui-ci est ici un plan factoriel complet. Ce plan d'expériences complet est comparé à la méthode classique dans laquelle une répétition des mesures précédentes est faite.

4.4.2.1 Selon la méthode classique

Le tableau IV présente la liste des expériences.

Les mesures y_5 , y_6 , y_7 et y_8 sont des répétitions respectivement des mesures y_1 , y_2 , y_3 et y_4 .

Tableau IV

Liste d'expériences selon la méthode classique

mesures	A	B	C
y_1	-1	-1	-1
y_2	1	-1	-1
y_3	-1	1	-1
y_4	-1	-1	1
y_5	-1	-1	-1
y_6	1	-1	-1
y_7	-1	1	-1
y_8	-1	-1	1

L'effet des facteurs est calculé

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Effet}(A) = -y_1 + y_2 - y_5 + y_6, \\ \text{Effet}(B) = -y_1 + y_3 - y_5 + y_7, \\ \text{Effet}(C) = -y_1 + y_4 - y_5 + y_8. \end{array} \right.$$

La variance sur les effets est calculée en fonction de la variance sur les mesures initiales, soit pour le facteur A.

$$\begin{aligned}
 V[\text{Effet}(A)] &= V\left(\frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_6}{2}\right), \\
 &= \frac{1}{4} 4V(y), \\
 &= V(y).
 \end{aligned}$$

Le fait d'ajouter des expériences augmente la précision de la mesure, mais n'apporte pas d'informations supplémentaires.

4.4.2.2 Selon la méthode des plans d'expériences

L'étude avec un plan d'expériences factoriel complet du même système avec trois (3) facteurs comporte $2^3 = 8$ expériences. Celles-ci sont présentées dans le tableau V.

Tableau V

Liste d'expériences selon le plan d'expériences complet - Table orthogonale

mesures	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
y_1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
y_2	1	1	1	1	1	1	1
y_3	1	-1	-1	-1	-1	1	1
y_4	-1	-1	1	1	-1	-1	1
y_5	-1	-1	-1	1	1	1	-1
y_6	1	-1	1	-1	1	-1	-1
y_7	1	1	-1	1	-1	-1	-1
y_8	-1	1	1	-1	-1	1	-1

L'effet des facteurs est calculé à partir des relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Effet}(A) = \frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4}{4} + \frac{-y_5 + y_6 + y_7 - y_8}{4}, \\ \text{Effet}(B) = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4} + \frac{-y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}, \\ \text{Effet}(C) = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} + \frac{-y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}. \end{array} \right.$$

La variance du facteur A est :

$$\begin{aligned} V[\text{Effet}(A)] &= V\left(\frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4}{4} + \frac{-y_5 + y_6 + y_7 - y_8}{4}\right), \\ &= \frac{1}{16} 4V(y) + \frac{1}{16} 4V(y), \\ &= \frac{V(y)}{2}. \end{aligned}$$

La variance de cette mesure est toujours inférieure d'un facteur deux par rapport à celle de la méthode classique. Par contre dans ce cas, des informations supplémentaires sont disponibles. En effet, en composant les vecteurs AB , AC , BC et ABC comme dans les quatre dernières colonnes du tableau V, il est possible, avec la même méthode utilisée pour déterminer les effets des facteurs, de déterminer les effets des interactions doubles et de l'interaction triple, par exemple :

$$\text{Effet}(AC) = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4} + \frac{y_5 + y_6 - y_7 - y_8}{4}. \quad (4.1)$$

La variance de l'interaction AC est la même que celle des facteurs présentés précédemment car le même nombre d'expériences est utilisé pour calculer l'effet des interactions.

4.5 Adaptation de la méthode pour l'acoustique

L'analyse sur des grandeurs normalisées en fonction de l'erreur (utilisées habituellement dans l'analyse par plans d'expériences) ne permet pas d'interpréter les résultats au mieux. Il a donc été choisi de garder les unités de mesure dans la représentation des résultats sous forme d'effet de facteur. Ceci n'est pas habituel mais est quelque fois utilisé dans les représentations sous la forme de diagramme de Pareto.

La méthode des plans d'expériences est une méthode plus souvent utilisée à partir de mesures discrètes sur une série d'expériences. Dans le cas de l'acoustique il est nécessaire de travailler sur des fonctions continues. Ces fonctions (les réponses des mesures acoustiques) sont en fait des vecteurs de données. Aucune représentation satisfaisante n'a été trouvée pour travailler sur des réponses qui dépendent de la fréquence. Il a donc fallu proposer une nouvelle façon de représenter les résultats d'analyse de plan d'expériences par rapport aux représentations habituelles. Plusieurs essais ont mené à la représentation présentée ici.

Cette partie présente ces deux aspects liés à l'utilisation des plans d'expériences en acoustique : premièrement, l'utilisation des données sous forme de grandeur physique pour l'interprétation et, deuxièmement, la représentation des résultats en fonction de la fréquence.

4.5.1 Évaluation de l'effet en grandeurs physiques

Les mesures étant faites en dB dans le plan d'expériences, il est plus judicieux de conserver cette grandeur physique pour l'analyse des résultats sur les effets du plan d'expériences. Dans le cas habituel, l'effet d'un facteur est jugé significatif à partir d'un test statistique : le test de Fisher, noté F_{test} . Une grandeur appelée limite de signification, dérivée du test de Fisher, va permettre de faire les analyses sur les effets des facteurs directement en dB. Cette grandeur va être expliquée ici à partir d'un exemple de plan d'expériences à deux facteurs. Cet exemple présenté dans le tableau VI va permettre de présenter les formules de base utilisées dans l'analyse des plans d'expériences.

Tableau VI

Exemple d'un plan d'expériences à deux facteurs ($k = 2$) avec deux mesures ($n = 2$)

A	B	AB	Traitements	Mesure 1	Mesure 2
-	-	+	(1) = $Lp_1 + Lp_5$	Lp_1	Lp_5
+	-	-	$a = Lp_2 + Lp_6$	Lp_2	Lp_6
-	+	-	$b = Lp_3 + Lp_7$	Lp_3	Lp_7
+	+	+	$ab = Lp_4 + Lp_8$	Lp_4	Lp_8

L'effet du facteur A se calcule avec la relation

$$\text{Effet}(A) = \frac{C_A}{2^{k-1}n}, \quad (4.2)$$

dans laquelle le contraste de A (C_A) est défini par la relation suivante :

$$C_A = ab + a - b - (1) = (Lp_4 + Lp_8 + Lp_2 + Lp_6) - (Lp_3 + Lp_7 + Lp_1 + Lp_5). \quad (4.3)$$

L'importance de l'effet du facteur A est déterminée en comparant la somme des carrés moyens de A (MS_A) avec la somme des carrés moyens de l'erreur (MS_E) à l'aide du test de Fisher (F_{test}).

Soit :

$$MS_A = \frac{SS_A}{df(A)}, \quad (4.4)$$

avec la somme des carrés du facteur A (SS_A) :

$$SS_A = \frac{C_A^2}{2^k n}, \quad (4.5)$$

et $df(A)$ le nombre de degré de liberté du facteur A :

$$df(A) = (\text{nombre de degré de liberté total de } A) - 1 = 2 - 1 = 1. \quad (4.6)$$

La somme des carrés de l'erreur est obtenue en soustrayant à la somme totale des carrés (SS_T), la somme des carrés de chaque effet (facteurs et interactions) :

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}. \quad (4.7)$$

La somme des carrés moyens de l'erreur (MS_E) est calculée en divisant la somme des carrés de l'erreur par le nombre de degré de liberté réservé à l'erreur ($df(E)$), soit $(n - 1)$ degrés de liberté pour chaque 2^k traitements :

$$MS_E = \frac{SS_E}{df(E)}, \quad (4.8)$$

$$= \frac{SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}}{2^k(n - 1)}, \quad (4.9)$$

avec

$$SS_T = \sum_{i=1}^8 (Lp_i - \text{moyenne})^2. \quad (4.10)$$

Dans l'approche classique des plans d'expériences, pour savoir si un facteur est efficace avec un niveau de confiance α , il faut comparer le rapport $\frac{MS_A}{MS_E}$ à la valeur de Fisher correspondante au degré de liberté des deux variables à comparer $df(A)$ et $df(E)$, soit : $F_{test} = F_{\alpha, df(A), df(E)}$. Dans l'approche proposée, la comparaison se fait entre l'effet en dB et une limite de signification notée SL_A correspondant à la valeur du test de Fisher définie précédemment et convertie en dB avec les relations suivantes :

$$SL_A = \frac{C_{Alim}}{2^{k-1}n}, \quad (4.11)$$

avec

$$C_{Alim} = \sqrt{2^k n MS_{Alim}}. \quad (4.12)$$

Soit

$$SL_A = \sqrt{\frac{2^k n MS_{Alim}}{(2^{k-1} n)^2}} = \sqrt{\frac{MS_{Alim}}{2^{k-2} n}}, \quad (4.13)$$

avec

$$MS_{Alim} = MS_E F_{\alpha, df(A), df(E)}, \quad (4.14)$$

donc

$$SL_A = \sqrt{\frac{MS_E F_{\alpha, df(A), df(E)}}{2^{k-2} n}}. \quad (4.15)$$

Cette limite de signification est la même pour tous les facteurs ayant un degré de liberté égal à un (1).

4.5.2 Représentation des effets en fonction de la fréquence

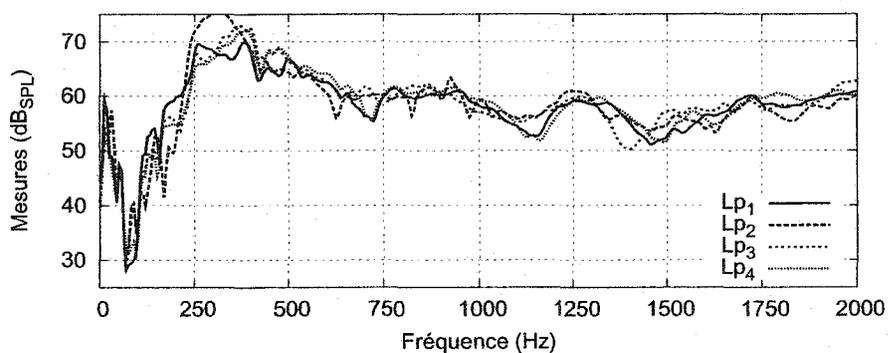
Les mesures qui vont servir à étudier l'acoustique du système sont des mesures de pression qui dépendent de la fréquence. Un échantillon de plusieurs mesures est présenté dans la courbe 17(a).

Le calcul de l'effet d'un facteur va permettre d'obtenir une grandeur qui dépend de la fréquence. Il est aussi possible de calculer la limite de signification qui dépend également de la fréquence. La courbe 17(b) est la *première représentation* de l'effet d'un facteur. L'effet est représenté en trait continu et la courbe de limite de signification en trait discontinu. La limite est tracée en valeur positive et en valeur négative. L'analyse d'une telle figure peut se faire de la façon suivante : si la courbe d'effet reste à l'intérieur de la limite de signification alors l'effet est jugé non significatif; si la courbe d'effet dépasse dans le sens positif ou négatif la limite de signification alors l'effet est jugé significatif. L'effet significatif du facteur peut alors être évalué de façon précise en fonction de la fréquence.

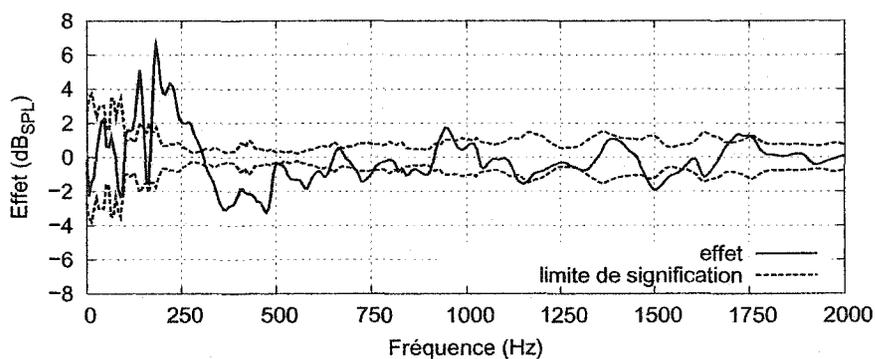
Une *deuxième représentation* où les grandeurs précédentes (effet et limite de signification) sont ajoutées à la réponse moyenne des mesures est proposée. Cette représentation est présentée sur la courbe 17(c). L'interprétation peut se faire de la même façon que pour la représentation précédente, à la différence que, cette fois-ci, il est possible de voir la réponse du système. Cette représentation apporte des éléments supplémentaires pour l'interprétation, mais rend le graphique moins lisible.

4.6 Conclusion sur la méthode présentée

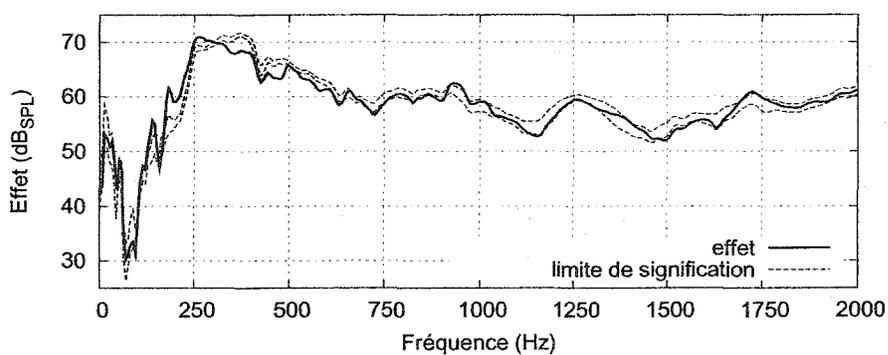
La méthode proposée permet de caractériser expérimentalement un système dans le but de faire un modèle de prédiction de ce système. Cette méthode apporte beaucoup d'avantages par rapport à une méthode classique de caractérisation expérimentale. Le principe de cette méthode est d'appliquer une méthode d'analyse statistique par plan d'expériences à l'acoustique en apportant des adaptations afin de permettre l'analyse des phénomènes physiques. Une liste d'expériences à l'aide d'une table orthogonale dans laquelle tous les facteurs varient en



(a) Échantillon de mesure de pression utilisé pour le calcul des effets des facteurs



(b) Première représentation de l'effet d'un facteur ainsi que celle de la limite de signification (effet seul)



(c) Deuxième représentation de l'effet d'un facteur ainsi que de la limite de signification (effet + valeur moyenne de la réponse)

Figure 17 Principe de la représentation des résultats proposés pour un plan d'expériences acoustique

même temps est utilisée. Ensuite, les propriétés de la table orthogonale permettent d'extraire les effets de chacun des facteurs.

Chaque effet est évalué à partir de toutes les expériences. Pour un même nombre d'expériences qu'avec une méthode classique, la précision sur la mesure d'une variable est augmentée. L'exemple précédent a permis de calculer une diminution d'un facteur deux (2) sur la variance.

De plus, le fait de faire varier tous les facteurs lors de chaque expérience permet de mesurer un effet qui ne dépend pas de l'état des autres facteurs. Dans la méthode des plans d'expériences, l'effet est dit inconditionnel, alors que dans la méthode classique dont la technique est de faire varier un facteur à la fois, l'effet est dépendant de la configuration des autres facteurs, c'est un effet conditionnel.

Contrairement aux approches disponibles dans la littérature qui ne permettent que l'observation d'une seule variable dépendante, l'approche proposée permet l'observation de l'ensemble des variables dépendantes sous la forme d'un spectre en fréquence. C'est l'originalité principale de la méthode. Les deux autres originalités de la méthode sont la représentation des effets en grandeur habituelle pour l'acoustique, le dB et la représentation dans cette même grandeur des limites de signification. Le résultat est la possibilité de juger sur deux graphiques la signification ou non de l'effet, de son importance en dB et ceci sur l'ensemble des fréquences mesurées.

CHAPITRE 5

UTILISATION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE POUR LA CARACTÉRISATION DE L'EFFET DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX SUR LA RÉPONSE ACOUSTIQUE D'UN TÉLÉPHONE MAINS-LIBRES

Ce chapitre présente la caractérisation d'un téléphone mains-libres à l'aide de la méthode des plans d'expérience. Cette caractérisation va permettre de déterminer l'influence des éléments structuraux du système.

La méthode des plans d'expériences a été présentée dans le chapitre 4. C'est une méthode qui permet de déterminer l'effet de paramètres, ou facteurs, sur la réponse d'un système. Pour cela, une analyse systématique est faite à l'aide d'une table orthogonale. Cette table définit avec exactitude toutes les expériences nécessaires pour l'étude du système. L'utilisation d'une table orthogonale permet aussi de trouver les effets des facteurs en les faisant varier en même temps à chaque expérience. Le nombre d'expériences est alors réduit. De plus, des informations sur les interactions entre les facteurs sont disponibles. L'effet, ainsi défini, est indépendant des effets des autres facteurs, et il est établi avec une grande précision. Par ailleurs, la méthode développée spécifiquement pour le domaine de l'acoustique facilite l'analyse des phénomènes physiques car l'analyse et la représentation pour chaque facteur sont réalisées sur toute la bande de fréquence importante en conservant les grandeurs physiques de mesure : le décibel (dB).

Ce chapitre est découpé en deux parties. Dans la première partie, le système à analyser (un prototype de téléphone mains-libres) est défini ainsi que les paramètres d'analyse suivants : la variable de réponse mesurée à chaque expérience, les facteurs choisis en fonction de leurs effets présumés avec chacun deux états différents (niveaux) pour l'analyse de leur signification et, enfin, le plan d'expériences choisi associé à la table orthogonale correspondante. Dans la deuxième partie, les résultats des analyses du plan d'expériences sont présentés. D'abord les analyses détaillées de tous les facteurs, ensuite compte tenu du peu d'effet constaté, l'analyse générale des interactions doubles.

5.1 Définition du plan d'expériences

La réalisation d'un plan d'expériences nécessite la mise au point de différents paramètres : un système, les réponses ou variables à mesurer et les facteurs à faire varier dans les expériences.

5.1.1 Système

Le système est l'appareil ou le dispositif qui va être modifié et mesuré durant le plan d'expériences. Le système étudié est un prototype représentant un téléphone mains-libres dont la géométrie a été simplifiée.

Pour ces expériences, comme il a été expliqué dans la section 3.2, les prototypes à géométrie simplifiée sont utilisés afin de simplifier la réalisation des montages du plan d'expériences et la compréhension physique des phénomènes.

5.1.2 Réponses

Les réponses sont les variables mesurées qui vont servir à évaluer la performance du système. Pour les téléphones mains-libres, ces variables, définies par l'ITU, sont présentées dans la section 1.1.1. Elles sont au nombre de trois et représentent :

1. Le signal acoustique émis par le haut-parleur et reçu par l'utilisateur;
2. Le signal acoustique émis par l'utilisateur et reçu par le microphone;
3. Le signal acoustique émis par le haut-parleur et reçu par le microphone.

L'étude principale pour le plan d'expériences va se faire avec la première des trois variables pour plusieurs raisons. D'abord, c'est sur cette variable (Réponse 1) que se trouve la plus grande difficulté d'interprétation et de modélisation. Ensuite, la réponse du microphone (Réponse 2) est assez indépendante de la conception mécanique du téléphone. En effet, ce problème est plutôt lié aux phénomènes de diffraction et de réflexion sur la table et l'extérieur du boîtier, ainsi que sur la propagation dans le conduit jusqu'au microphone. Enfin, le cou-

plage (Réponse 3) est la réponse du microphone du téléphone lorsqu'un signal est émis par le haut-parleur du téléphone. Cette réponse peut être obtenue à partir des deux (2) réponses précédentes.

La difficulté de l'interprétation du plan d'expérience repose dans l'étude des réponses. L'interprétation est faite ici grâce à la méthode proposée, présentée dans le chapitre 4 : une représentation graphique nouvelle et adaptée. Cette méthode permet l'analyse des effets en dB en fonction de la fréquence sur une réponse sous forme de *vecteur* de données (1602 points). La réponse en fréquence d'une des trois réponses est une courbe soit sur une largeur de bande de fréquence d'environ 3000 Hz en téléphonie classique, soit d'environ 7000 Hz en téléphonie large bande. C'est donc une réponse continue et non discrète. Cette représentation facilite l'interprétation des résultats. Il est donc possible de conclure pour chaque facteur s'il est influent ou non sur la réponse ainsi que la bande de fréquence dans lequel il est influent.

5.1.3 Facteurs

Les facteurs sont les éléments ou composants du système susceptibles de faire varier les réponses mesurées. Le choix des facteurs est fait en fonction de tous les éléments des *chemins de transmission* possibles entre l'excitation, c'est-à-dire le haut-parleur, et la réponse à modéliser. L'excitation est, en réalité, le signal électrique appliqué sur le haut-parleur. Ce signal est constant dans toute la bande de fréquence. La réponse a été identifiée dans la section précédente 5.1.2. Les chemins de transmission sont illustrés sur la figure 18.

Les effets évalués sont donc les effets des éléments placés sur les différents chemins de transmission entre l'excitation électrique du haut-parleur et le microphone de mesure à une distance de 50 cm du téléphone, c'est-à-dire :

- le rayonnement de la face avant du haut-parleur à travers la grille, chemin (1) sur la figure 18;
- le rayonnement de la face arrière du téléphone (chemin (2)). Celui-ci peut :

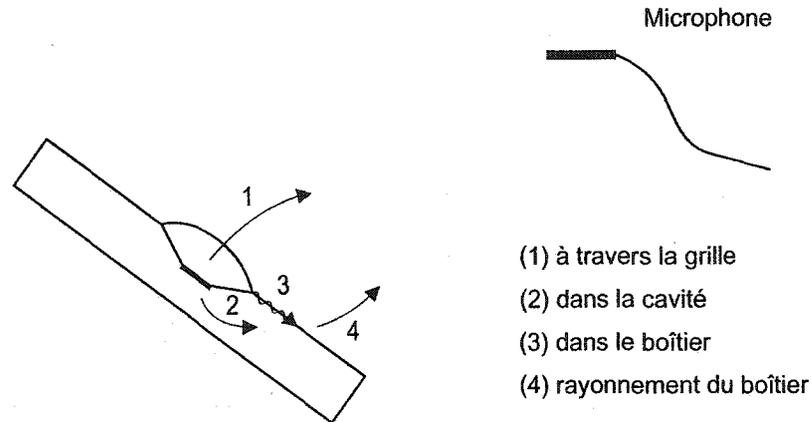


Figure 18 Chemins de transmission utilisés pour le choix des facteurs du plan d'expériences

- soit rayonner directement par l'intermédiaire de trou ou de fuite dans le boîtier (chemin (4));
- soit exciter le boîtier qui va rayonner à son tour (chemins (2), (3) et (4));
- la transmission vibratoire entre le haut-parleur et le boîtier (chemins (3) et (4)).

Les plans d'expériences sont utilisés afin de savoir si l'effet du facteur est significatif ou non sur la réponse, ceci afin de pouvoir choisir la meilleure façon de modéliser. Donc, pour chaque facteur, il est nécessaire de définir deux (2) niveaux suffisamment différents l'un de l'autre pour juger de cet effet.

- Effets de la structure (boîtier) : pour évaluer l'effet de la structure, la solution la plus efficace est de choisir deux configurations : l'une avec et l'autre sans boîtier. Lorsque le boîtier n'est plus présent, le système ne correspond plus au système étudié initialement. Il faut donc garder la structure et faire varier certaines caractéristiques. L'amortissement a été envisagé, mais n'a pas été retenu à cause de la difficulté de mise en œuvre. La solution retenue est d'agir sur la rigidité de la structure. L'effet de la structure sera donc évalué en rigidifiant le boîtier au maximum et cela en faisant varier l'épaisseur entre une épaisseur classique (3 mm) et une épaisseur importante (6 mm). Le facteur choisi

pour la structure est l'épaisseur du boîtier (facteur ÉPAISSEUR) qui aura donc deux (2) valeurs : 3 mm ou 6 mm.

Tableau VII

Facteurs et niveaux du plan d'expériences

Facteurs			Niveaux	
			-1	+1
A	Grille	Grille de protection du haut-parleur	sans	avec
B	Trou	Trous sur les cotés et la face avant du boîtier	sans	avec
C	Mousse	Mousse à l'intérieur du boîtier	sans	avec
D	Plaque	Composants placés à l'intérieur du boîtier	sans	avec
E	Fuite	Trous de petite taille (étanchéité)	sans	avec
F	Épaisseur	Épaisseur du boîtier	3 mm	6 mm

- Effets de la cavité : comme pour la structure, la cavité ne peut être retirée du système sans le changer complètement. La cavité peut néanmoins être modifiée de plusieurs façons. Premièrement, de la mousse est ajoutée à l'intérieur de la cavité. L'ajout de mousse va servir à supprimer l'effet de la cavité afin de savoir si elle doit être prise en compte dans le modèle. Deuxièmement, des obstacles équivalents aux composants électroniques mis habituellement dans un téléphone vont être insérés à l'intérieur de la cavité. Ce changement sert à déterminer quel degré de détail doit être pris en compte. Troisièmement, en faisant des ouvertures dans la structure afin de savoir si la cavité doit être considérée comme fermée ou non. Le nombre de facteurs choisi pour la cavité est de quatre (4). Le premier est de la mousse en polyuréthane à cellules ouvertes (facteur MOUSSE) placée à l'intérieur du boîtier. Le deuxième est une carte de composants électroniques (facteur PLAQUE) que l'on retrouve typiquement dans chaque téléphone. Les derniers facteurs sont des trous de différentes tailles dans le boîtier qui font que la cavité n'est plus parfaitement étanche. Les trous permettent d'étudier soit l'effet de fuite acoustique (facteur FUIITE), soit l'effet de cavité ouverte (facteur TROU). Ce dernier phénomène physique est utilisé afin d'amplifier les sons aux basses fréquences, il est appelé "Bass-Reflex".

- Effet de la grille devant le haut-parleur : la grille pourra être simplement présente ou absente dans les expériences (facteur GRILLE).

Hormis pour le facteur ÉPAISSEUR qui prend deux (2) valeurs distinctes, les deux (2) niveaux définis correspondent à la présence ou non du facteur. Le détail des facteurs et des niveaux définis pour chaque facteur utilisé dans le plan d'expériences est donné dans le tableau VII.

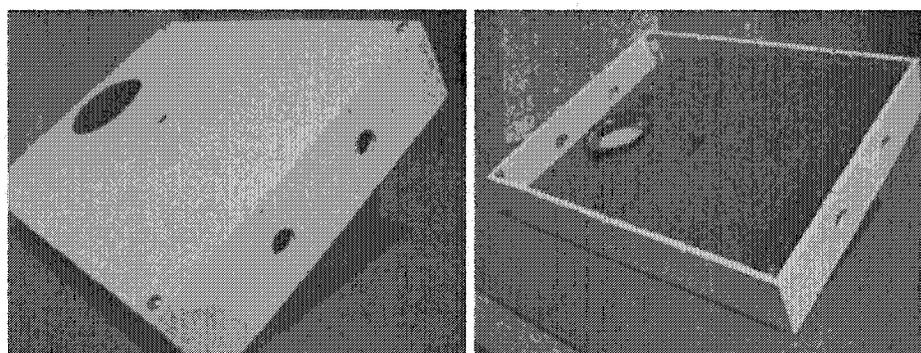


Figure 19 Prototype et facteurs utilisés pour le plan d'expérience - première illustration

Les figures 19 et 20 représentent les prototypes utilisés dans les expériences. Le nombre de trous percés dans le boîtier est de quatre (4) sur les cotés du boîtier et de un sur la face avant. Les fuites sont de petites encoches sur les cotés au nombre 10 (trois (3) de chaque côté dans le sens de la longueur et deux (2) de chaque côté dans le sens de la largeur). La mousse utilisée pour le facteur MOUSSE est présentée sur la partie droite de la figure 19, et la plaque de circuit imprimé pour le facteur PLAQUE dans la partie droite de la figure 20.

5.1.4 Plan d'expériences choisi

L'étude sert à déterminer si l'effet d'un facteur est important ou non pour être pris en compte dans une modélisation. Donc, pour chaque facteur, uniquement deux niveaux sont définis. Si le facteur est influent, l'effet du facteur sera visible dans l'analyse à l'aide de la méthode proposée dans le chapitre 4. La variable de sortie analysée avec cette méthode est la réponse

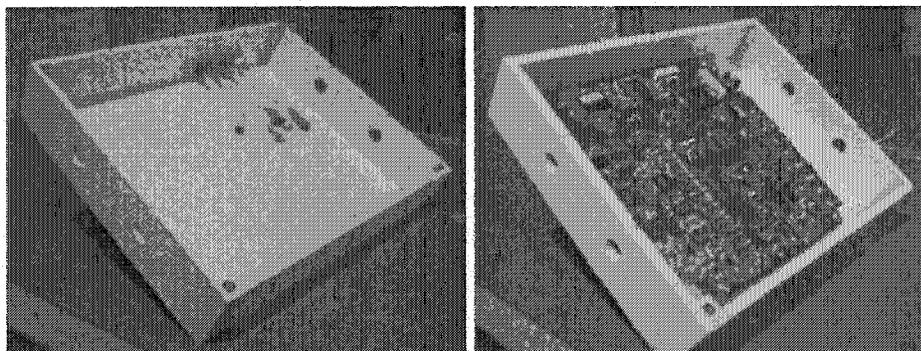


Figure 20 Prototypé et facteurs utilisés pour le plan d'expérience - deuxième illustration

acoustique du haut-parleur du téléphone dans son boîtier telle que définie dans la section 1.1.1. Dans cette étude, le nombre de facteurs pour caractériser le système a été établi à six (6) facteurs. Le choix du plan d'expériences se fait donc entre plusieurs configurations de plans d'expérience à six (6) facteurs et à deux (2) niveaux présentées ci-dessous.

- Plan d'expériences factoriel complet avec $2^6 = 64$ expériences. Ce plan d'expériences permet d'évaluer les effets des six (6) facteurs, nommés *A*, *B*, *C*, *D*, *E* et *F*, ainsi que toutes les interactions possibles entre les effets, c'est-à-dire :
 - les effets des 15 interactions doubles : *AB*, *AC*, *AD*, *AE*, *AF*, *BC*, *BD*, *BE*, *BF*, *CD*, *CE*, *CF*, *DE*, *DF* et *EF*;
 - les 20 interactions triples : *ABC*, *ABD*, *ABE*, *ABF*, *ACD*, *ACE*, *ACF*, *ADE*, *ADF*, *AEF*, *BCD*, *BCE*, *BCF*, *BDE*, *BDF*, *BEF*, *CDE*, *CDF*, *CEF* et *DEF*;
 - les 15 interactions d'ordre 4 : *ABCD*, *ABCE*, *ABCF*, *ABDE*, *ABDF*, *ABEF*, *ACDE*, *ACDF*, *ACEF*, *ADEF*, *BCDE*, *BCDF*, *BCEF*, *BDEF* et *CDEF*;
 - les six (6) interactions d'ordre 5 : *ABCDE*, *ABCDF*, *ABCEF*, *ABDEF*, *ACDEF* et *BCDEF*;
 - l'interaction d'ordre 6 : *ABCDEF*.

Il y a donc $6+15+20+15+6+1 = 63$ effets évalués. L'analyse par plans d'expériences se fait par rapport à l'erreur expérimentale qui est évaluée à partir de répétition de

mesure. Il faut donc ajouter, en plus des 64 expériences, d'autres expériences afin de chiffrer le terme d'erreur.

- Plan d'expérience factoriel fractionné avec $2^{6-1} = 32$ expériences. L'utilisation d'un plan fractionné nécessite de définir des équivalents, aussi appelés alias, entre les facteurs et les interactions. Dans cette configuration, la relation utilisée pour définir les alias est : $F = ABCDE$ donc $I = ABCDEF$ (I étant l'identité). En utilisant cette relation, les effets des facteurs sont associés aux effets des interactions d'ordre 5, soit ($A = BCDEF$, $B = ACDEF$, $C = ABDEF$, $D = ABCEF$ et $E = ABCDF$) et les effets des interactions doubles sont associés avec les effets des interactions d'ordre 4, soit ($AB = CDEF$, $AC = BDEF$, $AD = BCEF$, $AE = BCDF$, $AF = BCDE$, $BC = ADEF$, $BD = ACEF$, $BE = ACDF$, $BF = ACDE$, $CD = ABEF$, $CE = ABDF$, $CF = ABDE$, $DE = ABCF$, $DF = ABCE$ et $EF = ABCD$). Les effets des interactions d'ordre 3 sont associés deux à deux. Si les interactions d'ordre 3 et d'ordre supérieur sont négligées, il est alors possible de faire l'interprétation des effets de tous les facteurs et de toutes les interactions doubles, soit $6 + 15 = 21$ effets évalués. Puisque le nombre de données disponibles pour l'analyse correspond au nombre d'expériences moins la valeur attribuée à la moyenne des mesures, il reste donc 10 mesures réservées pour le calcul du terme d'erreur.
- Plan d'expériences factoriel fractionné $2^{6-2} = 16$ expériences. Les relations utilisées dans ce cas pour les alias sont $E = ABC$ et $F = BCD$, donc, les relations d'identité s'écrivent $I = ABCE = BCDF = ADEF$. Dans cette configuration, les effets des facteurs sont associés avec les effets des interactions d'ordre 3 et les effets des interactions doubles sont associés entre eux. Il est donc impossible de dissocier l'effet des interactions doubles. L'un des points importants dans la caractérisation du système est de connaître les couplages entre les différentes parties du téléphone. Il est donc important de connaître les effets des interactions doubles. Ce plan d'expériences n'apporte donc pas les informations nécessaires pour le système.

Des études préliminaires mises en oeuvre pour l'apprentissage des plans d'expériences ont permis de conclure que les interactions d'ordre supérieur ou égal à 3 sont négligeables. Cette

hypothèse est courante, elle permet de réduire de façon importante le nombre d'expérience. De plus, dans cette configuration, le nombre d'expériences utilisé pour calculer le terme d'erreur est convenable compte tenu des lectures dans le domaine des plans d'expériences.

Le plan d'expériences choisi est un plan factoriel fractionné 2^{6-1} avec 32 expériences. Les détails des configurations des 32 expériences successives sont énoncés dans le tableau VIII.

Ce tableau représente une table orthogonale, c'est-à-dire un tableau où chaque colonne représente un vecteur, et tous ces vecteurs sont orthogonaux deux à deux. Comme précisé précédemment et compte tenu des alias, cette configuration permet d'évaluer les effets des facteurs ainsi que les effets des interactions d'ordre deux (2). Dix (10) mesures sont réservées pour le calcul du terme d'erreur et la limite de signification associée. Étant donné le nombre important d'expériences, celles-ci sont faites en deux groupes de mesures. Il apparaît donc un effet supplémentaire appelé effet BLOC, ce qui réduit le nombre de mesures réservé pour le terme d'erreur à neuf (9). Ce nombre de degré de liberté attribué à l'erreur est tout à fait acceptable d'après les recommandations de la littérature.

5.2 Résultats du plan

L'analyse des résultats doit définir premièrement si le facteur est influent ou non sur la réponse, et deuxièmement dans quelle bande de fréquence ce facteur est influent. Les résultats importants obtenus à partir du plan d'expériences sont regroupés d'abord dans les effets des facteurs, et ensuite dans les effets des interactions.

5.2.1 Effets des facteurs

5.2.1.1 Facteur BLOC

Le premier facteur à être analysé est le facteur BLOC. La représentation, selon le concept énoncé dans le chapitre 4, est présentée sur la figure 21.

Tableau VIII

Déroulement des expériences selon la table orthogonale choisie pour le plan d'expériences

Essais	Bloc	Grille	Trou	Mousse	Plaque	Fuite	Épaisseur
1	1	sans	sans	sans	sans	sans	3 mm
2	1	avec	avec	sans	sans	sans	3 mm
3	1	avec	sans	avec	sans	sans	3 mm
4	1	sans	avec	avec	sans	sans	3 mm
5	1	sans	sans	sans	avec	sans	6 mm
6	1	avec	avec	sans	avec	sans	6 mm
7	1	avec	sans	avec	avec	sans	6 mm
8	1	sans	avec	avec	avec	sans	6 mm
9	1	sans	sans	sans	sans	avec	6 mm
10	1	avec	avec	sans	sans	avec	6 mm
11	1	avec	sans	avec	sans	avec	6 mm
12	1	sans	avec	avec	sans	avec	6 mm
13	1	sans	sans	sans	avec	avec	3 mm
14	1	avec	avec	sans	avec	avec	3 mm
15	1	avec	sans	avec	avec	avec	3 mm
16	1	sans	avec	avec	avec	avec	3 mm
17	2	avec	sans	sans	sans	sans	6 mm
18	2	sans	avec	sans	sans	sans	6 mm
19	2	sans	sans	avec	sans	sans	6 mm
20	2	avec	avec	avec	sans	sans	6 mm
21	2	avec	sans	sans	avec	sans	3 mm
22	2	sans	avec	sans	avec	sans	3 mm
23	2	sans	sans	avec	avec	sans	3 mm
24	2	avec	avec	avec	avec	sans	3 mm
25	2	avec	sans	sans	sans	avec	3 mm
26	2	sans	avec	sans	sans	avec	3 mm
27	2	sans	sans	avec	sans	avec	3 mm
28	2	avec	avec	avec	sans	avec	3 mm
29	2	avec	sans	sans	avec	avec	6 mm
30	2	sans	avec	sans	avec	avec	6 mm
31	2	sans	sans	avec	avec	avec	6 mm
32	2	avec	avec	avec	avec	avec	6 mm

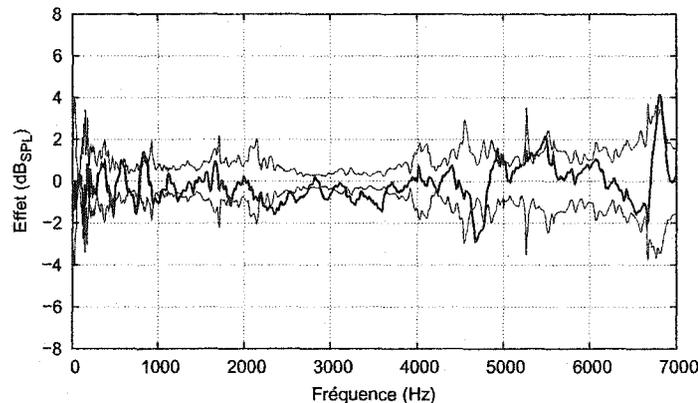


Figure 21 Effet de la variable Bloc

Selon l'analyse de cette représentation (voir section 4.5.2), l'effet de la variable BLOC, en trait gras, est compris à l'intérieur de la zone dessinée par les limites de signification inférieure et supérieure. L'effet de ce facteur est donc négligeable sur toute la bande de fréquence.

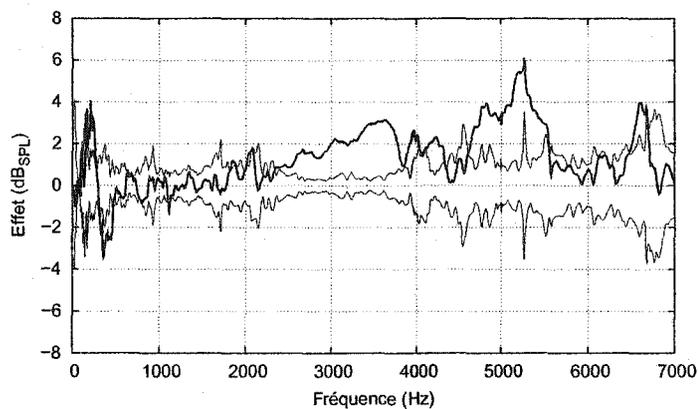
5.2.1.2 Facteur GRILLE

Le deuxième facteur analysé est le facteur GRILLE. Sur la figure 22,

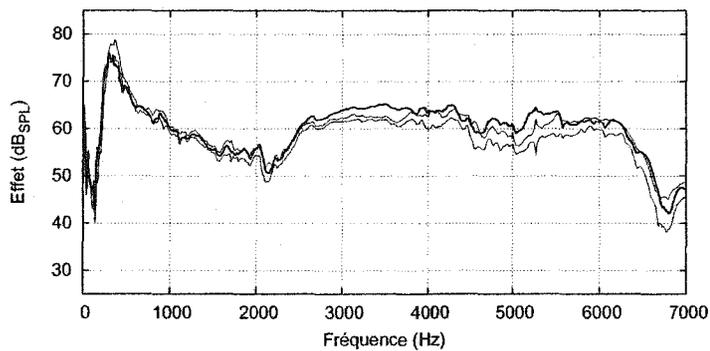
il apparaît que le facteur grille a un effet significatif dans deux zones fréquentielles, d'abord en basse fréquence (entre 100 Hz et 500 Hz) puis sur une large gamme de fréquences plus élevées (entre 2200 Hz et 6600 Hz).

De plus, sur ces courbes, il y a deux phénomènes physiques importants à remarquer :

- un abaissement de la fréquence de résonance du premier mode. Cet effet est visible sur la figure 22(b). Sur la courbe de la figure 22(a), ce phénomène est caractérisé par la succession de deux pics : un pic d'effet positif puis un pic d'effet négatif. Cet effet provient probablement de l'effet de masse ajoutée du système ressort-masse constitué par l'air entre la membrane et la grille (ressort) et l'air entre les lames de la grille (masse). Ce système a un effet de masse dominant, car il est en dessous de sa fréquence de résonance;



(a) Première représentation : effet seul



(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

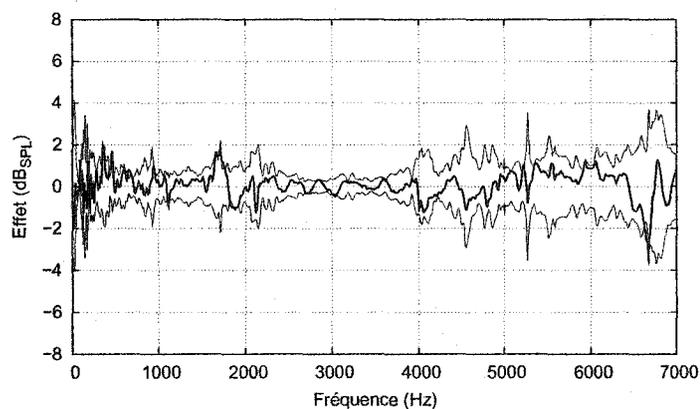
Figure 22 Effet du facteur GRILLE

- à haute fréquence, l'effet est positif sur toute la bande, ce qui peut être interprété comme la résonance assez amortie de ce même système ressort-masse.

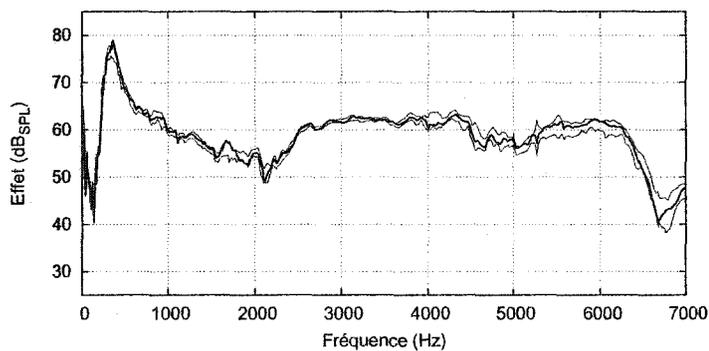
5.2.1.3 Facteur FUIITE

Quelque soit la représentation utilisée, l'interprétation du facteur FUIITE

montre que ce facteur n'a que très peu d'influence sur le rayonnement extérieur du système. L'effet du facteur est inférieur à la limite de signification sur toute la gamme de fréquence (figure 23).



(a) Première représentation : effet seul



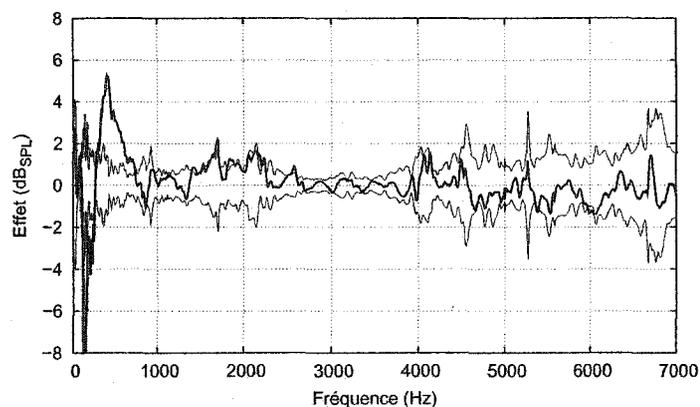
(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

Figure 23 Effet du facteur FUIITE

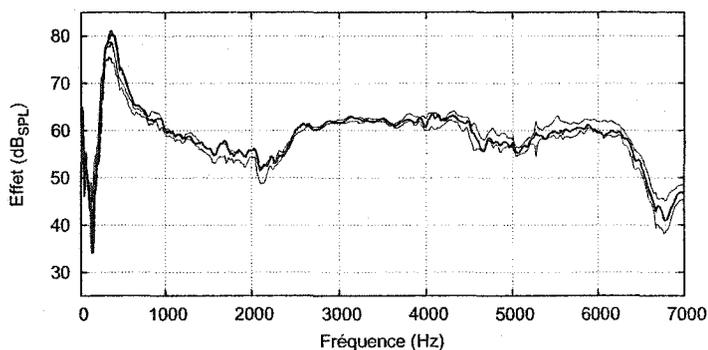
5.2.1.4 Facteur TROU

Sur la figure 24, il apparaît que le facteur TROU a un effet seulement en basse fréquence, entre 100 Hz et 800 Hz.

La représentation de la figure 24(a) montre un pic d'effet d'environ 5 dB à 400 Hz. La deuxième représentation (figure 24(b)) montre que l'effet à 400 Hz est superposé à l'effet de la résonance du haut-parleur qui se trouve aux environs de 350 Hz. L'effet (à 400 Hz) est probablement celui d'une résonance de type résonateur de Helmholtz de l'ensemble cavité (la cavité à l'intérieur du boîtier du téléphone) et trou qui se superpose à l'effet de la première résonance du haut-parleur.



(a) Première représentation : effet seul



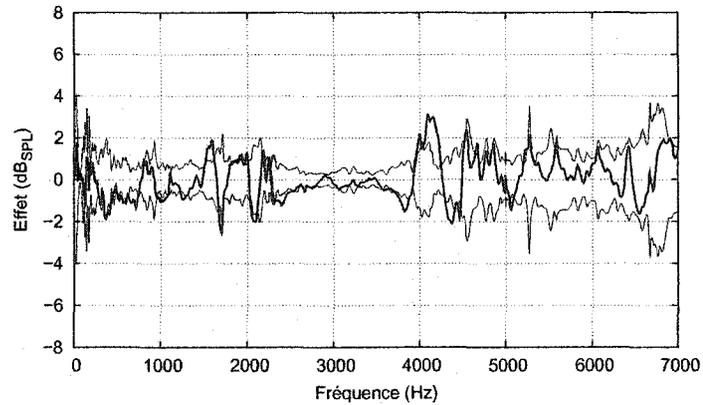
(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

Figure 24 Effet du facteur TROU

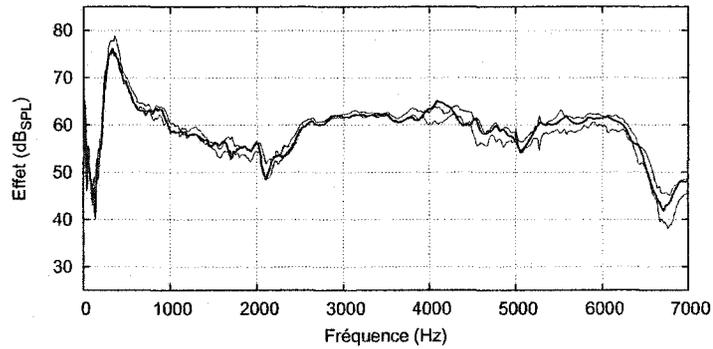
5.2.1.5 Facteur MOUSSE

La représentation du facteur MOUSSE (figure 25) montre plusieurs effets intéressants.

Le premier effet est une faible atténuation présente entre 200 Hz et 600 Hz. Celui-ci s'explique par un effet d'amortissement du premier mode du haut-parleur. Ensuite, un effet apparaît dans deux gammes de fréquence, d'abord entre 1500 Hz et 2100 Hz (effet de l'ordre de grandeur de la limite de signification), ensuite à partir de 4000 Hz (effet supérieur à la limite de signification). Il correspond à un effet d'absorption par la mousse, sur les modes acoustiques de cavité (présentés dans le tableau I jusqu'à 3000 Hz), créés par le boîtier fermé du téléphone, d'abord dans le sens de la largeur de cette cavité, puis dans le sens de l'épaisseur de cette



(a) Première représentation : effet seul



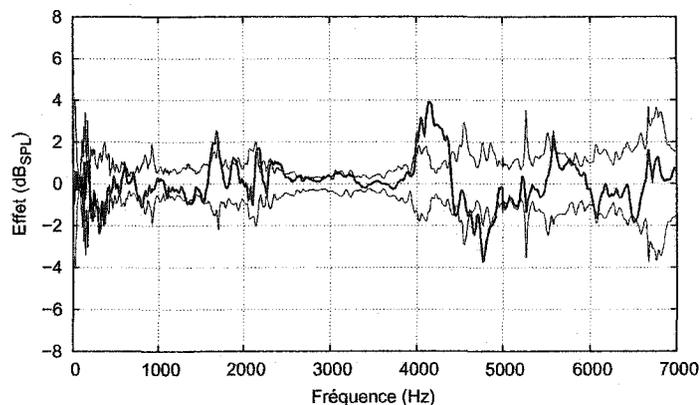
(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

Figure 25 Effet du facteur MOUSSE

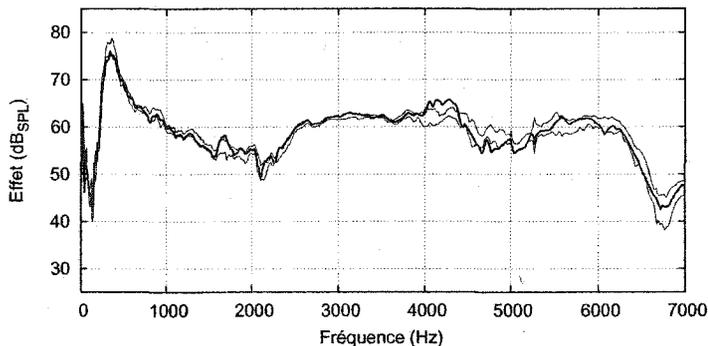
même cavité. En effet, les dimensions de la cavité correspondent au critère en $\lambda/2$ de la cavité interne du prototype. Pour une épaisseur de cavité de 43 mm, alors $\frac{\lambda}{2} = 43$ mm, la fréquence correspondante est de $f = \frac{c_{air}}{\lambda} = \frac{344}{0,086} = 4000$ Hz. Quand les modes acoustiques sont atténués, c'est-à-dire en présence de la mousse dans la cavité, l'effet de couplage des modes de cavité sur la structure, et plus particulièrement sur la membrane du haut-parleur, est moins important, d'où la modification sur le rayonnement acoustique du téléphone.

5.2.1.6 Facteur PLAQUE

Le facteur PLAQUE a un effet similaire au facteur MOUSSE (figure 26).



(a) Première représentation : effet seul



(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

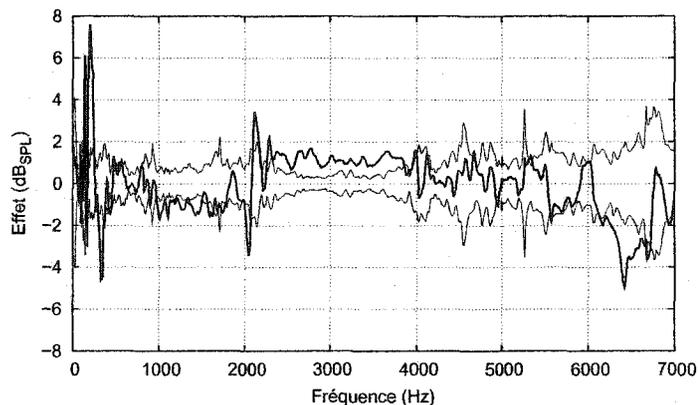
Figure 26 Effet du facteur PLAQUE

En effet, la mousse choisie est plutôt perméable, elle laisse assez bien passer l'air, et la plaque utilisée est de faible épaisseur (quelques millimètres) donc elle permet aussi une circulation de l'air avec un effet d'amortissement. Les effets sont donc visibles sur la réponse aux mêmes fréquences pour les deux facteurs internes à la cavité, c'est-à-dire entre 200 Hz et 600 Hz, entre 1500 Hz et 2100 Hz et à partir de 4000 Hz.

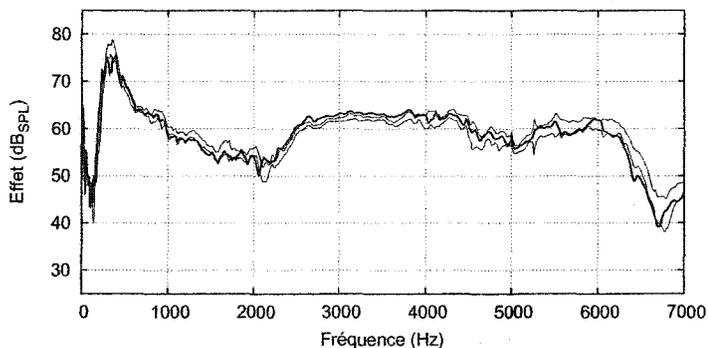
5.2.1.7 Facteur ÉPAISSEUR

Sur la figure 27(a), il apparaît un effet très important d'abord en basse fréquence entre 100 Hz et 500 Hz, puis entre 1000 Hz et 4000 Hz où les effets sont de l'ordre du dB, c'est-à-dire comparable à la limite de signification. Dans cette gamme de fréquence, des pics importants

sont aussi présents proches de 2000 Hz. Au-delà de 4000 Hz et jusqu'à environ 6200 Hz, les effets de l'épaisseur sont négligeables.



(a) Première représentation : effet seul



(b) Deuxième représentation : effet + réponse moyenne

Figure 27 Effet du facteur ÉPAISSEUR

Les deux courbes de la figure 27 permettent de faire les analyses détaillées suivantes :

- les pics, représentés dans la figure 27, juste avant le premier mode de résonance du haut-parleur, sont les premiers modes du boîtier correspondant aux modes de plaque des faces avant et arrière du prototype d'épaisseur 3 mm. Ils sont représentés dans la figure 28.

Pour la plaque avant, les deux premiers modes sont à 125 Hz et 260 Hz, et pour la face arrière, à 170 Hz et 300 Hz;

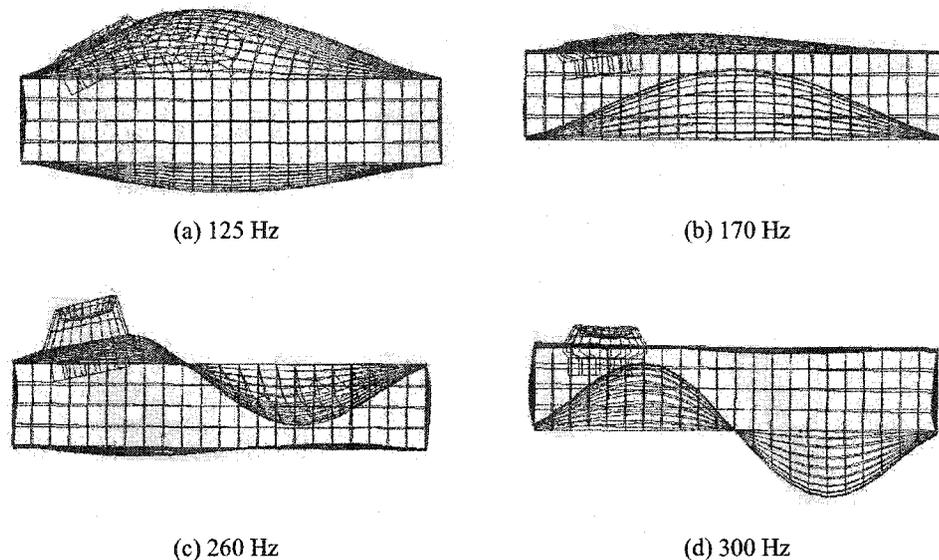


Figure 28 Représentation des premiers modes propres du prototype

- à moyenne fréquence, entre 1000 Hz et 4000 Hz, l'effet de la structure est d'environ 1 dB, avec quelques pics dont l'amplitude est environ 3 dB proches de 2000 Hz. Les pics sont dus à des décalages en fréquence dans une bande de fréquence où le signal mesuré (figure 27(b)) est faible.

5.2.2 Effets des interactions

Un plan d'expériences à six (6) facteurs fait apparaître des interactions d'ordre 2, 3, 4, 5 et 6. Le plan fractionné choisi (présenté à la section 5.1.4) sépare l'effet des interactions d'ordre deux (2) de l'effet des facteurs et regroupe les interactions d'ordre supérieur entre elles. En négligeant de façon arbitraire l'effet des interactions d'ordre supérieur à 2, il est possible de vérifier l'effet des interactions doubles. L'effet des interactions doubles, présenté sur la figure 29 ainsi que sur les figures de l'annexe 3, est en général négligeable sur toute la gamme de fréquence, c'est-à-dire jusqu'à 7000 Hz.

En fait, la seule interaction ayant un effet est l'interaction entre les facteurs ÉPAISSEUR et TROU (figure 30). En effet, l'effet des trous est dû au volume d'air emprisonné dans la paroi

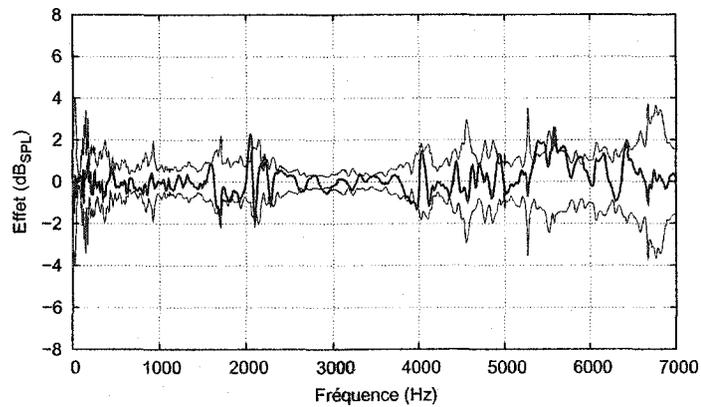


Figure 29 Effet d'une interaction double entre les facteurs MOUSSE et ÉPAISSEUR

entre la cavité et l'extérieur. Donc, si l'épaisseur de la paroi est changé (facteur ÉPAISSEUR) alors, l'effet du facteur TROU change aussi, d'où l'effet non négligeable de cette interaction. Cette analyse confirme la présence d'une résonance liée au phénomène "basse-reflexe" due aux trous cités précédemment.

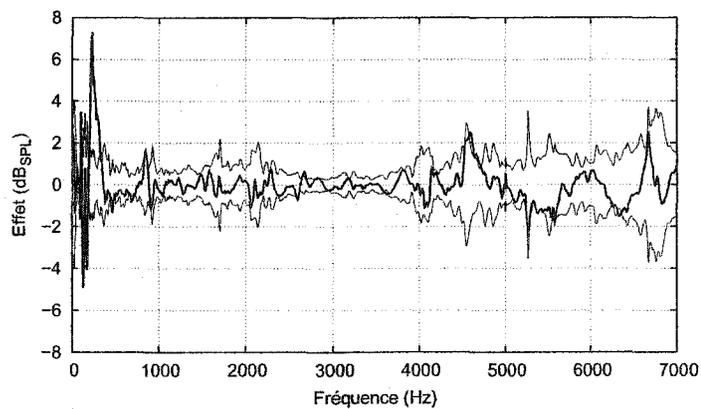


Figure 30 Interaction entre les facteurs TROU et ÉPAISSEUR

5.3 Conclusion sur les résultats expérimentaux

L'analyse expérimentale par la méthode proposée a permis de caractériser le système. Elle a permis d'obtenir des informations sur six (6) facteurs, ainsi que sur les interactions entre ces facteurs, ayant une influence sur ce système, avec un nombre d'expériences réduit à 32

expériences. Cette méthode a permis aussi d'identifier certains phénomènes physiques grâce aux représentations utilisées. Les résultats de cette analyse sont résumés ci-dessous :

- Pour le facteur GRILLE, l'effet est une atténuation sur le mode piston du haut-parleur et une amplification sur une largeur importante en fréquence à plus haute fréquence;
- L'effet du facteur ÉPAISSEUR est un effet assez global qui s'atténue en fonction de la fréquence. Cet effet devient de l'ordre de grandeur de l'erreur à partir de 2500 Hz, c'est-à-dire d'environ un (1) dB;
- L'effet des facteurs internes à la cavité, c'est-à-dire les facteurs MOUSSE et PLAQUE sont faibles et très localisés en fréquence. Le premier effet apparaît à la fréquence du mode piston, puis vers 800 Hz, vers 1700 Hz et ensuite au-delà de 4000 Hz. Ces trois fréquences sont les fréquences d'apparition des modes de cavité d'abord dans le sens de la longueur, puis dans le sens de la largeur et enfin dans le sens de l'épaisseur de la cavité. De plus, le couplage entre la cavité et le boîtier (effet traduit par l'effet des interactions MOUSSE - ÉPAISSEUR et PLAQUE - ÉPAISSEUR) est négligeable sur la gamme de fréquence d'intérêt;
- L'effet du facteur TROU est un effet uniquement en basse fréquence proche du mode piston;
- L'effet du facteur FUIITE est négligeable;
- L'ensemble des interactions constatées, mis à part celle entre les facteurs TROU et ÉPAISSEUR ont un effet non significatif sur toute la gamme de fréquence. Le couplage entre la cavité et la structure est donc négligeable;
- Le dernier effet constaté provient de la limite de signification. Celle-ci présente une grande variabilité en fonction de la fréquence et de nombreux pics apparaissent.

Les différentes informations recueillies grâce à cette analyse peuvent alors être utilisées pour le choix des modèles en fonction du degré de détail nécessaire ou des phénomènes physiques identifiés ainsi que de la bande de fréquence où ces phénomènes sont présents.

CHAPITRE 6

VALIDATION DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA MÉTHODE DE CARACTÉRISATION PAR PLANS D'EXPÉRIENCES

Ce chapitre vise à valider la méthode proposée de caractérisation expérimentale pour le choix des modèles, présentée dans le chapitre 5, basée sur l'utilisation des plans d'expériences.

La validation de la méthode est faite de trois façons. Dans la première partie une étude spécifique est faite sur la limite de signification. Cette étude permet de confirmer l'exactitude de l'effet des facteurs, trouvé dans le chapitre 5, malgré la variabilité du terme d'erreur. La suite du chapitre est dédiée à la validation de l'effet des facteurs déterminés dans le chapitre précédent par le plan d'expériences. Dans la deuxième partie, la validation est faite expérimentalement grâce à une analyse par identification des chemins de transmission. Cette validation est complétée dans la troisième partie de ce chapitre par simulation avec l'utilisation de différents modèles numériques.

6.1 Validation de la méthodologie des plans d'expériences par une analyse approfondie de la limite de signification

Dans les analyses sur le plan d'expériences, la limite de signification ou terme d'erreur n'est pas constant sur la gamme de fréquence d'analyse (150 Hz à 7000 Hz). Cela signifie que certains effets non contrôlés ont été oubliés avec cette étude. Le terme d'erreur calculé dans le chapitre précédent est une erreur "artificielle" composée de l'erreur expérimentale, des interactions triples et des interactions d'ordre supérieur par opposition à une erreur expérimentale seule.

Une analyse est nécessaire pour déterminer si la variation du terme d'erreur ne fausse pas les résultats du plan d'expériences. Une étude approfondie de l'erreur est faite en deux étapes : premièrement, en utilisant la même analyse que précédemment pour vérifier l'importance des interactions triples et, deuxièmement, à l'aide d'une étude complémentaire avec uniquement

trois facteurs dans laquelle un nombre de répétitions important permet de calculer une erreur expérimentale.

6.1.1 Vérification des effets des interactions triples

Cette analyse est faite avec les résultats expérimentaux du plan d'expériences du chapitre précédent à partir desquels la limite de signification est cette fois calculée avec les interactions doubles négligeables, c'est-à-dire toutes les interactions doubles hormis l'interaction entre les facteurs TROU et ÉPAISSEUR. Les 20 interactions triples sont alors extraites et peuvent être analysées. Elles sont associées deux à deux selon la séquence suivante : $ABC = DEF$, $ABD = CEF$, $ABE = CDF$, $ABF = CDE$, $ACD = BEF$, $ACE = BDF$, $ACF = BDE$, $ADE = BCF$, $ADF = BCE$, $AEF = BCD$. Elles sont représentées sur la figure 31.

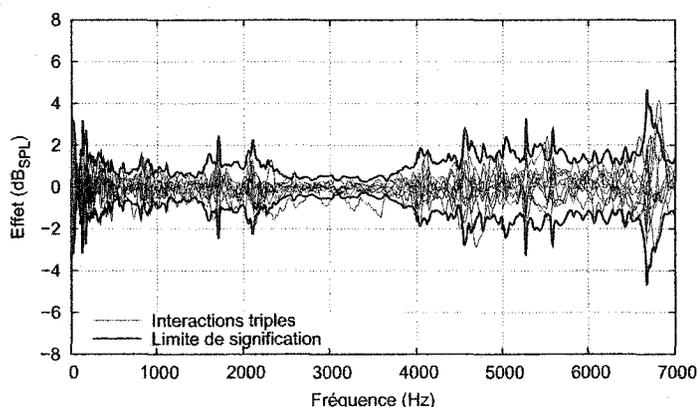


Figure 31 Vérification de l'effet des interactions triples

La figure 31 montre que l'effet des interactions triples est compris à l'intérieur de la nouvelle limite de signification sur toute la bande de fréquence d'analyse. Cet effet est donc négligeable, l'hypothèse sur l'effet des interactions triples utilisées dans le chapitre précédent est donc valide.

6.1.2 Utilisation d'un plan d'expérience complet

Au lieu de refaire la même analyse plusieurs fois afin d'augmenter la précision sur la limite de signification, une étude complémentaire a été faite à partir des mêmes prototypes avec uniquement trois (3) facteurs, les facteurs GRILLE, ÉPAISSEUR et MOUSSE. Comme dans le plan d'expériences précédent, deux (2) niveaux sont associés à chaque facteur. Cette étude a été faite avec un plan d'expériences complet 2^3 , soit 8 expériences. Afin d'assurer une précision importante sur les effets et sur la limite de signification, la mesure est complétée de 3 répétitions. Le nombre d'expériences est donc de $4 \times 8 = 32$ expériences.

Dans le plan d'expériences présenté dans le chapitre précédent, l'analyse des courbes a montré l'effet des différents facteurs et interactions. À chaque analyse, les effets sont comparés avec un terme correspondant à la limite de signification définie en dB à partir du test de Fisher. Ce terme apparaît sur toutes les courbes, par exemple sur la figure 30 en trait fin. Un problème s'est posé dans l'analyse de cette limite. En effet, dans l'hypothèse des plans d'expériences, si la valeur de la limite est un terme aléatoire, alors elle ne devrait pas varier significativement avec la fréquence. La variation importante de cette limite dans certaines zones de fréquence amène à vérifier l'origine de cette variation. Il se pourrait en effet qu'un facteur non pris en compte n'est pas constant dans l'analyse en fonction de la fréquence.

Pour vérifier l'origine de la variation de la limite de signification, un plan complet avec répétitions est utilisé. Ce plan complet a été choisi parce qu'il permet d'enlever les hypothèses utilisées sur les effets des interactions d'ordre supérieur à trois, supposés négligeables précédemment. De plus, le nombre d'expériences utilisé pour le calcul de la limite de signification a été grandement augmenté. Comme c'est un plan complet, pour avoir un nombre d'expériences qui reste raisonnable, le nombre de facteurs pris en compte est réduit. Les facteurs sont choisis parmi les facteurs définis à partir des chemins de transmission étudiés à la section 5.1.3. Parmi les facteurs définis pour la cavité, un seul facteur sera choisi. Le nombre de facteur est donc réduit à trois (3) : les facteurs GRILLE, ÉPAISSEUR et MOUSSE.

Le plan d'expériences choisi est un plan d'expériences factoriel complet avec quatre mesures par expérience, soit $2^3 * 4 = 32$ expériences. Cette fois, tous les effets sont observés, c'est-à-dire : les trois facteurs, les trois interactions doubles ainsi que l'interaction triple. Il reste donc $31 - 3 - 3 - 1 = 24$ degrés de liberté pour l'erreur. Le détail des expériences est décrit dans le tableau IX

Tableau IX

Plan d'expériences complet

essai	grille	épaisseur	mousse	essai	grille	épaisseur	mousse
1	avec	6	avec	17	avec	6	avec
2	avec	6	sans	18	avec	6	sans
3	avec	3	avec	19	avec	3	avec
4	avec	3	sans	20	avec	3	sans
5	sans	6	avec	21	sans	6	avec
6	sans	6	sans	22	sans	6	sans
7	sans	3	avec	23	sans	3	avec
8	sans	3	sans	24	sans	3	sans
9	avec	6	avec	25	avec	6	avec
10	avec	6	sans	26	avec	6	sans
11	avec	3	avec	27	avec	3	avec
12	avec	3	sans	28	avec	3	sans
13	sans	6	avec	29	sans	6	avec
14	sans	6	sans	30	sans	6	sans
15	sans	3	avec	31	sans	3	avec
16	sans	3	sans	32	sans	3	sans

L'analyse de ce plan d'expériences à trois facteurs est faite pour valider le plan d'expériences présenté dans le chapitre 5. L'analyse est faite en trois parties. Dans la première partie, chacun des trois facteurs choisis est comparé aux effets trouvés précédemment dans le chapitre 5. Deuxièmement, l'étude de la limite de signification en fonction de la fréquence est faite. Cette nouvelle limite présente quelques variations importantes localisées en fréquence expliquées dans une troisième partie.

6.1.2.1 Vérification des effets des facteurs

Le premier point important à noter sur cette validation est la confirmation de la validité des résultats de l'analyse, présentés dans la section 5.2.1, pour les effets des trois facteurs utilisés ici. Cette validation est illustrée sur la figure 32 pour l'effet du facteur GRILLE. Les courbes des deux autres facteurs sont présentées à l'annexe 2. Sur cette figure, la courbe en trait fin est l'effet du facteur dans l'analyse initiale, et en trait gras pointillé, l'effet du même facteur dans cette analyse réduite.

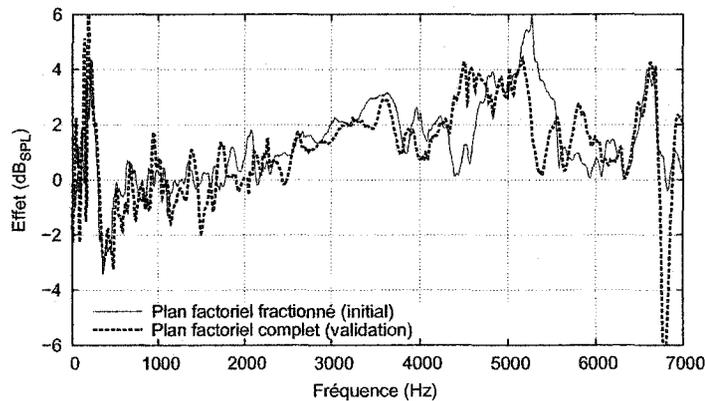


Figure 32 Vérification de l'effet du facteur GRILLE.

Les deux courbes sont pratiquement identiques sur toute la gamme de fréquence. Il existe néanmoins un décalage en fréquence entre 4500 Hz et 5000 Hz entre les deux mesures. L'écart des effets est cependant acceptable compte tenu de la précision de la mesure. L'analyse peut donc être utilisée pour étudier le terme d'erreur de façon plus précise.

6.1.2.2 Uniformité de l'amplitude de l'effet de l'erreur en fonction de la fréquence

Ce plan d'expériences a été fait pour analyser la variation de la limite de signification en fonction de la fréquence. La courbe en trait fin de la figure 33 présente la limite de signification calculée dans le chapitre 5 avec aucune répétition. Cette limite provient uniquement des hypothèses sur le fait que les interactions d'ordre supérieur à deux (2) sont négligeables. Aucune répétition n'a été faite dans l'analyse du chapitre 5. La courbe en trait gras pointillé

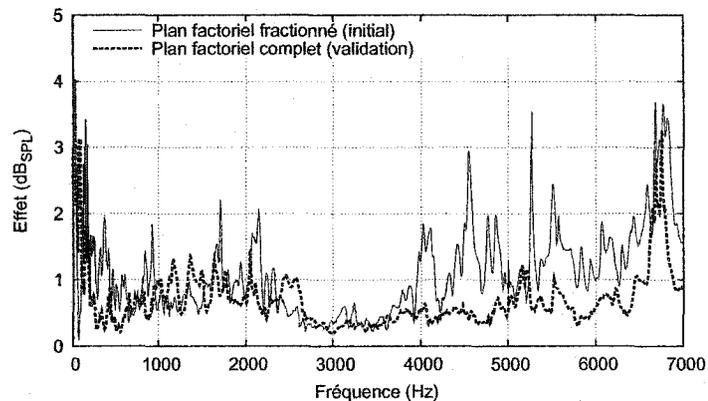


Figure 33 Comparaison des limites de signification du plan d'expérience initial (plan factoriel fractionné) et du plan d'expérience fait pour la validation (plan factoriel complet)

de la figure 33 représente la limite de signification calculée à partir de l'analyse présentée dans le tableau IX. Cette fois ci, cette limite est calculée à partir de nombreuses répétitions de chaque expérience. Ces courbes (figure 33) montrent que l'amplitude de cette nouvelle limite est d'environ 1 dB sur toute la gamme de fréquence, sauf dans deux zones (problème abordé dans la section suivante), contrairement à la limite calculée dans le chapitre 5 qui augmentait avec la fréquence jusqu'à 2 dB à 7000 Hz avec de nombreux pics d'amplitude supérieure à 3 dB.

La limite de signification est donc, dans ce cas, raisonnablement constante avec la fréquence. Dans cette analyse, les effets des trois facteurs correspondent aux effets des mêmes facteurs trouvés dans le chapitre 5, avec une variabilité sur la limite calculée réduite à moins de 1 dB.

6.1.2.3 Origine des maxima

Il reste deux zones de fréquence, à 150 Hz et 6700 Hz, où la limite de signification reste importante avec des pics d'amplitude supérieure à 3 dB. Pour comprendre le problème à ces deux fréquences, il suffit de se reporter aux mesures de pression à l'origine des analyses du plan d'expériences. Sur le graphique du haut de la figure 34, quatre mesures choisies au hasard dans les 32 mesures décrites au tableau IX sont tracées. Aux deux fréquences citées plus haut,

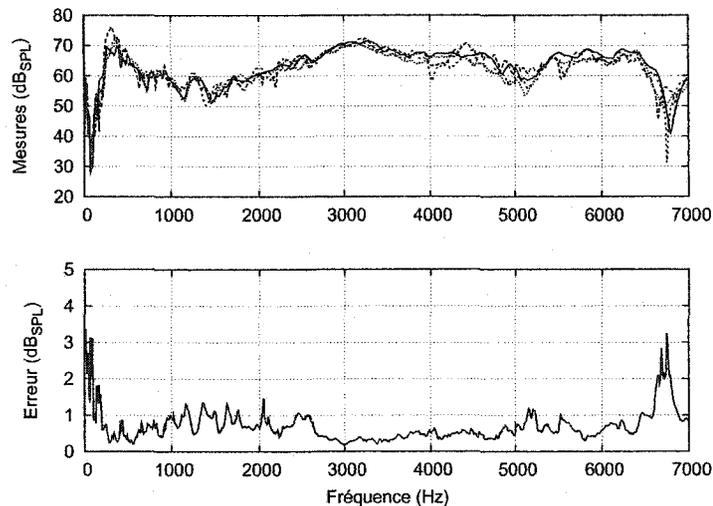


Figure 34 Exemple du lien entre les mesures de réponse acoustique (courbe du haut) et la limite de signification due au terme d'erreur (courbe du bas)

le niveau de pression est très faible, donc le signal est proche du niveau de bruit de fond. Il s'agit donc d'un phénomène de précision de mesures qui est à l'origine des augmentations sur la limite de signification initiale.

Mis à part ces deux fréquences, où le signal mesuré est proche du bruit de fond, la limite de signification dans cette analyse est de l'ordre du décibel sur toute la gamme de fréquence. L'amplitude sur la limite de signification correspond à l'erreur expérimentale habituelle pour des mesures de pression.

Cette analyse sur un nombre de facteurs réduit a permis de valider plusieurs aspects initiaux. D'abord, les effets trouvés des trois facteurs utilisés dans ce plan complet correspondent aux effets déterminés dans le chapitre 5. De plus, la variation trouvée sur la limite de signification a été réduite dans cette analyse à environ 1 dB sur toute la gamme de fréquence des mesures. Celle-ci devient alors uniforme jusqu'à 7000 Hz et l'ordre de grandeur de l'amplitude obtenue (1 dB) coïncide avec l'amplitude attendue dans ce type de mesure. Enfin, les deux maxima restant sur cette nouvelle limite proviennent du peu de signal sur les mesures à ces fréquences. La limite de signification devient donc uniforme sur toute la gamme de fréquence et l'effet des

trois facteurs analysés dans le plan complet correspond à ceux trouvés précédemment. Cette analyse confirme les résultats de l'analyse initiale (chapitre 5) sur l'effet des facteurs.

6.2 Comparaison des résultats du plan d'expériences par l'utilisation d'une méthode classique expérimentale d'identification des chemins de transmission

Dans cette partie, la validation des résultats du plan d'expériences est présentée avec une comparaison des résultats à ceux d'une analyse classique expérimentale d'identification des chemins de transmission.

Une étude expérimentale sur les chemins de transmission entre le haut-parleur et la position de mesure normalisée à 50 cm du téléphone (section 1.1.1) est faite. Lorsqu'un signal est émis par le haut-parleur, il est émis à la fois par la face avant et la face arrière du haut-parleur, celui-ci se propage donc par voie acoustique à l'extérieur et à l'intérieur du téléphone. De plus, il y a aussi une propagation par voie vibratoire dans le boîtier. Celui-ci est donc aussi susceptible de rayonner et donc de contribuer au rayonnement acoustique du téléphone.

L'étude expérimentale proposée permet donc de déterminer la contribution de chacun des chemins de propagation sur la réponse acoustique extérieure du téléphone. Pour cela, trois types d'isolation sont utilisés :

1. Le rayonnement acoustique du haut-parleur est atténué grâce à une terminaison anéchoïque placée devant le haut-parleur.
2. Le boîtier est isolé du haut-parleur avec un joint en silicone permettant d'isoler partiellement les vibrations du haut-parleur, tout en gardant la liaison étanche entre le haut-parleur et le boîtier.
3. L'effet du rayonnement du haut-parleur à l'intérieur du boîtier est atténué par l'ajout de mousse à l'intérieur de la cavité.

Les trois isolations sont présentées sur la figure 35.

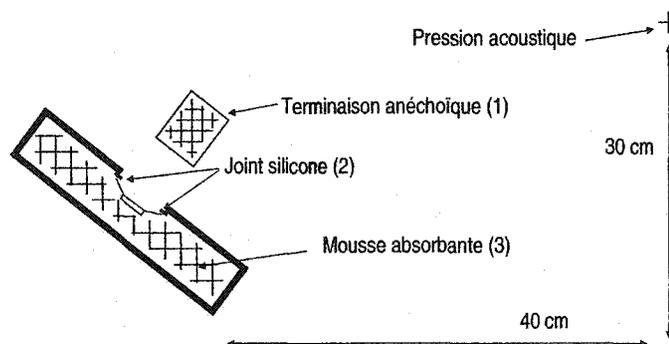


Figure 35 Différentes isolations utilisées pour séparer les chemins de transmission

Pour les mesures, deux des isolations vont être utilisées chaque fois afin de ne conserver qu'un seul des chemins de transmission.

Le *premier chemin de transmission* ou chemin vibratoire correspond à la transmission de la vibration du haut-parleur vers le boîtier, puis, au rayonnement du boîtier jusqu'à la position de mesure extérieure. Pour évaluer la contribution de ce chemin de transmission, les isolations sur le haut-parleur (1) et dans la cavité (3) sont utilisées.

Le *deuxième chemin de transmission* est le chemin acoustique extérieur, c'est-à-dire le rayonnement du haut-parleur isolé du boîtier. Ceci est réalisé avec les isolations (2) et (3).

Le *dernier chemin de transmission* est le rayonnement du haut-parleur par la face arrière, c'est-à-dire à l'intérieur de la cavité. La cavité va exciter le boîtier du téléphone qui va alors rayonner. Ce chemin de transmission est appelé chemin acoustique intérieur, il est réalisé grâce aux isolations (1) et (2).

À ces trois (3) mesures sont ajoutées la mesure du téléphone sans aucun traitement, plus celle du téléphone avec toutes les isolations proposées. Cette dernière courbe est appelée "Bruit de Fond". Les cinq (5) courbes sont tracées sur la figure 36.

La figure 36 montre premièrement que le bruit de fond est assez élevé jusqu'à environ 2000 Hz. Ce qui rend les résultats difficilement exploitables en dessous de cette fréquence. Par contre,

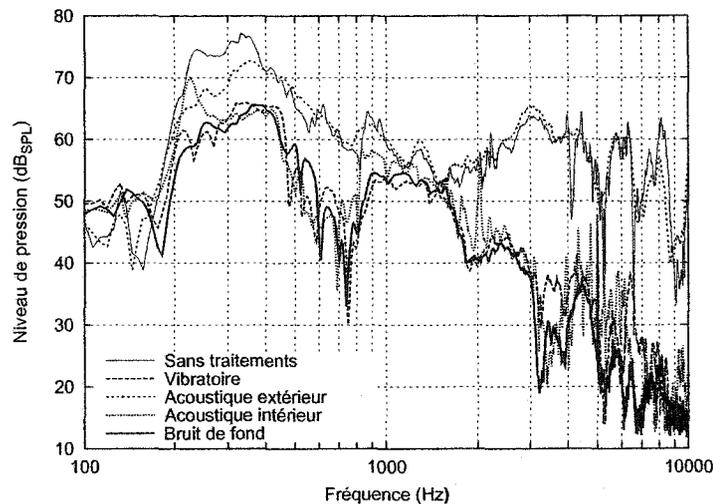


Figure 36 Réponse acoustique dans les 3 configurations citées ainsi que le bruit de fond et la mesure sans aucun traitement

au-dessus de 2000 Hz, c'est la transmission acoustique extérieure qui contribue le plus à la réponse globale du téléphone. En effet, sur la figure 36, à partir de 2000 Hz, la courbe du rayonnement du haut-parleur suit parfaitement la courbe du téléphone sans aucun traitement. De plus, l'écart entre l'effet du haut-parleur et les autres effets est d'environ 20 dB dans cette gamme de fréquence.

L'analyse indépendante des 3 chemins de transmission suit. Elle doit néanmoins être prise avec précaution, car les chemins de transmission ne sont pas réellement indépendants et interagissent entre eux.

6.2.1 Chemin vibratoire (isolations (1) et (3))

La figure 37 montre que la contribution du rayonnement du boîtier excitée par voie solide seulement est très proche du bruit de fond sur toute la gamme de fréquence. En dessous de 2000 Hz, le bruit de fond n'est pas suffisamment faible pour considérer le rayonnement de la structure négligeable; mais au-delà, l'écart entre la réponse acoustique du système complet et la contribution de la structure est d'au moins 20 dB.

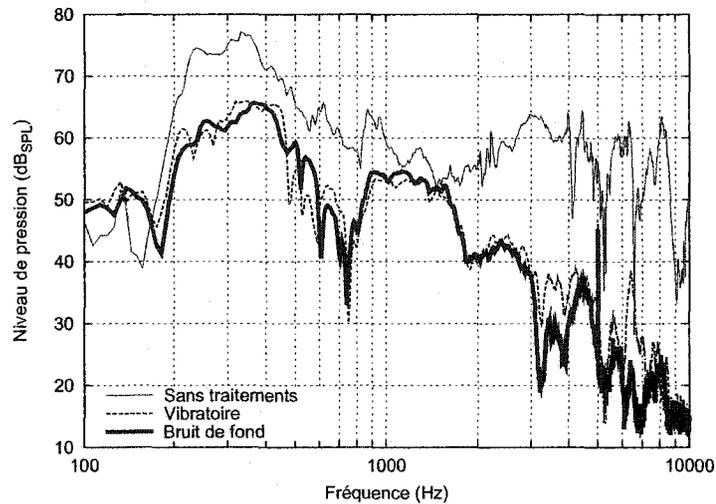


Figure 37 Contribution du rayonnement du boîtier excité par voie vibratoire sur la réponse acoustique du téléphone.

La première des conclusions du plan d'expériences est que la contribution du boîtier sur le rayonnement acoustique du téléphone est négligeable à hautes fréquences (au-delà de 2000 Hz). L'analyse expérimentale ci-dessus confirme donc cette conclusion ainsi que la limite en fréquence.

6.2.2 Chemin acoustique extérieur (isolations (2) et (3))

La réponse du haut-parleur est très proche de la réponse du téléphone complet (figure 38).

Deux différences importantes sont à noter :

- Premièrement, les amplitudes de la contribution du haut-parleur et du rayonnement du téléphone complet sont confondues sur toute la gamme de fréquence hormis sur la bande entre 200 Hz et 400 Hz, dans laquelle se trouve les premiers modes de plaque de la boîte parallélépipédique. Dans cette bande de fréquence, l'écart entre ses deux courbes est d'environ 5 dB. De plus, le rayonnement du boîtier n'est pas négligeable. Le boîtier est donc à prendre en compte en basse fréquence.
- Deuxièmement, la courbe du rayonnement du haut-parleur est moins accidentée que celle du téléphone complet. Ceci s'explique par le fait que les modes de cavité sont

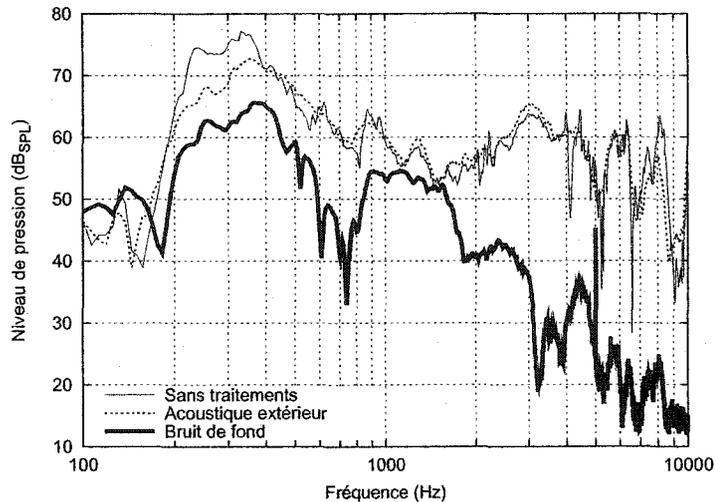


Figure 38 Contribution du rayonnement du haut-parleur sur la réponse acoustique du téléphone

atténués par l'effet d'amortissement de la mousse placée à l'intérieur du boîtier. Les contraintes des modes de cavité sur la membrane du haut-parleur sont moins importantes. Cela confirme le plan d'expériences. Le couplage entre la cavité et la membrane du haut-parleur est à prendre en compte quelque soit la bande de fréquence.

6.2.3 Chemin acoustique intérieur (isolations (1) et (2))

La courbe représentant la contribution de ce chemin de transmission sur le rayonnement acoustique global du téléphone a la même apparence que la courbe du bruit de fond. La courbe est représentée dans la figure 39.

Deux phénomènes sont à remarquer : le premier est à 225 Hz, où un pic est présent. Ce pic représente le rayonnement d'un mode de vibration du boîtier. Ce mode est excité par voie acoustique dans la cavité. Ce phénomène met en évidence le couplage entre la cavité et le boîtier non négligeable dans cette gamme de fréquence. Le deuxième phénomène à remarquer est la forme de la courbe du chemin acoustique intérieur qui est plus accidentée, à partir de 400 Hz, que celle du bruit de fond. On retrouve encore un phénomène de la cavité : les

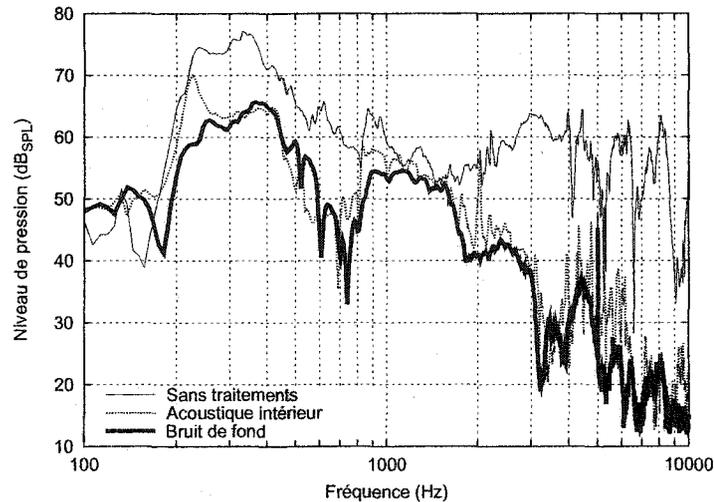


Figure 39 Contribution du rayonnement du boîtier excité par voie acoustique intérieure sur la réponse acoustique du téléphone

nombreux modes en haute fréquence apparaissent sous forme de pics. Ceux-ci disparaissent quand la cavité disparaît.

6.2.4 Vérification de la séparation des chemins de transmission

Il est intéressant de comparer, sur la figure 40, la réponse du système complet avec la somme des trois chemins de transmission présentée précédemment.

Les différences entre ces deux courbes montrent les limites de ce type d'analyse, c'est-à-dire :

- La difficulté d'isoler totalement tous les chemins de transmission, notamment en dessous de 250 Hz, et entre 1000 Hz et 2000 Hz;
- La disparition des effets de couplage (effet de lissage de la courbe obtenue) sur toute la gamme de fréquence :
 - au-dessus de 4000 Hz pour le couplage entre la cavité et le boîtier;
 - entre 200 Hz et 400 Hz pour les couplages entre la cavité et le boîtier et entre la cavité et la membrane du haut-parleur;

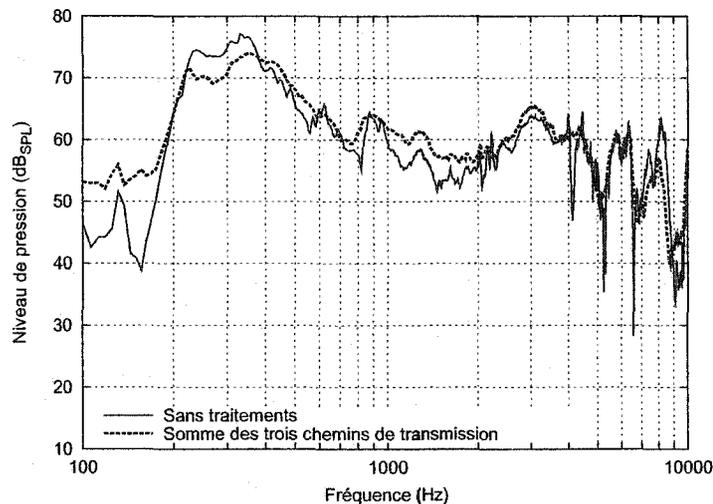


Figure 40 Comparaison entre la somme des trois chemins de transmission et la réponse du système complet

- La possibilité d'isoler réellement les chemins de transmission. En effet, les chemins de transmission ne sont pas vraiment indépendants et la transmission acoustique est une combinaison de tous les différents chemins de transmission possibles.

6.3 Validation des effets du plan d'expériences et interprétations des phénomènes physiques à l'aide d'une simulation informatique

La méthode utilisée dans cette partie pour valider les résultats du plan d'expériences, est l'utilisation de simulations informatiques. L'objectif de l'utilisation d'un outil de simulation est de valider les résultats du plan d'expériences du chapitre 5, en retrouvant soit les effets des facteurs, soit les phénomènes physiques observés sur les effets des facteurs.

La simulation informatique peut être faite, soit à partir de modèles analytiques inspirés de la littérature présentés dans l'annexe 1, soit à l'aide de modèles numériques par éléments finis et éléments de frontière. C'est cette dernière option qui va être présentée. Pour cela le logiciel I-DEAS Master series, complété du module Vibro-acoustique, est utilisé.

Le premier effet étudié est l'effet du facteur GRILLE. Celui-ci avait été étudié auparavant, sur un téléphone réel, avec lequel un travail de compréhension des phénomènes physiques avait été fait. Les résultats de cette analyse sont donc reportés ici. Ensuite, les effets des autres facteurs sont étudiés par simulation numérique sur le prototype créé pour la modélisation. Un travail sur le facteur ÉPAISSEUR va être présenté. L'intérêt du modèle numérique est que celui-ci permet d'étudier directement l'effet de rayonnement du boîtier qui apporte encore plus d'information que l'étude seule de l'épaisseur de celui-ci. Enfin, l'effet de la cavité va être examiné. Ceci va permettre de vérifier les effets des facteurs MOUSSE et PLAQUE étant contenus dans la cavité du téléphone. Les effets des facteurs TROU et FUIITE ne sont pas validés. Premièrement parce que leur effet est négligeable sur toute la gamme de fréquence, sauf en basse fréquence pour le facteur TROU. Et deuxièmement, parce que l'effet aux basses fréquences du facteur TROU a été bien expliqué par interprétation physique du phénomène dans le chapitre 5.

6.3.1 Validation de l'effet de la grille

L'effet de la grille, d'après le plan d'expériences, sur le niveau de pression acoustique à 50 cm du téléphone selon la norme définis par l'ITU, est une diminution de la fréquence de la première résonance du haut-parleur, une atténuation de la pression acoustique mesurée à cette résonance ainsi qu'une amplification dans la bande de fréquence comprise entre 1500 Hz et 6000 Hz. Dans une étude préliminaire expérimentale sur un haut-parleur de téléphone commercial (Superset 410), ces effets ont aussi été constatés. La figure 41 présente une comparaison de mesures de pression entre le haut-parleur dans un baffle plan avec et sans la grille du téléphone. Dans ce cas, le haut-parleur a un diamètre supérieur (6 cm) au diamètre du haut-parleur (5 cm) utilisé dans les prototypes du plan d'expériences, et le volume entre la grille et la membrane du haut-parleur est aussi plus grand pour le téléphone réel que pour le prototype. Cette figure décrit néanmoins une diminution de l'amplitude pour le premier mode ainsi qu'un décalage en fréquence et une augmentation sur une large bande de fréquence comprise entre 1000 Hz et 2500 Hz.

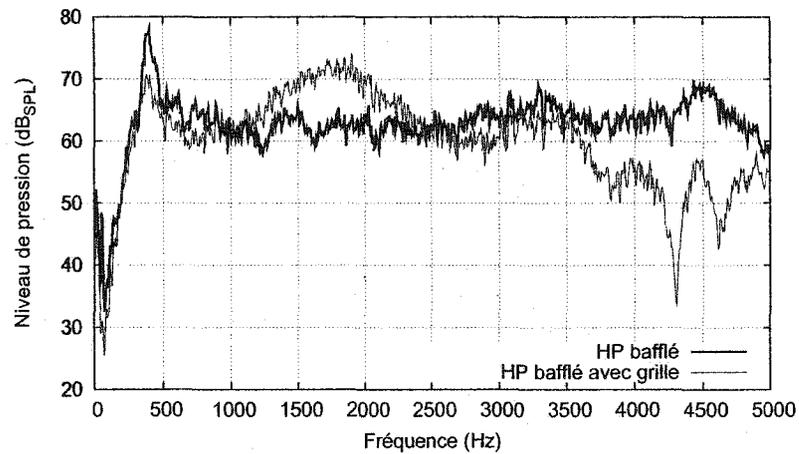


Figure 41 Pression acoustique à 50 cm du haut-parleur du S410 avec et sans la grille

Le premier modèle de grille est un modèle analytique. Le système membrane-tube-grille est considéré comme équivalent à un résonateur de Helmholtz (figure 42).

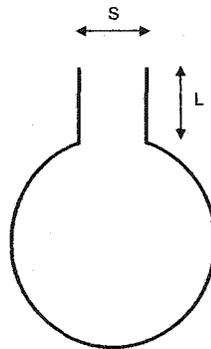


Figure 42 Représentation du résonateur de Helmholtz équivalent au système membrane-tube-grille

Dans cette analogie, la surface S est la surface équivalente des fentes de la grille du téléphone, soit une fente dont la largeur est environ égale à 44 cm et l'épaisseur environ égale à 1 mm.

$$\begin{aligned} S &= 0,44 * 0,001, \\ &= 44 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2. \end{aligned}$$

La longueur de la fente est d'environ $L = 5,5$ mm.

La résonance d'un tel système peut se calculer avec la relation suivante :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\frac{S}{L'V}},$$

avec L' la longueur corrigée, telle que

$$\begin{aligned} L' &= L + 1,7a, \\ &= 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ m.} \end{aligned}$$

Le paramètre a est l'épaisseur de la fente et $\lambda \gg a$. Le paramètre V est le volume du résonateur, soit un tube de diamètre 6 mm et de hauteur approximative 2 mm.

La fréquence obtenue est donc

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{340}{2\pi} * \sqrt{\frac{44 \cdot 10^{-5}}{0.0072 * \frac{\pi * .06^2}{4} * .02}}, \\ &\approx 1780 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

Un modèle numérique du même modèle de téléphone (Superset 410) a été fait. Ce modèle permet de reproduire le phénomène physique observé. La figure 43 représente en bas le maillage du haut-parleur utilisé sur ce modèle et en haut le maillage de la grille du téléphone. Ces deux parties du téléphone sont modélisées en éléments de surface. Les critères de maillage énoncés dans le chapitre 3 avec les relations 3.3, 3.3 et 3.4 sont utilisés pour générer tous les maillages du calcul.

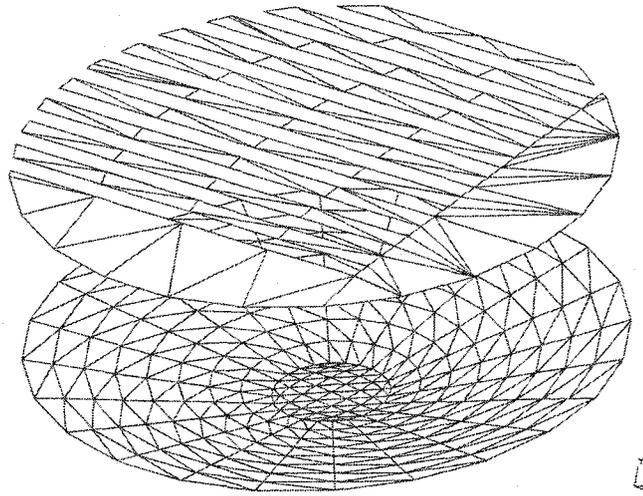


Figure 43 Maillage de la membrane du haut-parleur et de la grille du S410

Le résultat de ce calcul dans la position de mesure normalisée est tracé sur la figure 44.

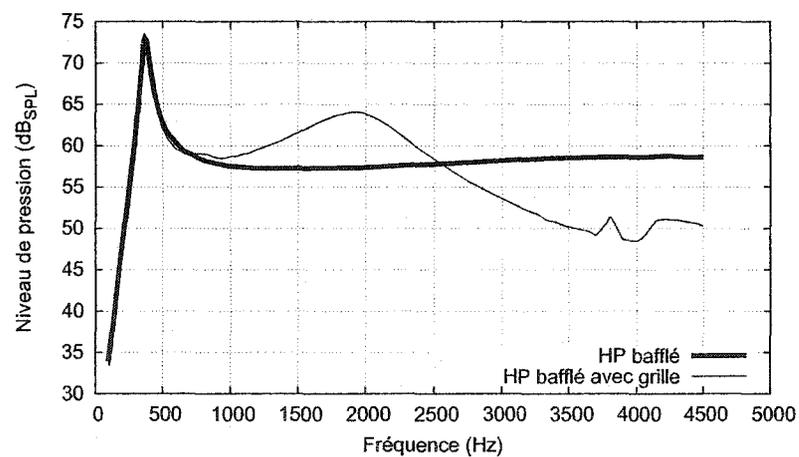


Figure 44 Pression acoustique dans la position normalisée (calcul)

- Première constatation, les phénomènes physiques recherchés sont retrouvés :
 - Le mode piston du haut-parleur à 370 Hz. Pour le modèle numérique, il n’y a aucun phénomène de variation de l’amortissement, car celui-ci est relié uniquement

au rayonnement. Il n'y a pas non plus de phénomène de masse ajoutée, car les longueurs d'onde sont grandes par rapport aux dimensions de la grille;

- Le phénomène d'amplification sur une large gamme de fréquence.
- Deuxième constatation, la gamme de fréquences pour l'amplification ne correspond pas exactement aux résultats expérimentaux. Le problème provient du choix du modèle. En effet, pour économiser du temps de calcul, le modèle a été dessiné en surface et non en volume, donc le maillage de la grille est fait en élément de surface. Pour une étude vibratoire sur la structure, cela ne cause pas de problème; mais pour une étude acoustique, la frontière entre la structure et le fluide ne correspond pas à la réalité du phénomène physique telle qu'expliquée dans la partie précédente, c'est-à-dire, à la présence d'un résonateur créé avec la masse d'air emprisonnée dans la grille du téléphone. Ce modèle permet bien de retrouver les phénomènes physiques observés dans le plan d'expériences, et dans la mesure complémentaire citée juste avant. Il ne permet pas de retrouver les fréquences exactes.

Les phénomènes observés expérimentalement avec le plan d'expériences sont validés. Néanmoins, pour retrouver le phénomène d'amplification dans la bonne gamme de fréquence, il aurait fallu modéliser la grille avec des éléments volumiques.

6.3.2 Validation de l'effet du boîtier et de la cavité à partir des prototypes

Le plan d'expériences permet de dire qu'à haute fréquence, le rayonnement du boîtier est négligeable. La limite en fréquence trouvée expérimentalement, à partir du plan d'expériences, est de 2000Hz . L'outil numérique permet de déterminer à partir de quelle fréquence le rayonnement du boîtier est négligeable, donc il valide ou conteste les résultats expérimentaux.

Pour diminuer le temps de calcul, plusieurs simplifications sont faites par rapport aux prototypes de forme parallélépipédique utilisés dans l'analyse expérimentale. La première simplification porte sur la forme du haut-parleur. Celui-ci est remplacé par une membrane circulaire de diamètre identique. Cette forme permet une simplification du mouvement, une réduction du maillage et une réduction du nombre de modes structuraux. La membrane est faite

d'un matériau de propriétés mécaniques équivalentes à celles de la membrane du haut-parleur réel, c'est-à-dire avec le même module d'Young, le même coefficient de poisson et la même épaisseur. L'effet du fluide sur la membrane, c'est-à-dire l'effet d'impédance acoustique, est conservé. Pour réduire encore le nombre d'éléments du calcul, uniquement le rayonnement de la face avant du boîtier est pris en compte dans tous les calculs de validation présentés dans cette partie. Cette simplification garde l'essentiel du phénomène, car c'est la face avant, de plus grande surface, qui est l'élément principal de rayonnement.

Ces simplifications permettent de réduire considérablement le nombre d'éléments sur le modèle et donc de faire les calculs plus rapidement. En effet, le coût du calcul est important étant donné la gamme de fréquence d'intérêt.

Pour la même raison, le calcul va se limiter à 5000 Hz. Pour le calcul, les maillages sont fait en fonction des critères des relations 3.3, 3.3 et 3.4 énoncés dans le chapitre 3. Cette limite en fréquence permet de voir tous les phénomènes physiques identifiés ainsi que les phénomènes de couplage avec la cavité identifiés autour de 4000 Hz dans le plan d'expériences.

Le comportement de la membrane circulaire est différent de celui de la membrane du haut-parleur. Le premier mode de résonance (mode piston) de la membrane circulaire est plus bas en fréquence que celui du véritable haut-parleur. Mais, comme pour le haut-parleur réel, il se trouve très en dessous du premier mode de cavité. Les phénomènes de couplage entre la cavité et la membrane sont donc représentatifs de la réalité. De plus, l'amplitude du rayonnement acoustique du mode piston de la membrane circulaire est comparable à l'amplitude de la membrane réelle. Ce prototype peut donc être utilisé pour valider les phénomènes physiques présents. Pour faire un modèle de prédiction, il est cependant nécessaire de travailler avec le haut-parleur réel.

Tableau X
Modes de structure et de cavité

Structure						Cavité	
Mode	Fréquence	Mode	Fréquence	Mode	Fréquence	Mode	Fréquence
1	117	34	2110	67	3631	1	0
2	204	35	2135	68	3843	2	811
3	330	36	2211	69	3863	3	1003
4	330	37	2213	70	3880	4	1293
5	388	38	2273	71	3886	5	1633
6	438	39	2278	72	3968	6	1925
7	604	40	2300	73	4011	7	2025
8	608	41	2417	74	4054	8	2189
9	652	42	2419	75	4059	9	2474
10	698	43	2480	76	4126	10	2627
11	728	44	2484	77	4166	11	2682
12	883	45	2513	78	4171	12	3084
13	942	46	2555	79	4203	13	3203
14	942	47	2819	80	4216	14	3247
15	987	48	2820	81	4222	15	3348
16	1081	49	2827	82	4307	16	3511
17	1146	50	2841	83	4365	17	3532
18	1146	51	2897	84	4414	18	3986
19	1170	52	2910	85	4517	19	4045
20	1332	53	2954	86	4534	20	4202
21	1336	54	2991	87	4577	21	4256
22	1392	55	3082	88	4656	22	4301
23	1412	56	3190	89	4725	23	4387
24	1502	57	3198	90	4736	24	4521
25	1634	58	3207	91	4763	25	4566
26	1667	59	3254	92	4783	26	4633
27	1682	60	3360	93	4864	27	4664
28	1752	61	3375	94	4893	28	4694
29	1776	62	3406	95	4926	29	4767
30	1779	63	3426	96	4956	30	4812
31	1780	64	3498	97	4959	31	4899
32	1906	65	3500				
33	2018	66	3608				

Le calcul étant fait pour valider les mesures du plan d'expériences, la forme du boîtier, pour le modèle numérique, correspond à la forme du prototype, c'est-à-dire une boîte de forme parallélépipédique. La configuration du système appuyé et angulé est aussi conservée pour le calcul numérique.

Les premiers calculs sont des calculs modaux, premièrement de la structure mécanique et deuxièmement de la cavité fermée. Le calcul couplé est ensuite fait en appliquant une force au centre de la membrane. Les résultats des calculs modaux sont représentés dans le tableau X pour la gamme de fréquence considérée, soit, jusqu'à 5000 Hz.

La force appliquée sur cette membrane est une force constante sur toute la gamme de fréquence. L'amplitude de cette force est de 0,1 N. L'ordre de grandeur correspond à la force électromagnétique d'un haut-parleur utilisé dans un téléphone mains-libres. Cette valeur a permis, dans le cas d'un modèle de haut-parleur réel, de retrouver l'amplitude de l'accélération au centre de la membrane du haut-parleur au mode piston de celui-ci. Cette force est répartie sur quatre (4) noeuds symétriques par rapport au centre de la membrane. La force n'est pas répartie de façon homogène pour être sûr d'exciter aussi les modes non symétriques. La figure 45 montre la forme de la membrane circulaire, le maillage éléments finis utilisé et la force appliquée sur ce maillage.

La simulation permet de calculer la pression acoustique au point défini comme réponse dans le plan d'expériences, c'est-à-dire à une distance de 50 cm du téléphone lorsqu'une force est appliquée sur la membrane (figure 45). Dans ce calcul couplé, il y a trois domaines séparés par deux frontières, représentés dans la figure 46 :

1. Le premier domaine est le fluide emprisonné dans la cavité. Ce domaine, étant fermé, est maillé avec des éléments finis.
2. Le deuxième domaine est la structure composée du boîtier et de la membrane. Ce domaine est aussi composé d'éléments finis.

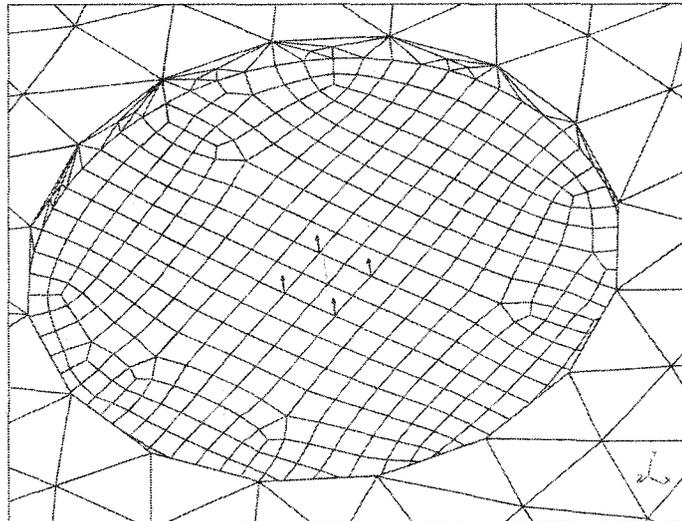


Figure 45 Représentation de la membrane et de la force d'excitation appliquée

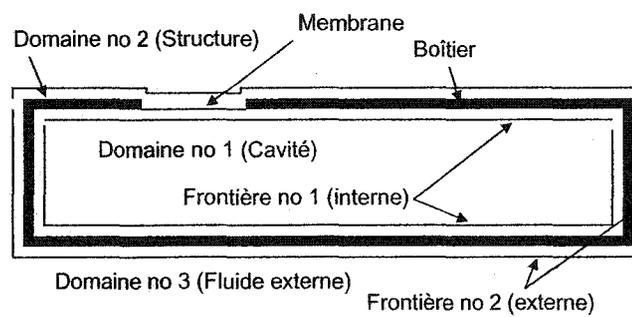


Figure 46 Domaines et frontières de calcul pour le prototype numérique

3. Le troisième est le fluide dans lequel rayonne le téléphone. Dans celui-ci, un calcul par éléments de frontière est fait.

Les deux frontières sont :

1. La frontière entre le fluide interne et la structure. Cette frontière est représentée par une couche d'éléments finis surfaciques.

2. La frontière entre la structure et le fluide externe. Cette frontière est maillée avec des éléments surfaciques. Elle va représenter la couche d'éléments de frontière permettant de calculer la pression acoustique en n'importe quel point du domaine de rayonnement.

Pour valider l'effet de la cavité et du boîtier plusieurs calculs vont être faits : les courbes représentées correspondent au point de calcul de la pression acoustique dans la position normalisée (figure 47).

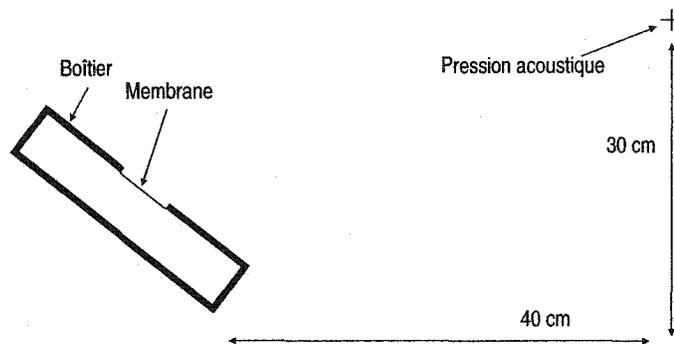


Figure 47 Variable de validation : pression à 50 cm.

Toutes les configurations de calcul sont présentées dans la figure 48. Elles sont décrites en détail dans la section lorsque le calcul est présenté.

La figure 49 représente les réponses pour les cinq configurations entre 0 Hz et 1000 Hz. Sur cette figure, les premiers modes sont identifiables.

Le premier pic, aux environs de 130 Hz, représente le mode de la membrane circulaire dans le boîtier. La fréquence de ce mode varie en fonction du couplage avec la cavité. Le deuxième pic (240 Hz) est un mode où la membrane et la face avant du boîtier sont en phase. Le troisième pic (700 Hz) est un mode de structure. Le pic à 800 Hz représente l'effet de couplage entre la structure et la cavité. Cette fréquence correspond au premier mode de cavité.

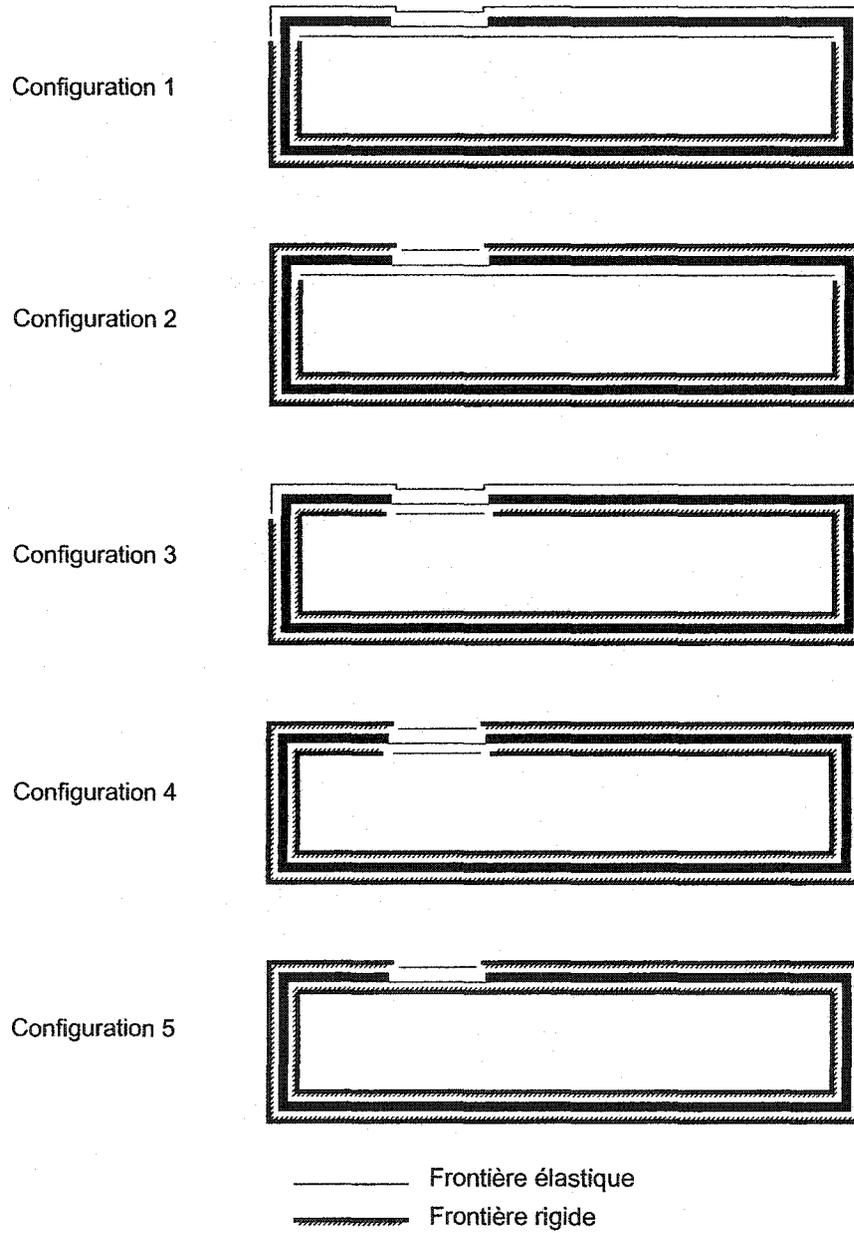


Figure 48 Les cinq configurations de calcul pour la validation par simulation numérique

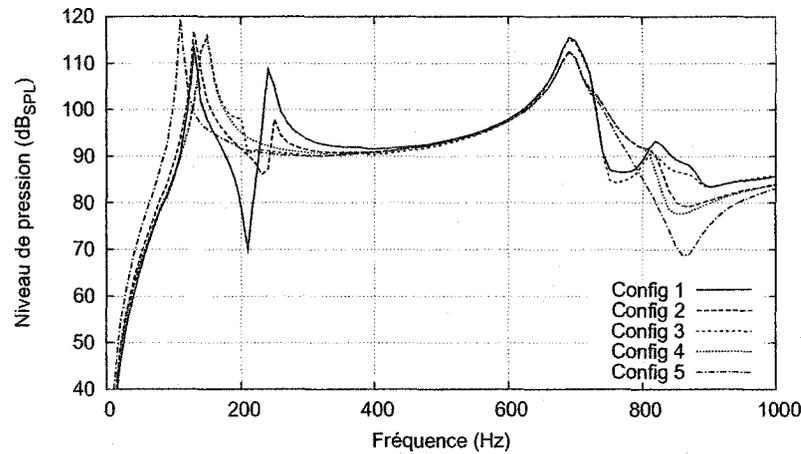


Figure 49 Représentation des réponses pour les cinq (5) configurations entre 0 et 1000 Hz

6.3.2.1 Validation de l'effet du boîtier

Pour voir la contribution du rayonnement du boîtier sur le rayonnement total, deux calculs sont présentés. Les deux calculs utilisent deux configurations différentes, dans lesquelles les conditions de rayonnement du boîtier diffèrent.

Ces configurations sont définies par les propriétés des deux frontières définies précédemment.

1. Dans la première configuration (Configuration 1, figure 48), le rayonnement du boîtier (représenté par la partie supérieure) est permis. Le prototype se trouve dans les conditions normales de rayonnement. La membrane ainsi que la face avant du prototype sont couplées avec la cavité, et rayonnent dans le domaine externe.
2. Dans la deuxième configuration (Configuration 2, figure 48), le rayonnement du boîtier est supprimé. La frontière de la cavité est inchangée, mais la frontière avec le fluide externe est rigide sur le boîtier. Le rayonnement se fait donc uniquement grâce à la membrane.

La réponse est représentée sur la figure 50 en trait gras pointillé pour la première configuration, et en trait fin pour la deuxième configuration. Sur cette figure, pour les deux courbes,

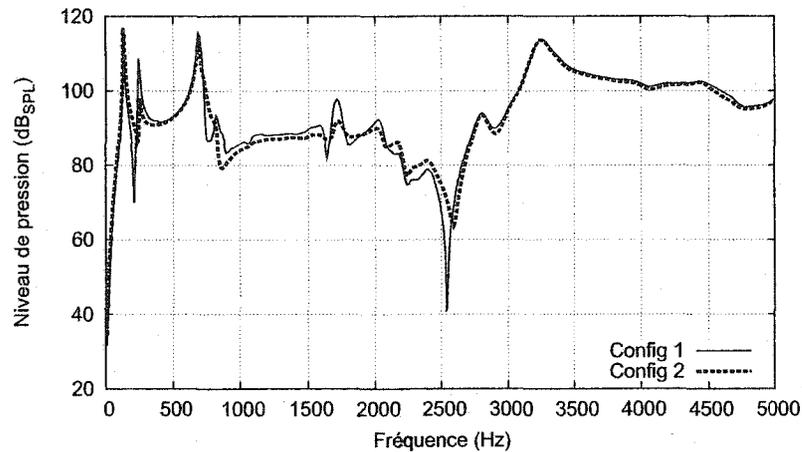


Figure 50 Différence de rayonnement avec (config. 1) ou sans (config. 2) prise en compte du boîtier - Cavité couplée avec le boîtier

le mode piston de la membrane est présent à 130 Hz. Ensuite, le mode, où la membrane et la face avant sont en phase, est plus marqué sur la courbe de la configuration 1 que sur celle de la configuration 2. En effet, étant donné la contribution non négligeable du boîtier sur le rayonnement de ce mode, le fait d'empêcher le boîtier de rayonner diminue l'amplitude de la réponse acoustique au niveau de ce mode. De la même façon, le pic à 800 Hz provenant de l'effet du premier mode de cavité est aussi réduit dans la courbe de la configuration 2.

La figure 51 montre la différence entre les deux configurations en fonction de la fréquence.

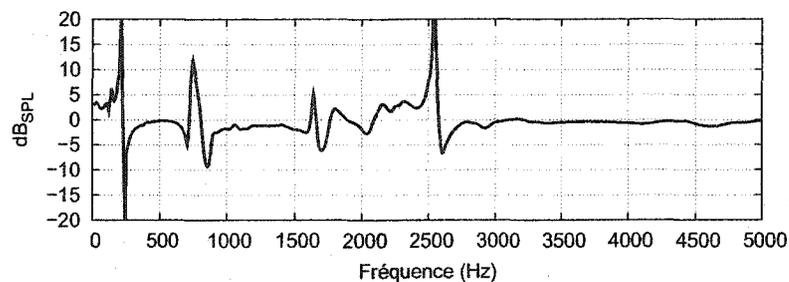


Figure 51 Différence entre les deux configurations précédentes

Du point de vue de l'analyse des effets des facteurs, les figures 50 et 51 peuvent être séparées en deux zones. Dans la première zone (jusqu'à 2500 Hz environ), les deux courbes sont

différentes. Dans la deuxième zone, les courbes sont presque identiques. La différence entre ses deux courbes est le rayonnement ou non du boîtier du prototype. Jusqu'à 2500 Hz, le rayonnement du boîtier contribue au rayonnement global du téléphone. À partir de 2500 Hz, la contribution du boîtier est négligeable devant celle de la membrane. Le plan d'expériences a permis de dire que l'effet du boîtier est important jusqu'à 2000 Hz. Ce qu'il est important de constater, c'est qu'il y a bien une fréquence à partir de laquelle le modèle peut être simplifié au point de vue de la géométrie.

6.3.2.2 Deuxième validation de l'effet du boîtier

La deuxième analyse au sujet du boîtier est la comparaison entre la configuration 3 et la configuration 4 (figure 48). La différence entre ces deux configurations est la même que celle entre la configuration 1 et 2. C'est-à-dire que dans un cas (configurations 1 et 3), le boîtier peut rayonner mais pas dans l'autre (configurations 2 et 4). Par contre, dans cette comparaison, le boîtier n'est pas couplé à la cavité.

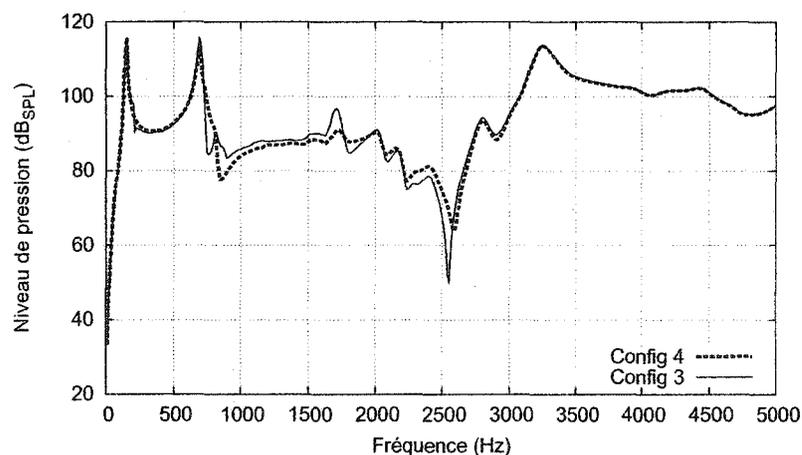


Figure 52 Différence de rayonnement avec (config. 3) ou sans (config. 4) prise en compte du boîtier - Cavité et boîtier non couplés

La figure 52 montre la représentation des deux configurations. La figure 53 montre la différence entre les deux configurations en fonction de la fréquence. La comparaison entre les figures 51 et 53 permet de valider l'analyse numérique sur le rayonnement du boîtier. Les écarts

entre ces figures proviennent uniquement de la disparition des phénomènes de couplage avec la cavité, dans la figure 53. Ceci est expliqué à la section suivante.

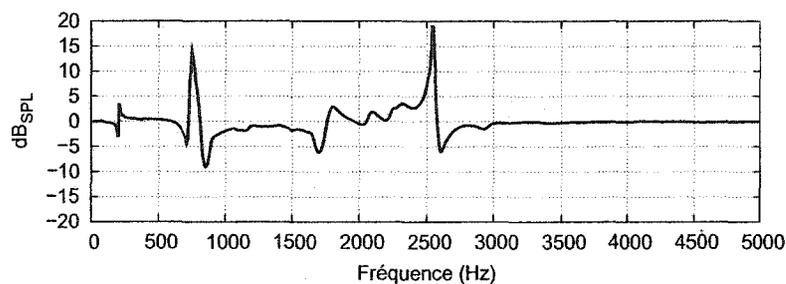


Figure 53 Différence entre les deux configurations précédentes

6.3.2.3 Validation de l'effet de la cavité

Deux résultats importants proviennent de l'analyse par plans d'expériences pour la cavité : premièrement, l'effet du couplage entre la cavité et la structure sur le rayonnement extérieur du téléphone se fait uniquement sur la surface de la membrane du haut-parleur, donc, le couplage entre la cavité et le boîtier est négligeable. Deuxièmement, le couplage par la membrane est important à 300 Hz (résonance), à 800 Hz, à 1700 Hz et au-delà de 4000 Hz (fréquences correspondant à l'apparition des modes de cavité dans le sens de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur de la cavité).

En utilisant le même prototype numérique que celui utilisé précédemment, ces deux résultats peuvent être vérifiés.

Le premier résultat est vérifié en comparant la configuration de rayonnement normal où il y a couplage entre la cavité et le téléphone (Configuration 1, figure 48) et la configuration où il y a un couplage seulement entre la cavité et la surface interne de la membrane (Configuration 3, figure 48).

La réponse de ce calcul est tracée dans la figure 54.

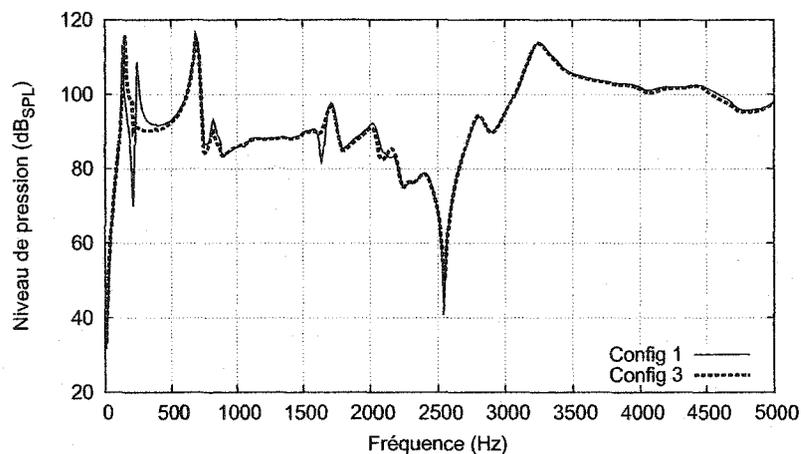


Figure 54 Différence de rayonnement entre boîtier couplé (config. 1) et boîtier non-couplé avec la cavité (config. 3)

Les deux courbes obtenues sont pratiquement identiques sur toute la gamme de fréquence. La figure 55 montre la différence entre les deux configurations en fonction de la fréquence.

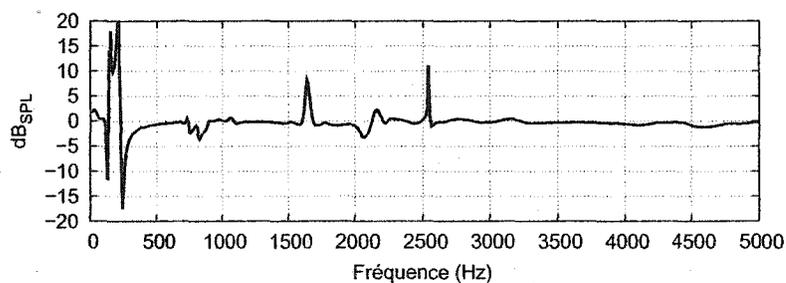


Figure 55 Différence entre les deux configurations

Les écarts entre les deux configurations sont de quatre natures différentes :

- Le premier écart se trouve dans la fréquence du premier mode de structure (mode piston de la membrane). Sur la courbe de la configuration 1, le mode piston se trouve à 130 Hz. Sur la courbe de la configuration 3, ce mode se trouve maintenant à 150 Hz. L'augmentation en fréquence est due à l'augmentation de la rigidité de la cavité devenue plus rigide par sa frontière avec le boîtier.

- Le deuxième écart important est à 240 Hz. Cette fréquence correspond au deuxième mode de structure. Celui-ci est un mode où le déplacement de la face avant du boîtier est important. Il est excité par voie acoustique dans la cavité. Lorsque le couplage entre le boîtier et la cavité n'est plus présent, ce mode n'est plus excité. Ce phénomène est aussi visible dans le paragraphe 6.2.3 sur l'étude des chemins de transmission (figure 39). Cet effet est en fait sous-estimé dans le plan d'expériences qui ne montre pas d'effet d'interaction entre les facteurs PLAQUE et ÉPAISSEUR ainsi qu'entre les facteurs MOUSSE et ÉPAISSEUR. En effet, dans le plan d'expériences, les facteurs PLAQUE et MOUSSE n'ont probablement que très peu d'effet au alentour de 200 Hz, compte tenu de la longueur d'onde importante.
- Le troisième type d'écart est celui retrouvé à 800 Hz, à 1700 Hz et à 2200 Hz. Ces fréquences correspondent à des modes de cavité. Les effets sont très ponctuels.
- Le quatrième écart est à 2550 Hz. Cette fréquence correspond à un minimum. L'incertitude à cette fréquence est plus importante.

Le couplage interne avec la cavité se fait donc principalement avec la membrane. Le résultat s'explique bien étant donné que la membrane du haut-parleur est faite d'un plastique très proche de celui constituant le boîtier. De plus, l'épaisseur réelle d'un boîtier de téléphone est d'au moins 2,5 mm pour un téléphone réel (3 mm pour le prototype) alors que l'épaisseur de la membrane du haut-parleur est d'environ 0,2 mm. L'influence du fluide à l'intérieur de la cavité est plus importante sur la membrane à cause de l'épaisseur de celle-ci.

La deuxième vérification est l'effet de la cavité sur le rayonnement du haut-parleur. Pour cette vérification, étant donné les conclusions précédentes sur le rayonnement du boîtier, uniquement le rayonnement de la membrane est pris en compte. C'est-à-dire que la frontière intérieure entre le fluide de la cavité et le boîtier est rigide. La frontière entre la cavité et la membrane peut être soit élastique, dans ce cas, le couplage entre la cavité et la membrane est pris en compte (configuration 4, figure 48), soit rigide (configuration 5, figure 48).

Sur la figure 56, la courbe en trait fin représente la réponse (pression à 50 cm) lorsque la frontière est entièrement rigide. Il n'y a pas de couplage pris en compte. La deuxième courbe, en trait gras pointillé, représente la réponse en fréquence au même endroit avec la frontière entre le fluide de la cavité et la membrane élastique. Sur cette figure, le pic du mode piston est

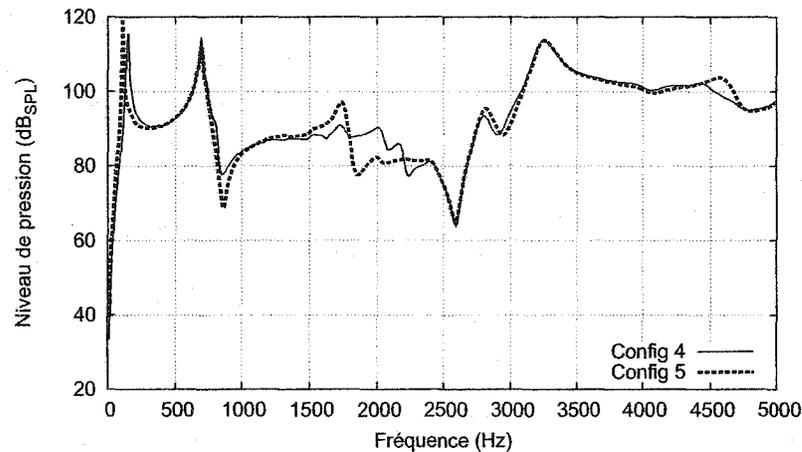


Figure 56 Différence de rayonnement entre membrane du haut-parleur couplée (config. 4) et non-couplée avec la cavité (config. 5)

à 150 Hz pour la courbe de la configuration 4 et à 110 Hz pour la courbe de la configuration 5. Dans la configuration 5, il n'y a plus de cavité présente à l'intérieur du boîtier donc, la rigidité de la cavité sur ce mode a disparue, ce qui cause un abaissement de la fréquence pour ce phénomène. Le pic à 700 Hz correspond au premier mode à symétrie axiale de la membrane. Cet effet se retrouve avec le haut-parleur réel à la fréquence de résonance du mode piston du haut-parleur, c'est-à-dire 300 Hz.

La figure 57 représente la différence entre les deux courbes de la figure 56. Cette figure permet d'analyser les effets locaux proches des résonances de cavité du boîtier, c'est-à-dire à 800 Hz, entre 1500 Hz et 2200 Hz et proche de 4500 Hz. Ces fréquences correspondent aux modes de cavité dans les trois axes de la cavité parallélépipédique. C'est ce qui a été constaté sur les effets des facteurs de la cavité, c'est-à-dire les facteurs MOUSSE et PLAQUE tels que représentés dans les courbes des figures 25 et 26 du chapitre 5. Les conclusions du plan d'ex-

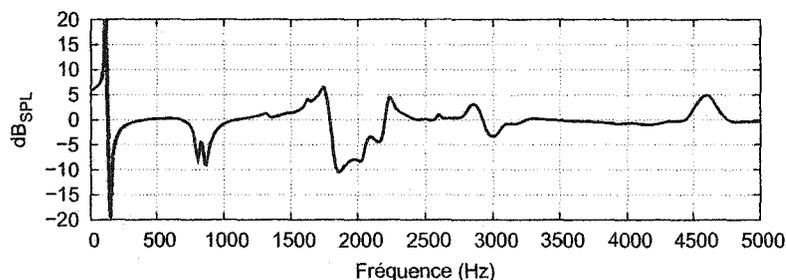


Figure 57 Différence entre les deux configurations

périences sur l'effet de la cavité sur la réponse extérieure sont donc validées par la simulation numérique.

6.4 Conclusion sur la validation de la caractérisation des effets par plans d'expériences

Ce chapitre a présenté la validation de la méthode proposée de trois façons.

Le plan d'expériences a été validé d'abord du point de vue de la méthode. Cette validation a été faite avec l'utilisation de la même méthode que la méthode proposée, sur un plus petit nombre de facteurs et avec un plus grand nombre d'expériences afin d'augmenter la précision de la mesure. Cette analyse sur un nombre de facteurs réduit a permis de valider plusieurs aspects de l'analyse initiale. D'abord, les effets des trois facteurs utilisés trouvés dans ce plan complet correspondent aux effets déterminés dans le chapitre 5. De plus, la variation trouvée sur la limite de signification était due à l'absence de répétition des mesures du plan d'expériences initial. Cette variation a été réduite dans cette analyse à environ 1 dB sur toute la gamme de fréquence des mesures. La limite de signification devient alors uniforme jusqu'à 7000 Hz. Enfin, les deux maxima restant sur cette nouvelle limite proviennent du peu de signal sur les mesures servant à l'analyse à ces fréquences.

Ensuite, l'analyse expérimentale par identification des chemins de transmissions a permis aussi de confirmer certains effets des facteurs, notamment ceux de la cavité. Toutefois cette analyse est limitée par la difficulté d'isoler les différents chemins de transmission, d'autant plus qu'ils ne sont pas réellement indépendants.

Enfin, les simulations numériques ont permis de montrer que le couplage entre la cavité et le téléphone se fait uniquement par la surface interne de la membrane du haut-parleur et que l'effet de la cavité dans le calcul numérique est semblable aux effets des facteurs MOUSSE et PLAQUE. Les simulations numériques ont aussi permis aussi d'affirmer qu'à partir d'une certaine fréquence, la contribution du boîtier sur le rayonnement total du téléphone est négligeable par rapport au rayonnement du haut-parleur. La limite en fréquence à partir de laquelle le rayonnement du boîtier n'est pas à prendre en compte a été précisée dans ce chapitre.

CONCLUSION

Ce travail de recherche a permis l'élaboration d'une méthode de choix de modèle acoustique à l'aide de plans d'expériences, ainsi que la mise en application et la validation de cette méthode dans le cas de la modélisation acoustique d'un téléphone mains-libres.

Le problème industriel complexe de la modélisation acoustique d'un téléphone mains-libres a été élargi à une problématique générale applicable à la modélisation acoustique de tous les produits manufacturés : comment déterminer quels éléments doivent être pris en compte, à quel niveau de détail et dans quelle bande de fréquence ? Étant donné les limites imposées par les ressources informatiques importantes que nécessite la modélisation acoustique par des techniques numériques, répondre à cette question avant de commencer la modélisation permet d'augmenter considérablement l'efficacité de la modélisation. Ce point est d'ailleurs illustré dans le chapitre 3 avec une application sur le téléphone mains-libres : les informations obtenues à l'aide des méthodes classiques n'ont pas permis d'optimiser le modèle et celui-ci n'a pu être validé même dans la gamme de fréquence restreinte correspondant à la téléphonie classique, c'est-à-dire de 300 Hz à 3400 Hz.

Pour répondre à la question posée, une nouvelle méthode a été conçue. Cette méthode est basée sur la théorie des plans d'expériences et adaptée à l'interprétation des résultats sous forme spectrale, ce qui constitue l'originalité principale de cette méthode : contrairement aux résultats de la littérature qui prennent en compte une variable dépendante unique, la variable est multiple, il s'agit de l'ensemble des réponses à chaque fréquence. Les autres originalités de la méthode sont dans les deux représentations graphiques des résultats par des spectres de l'effet en grandeur physique (dB) avec des limites de signification dans la même grandeur. L'outil ainsi développé est très utile en acoustique mais sa portée est plus grande : il sera utile dans tous les domaines où les résultats se présentent sous forme spectrale.

La mise en œuvre de cette méthode et sa validation dans le cas de la modélisation acoustique d'un téléphone mains-libres a donné lieu à une mise en œuvre originale de l'expérimenta-

tion nécessaire au plan d'expériences : au lieu d'utiliser un modèle existant de téléphone et de se heurter à la difficulté de la fabrication de pièces complexes pour réaliser les variations des facteurs, des prototypes à géométrie simplifiée ont été créés. En plus de faciliter la fabrication, ces prototypes ont permis de faciliter aussi la modélisation et l'interprétation des résultats. La validation a été particulièrement complète car effectuée de trois façons. Premièrement, les résultats statistiques du plan d'expérience ont été validés par un deuxième plan d'expérience permettant d'évaluer avec beaucoup plus de précision les sources de variations ; un résultat important trouvé a été que des variations de la limite de signification en fonction de la fréquence pouvaient s'expliquer par les variations du rapport signal sur bruit dans la mesure. Deuxièmement, une approche plus classique par identification expérimentale des différents chemins de transmission a permis de confirmer certains résultats. Troisièmement, une approche originale de validation des effets par des modèles numériques simplifiés a permis de confirmer et expliquer physiquement les résultats du plan d'expériences.

Du point de vue des retombées industrielles directes, la mise en application de la méthode a permis de définir certaines règles de conception pour la qualité acoustique des téléphones mains-libres au sein de la compagnie MITEL Networks, notamment le fait que l'effet de la structure sur le rayonnement acoustique est négligeable à haute fréquence et que le couplage entre la cavité et la structure est significatif principalement sur la surface de la membrane du haut-parleur. Cet apport de la modélisation numérique pour l'amélioration de la qualité acoustique des téléphones mains-libres a été présenté sous forme d'une communication de la compagnie MITEL Networks en 2001 [30]. Quant aux retombées industrielles à plus long terme, cette nouvelle application de la méthode des plans d'expériences peut s'appliquer au développement de tous produits manufacturés pour lesquelles la prédiction des propriétés acoustiques est nécessaire afin de d'améliorer la qualité acoustique du produit ou en réduire le bruit.

Ce travail a fait l'objet de trois communications à des congrès [31, 32, 33] et une publication dans une revue avec comité de lecture [34] a été soumise en octobre 2003.

ANNEXE 1

UTILISATION DE SIMULATION ANALYTIQUE

La modélisation analytique permet de vérifier les phénomènes de résonance dans le cas de système simple. Pour le prototype à géométrie simplifiée utilisé, il est possible de trouver les fréquences naturelles de la cavité parallélépipédique en supposant que le couplage avec la structure est négligeable. Il est aussi possible de déterminer les fréquences propres d'une plaque appuyée et d'une membrane circulaire. Les calculs présentés dans cette annexe sont repris de la littérature.

1.1 Cavité à parois rigides

L'effet de la cavité sur la réponse extérieure existe aux fréquences correspondant aux modes de cavité. Les modes de cavité sont des modes de pression. Le calcul de ces modes se fait avec la résolution de l'équation de propagation de pression dans une cavité à parois rigides, c'est-à-dire :

$$\Delta p + k^2 p = 0, \quad (1.1)$$

avec pour conditions limites, la vitesse sur la frontière de la cavité est nulle :

$$\mathbf{U} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \mathbf{grad} p = 0. \quad (1.2)$$

La solution générale d'un tel problème est une solution du type

$$p(M) = A \exp [\pm k_x x \pm k_y y \pm k_z z], \quad (1.3)$$

soit dans l'une des dimensions du problème :

$$U(x) = \frac{k_x}{\rho_0 \omega} [A_x \cdot \exp(-jk_x x) - B_x \cdot \exp(+jk_x x)] \cdot \exp(j\omega t). \quad (1.4)$$

La résolution de ce problème est présentée dans l'ouvrage de C. Lesueur [17].

$$\text{À partir des dimensions de la cavité } \begin{cases} L = 217 \text{ mm} \\ l = 177 \text{ mm} \\ h = 43 \text{ mm} \end{cases}, \text{ et de l'équation de dispersion}$$

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (1.5)$$

il est possible de déterminer une relation entre les fréquences de résonance de la cavité, pour une cavité à parois rigides, et les dimensions de la cavité. La vitesse U étant nulle à la frontière, l'équation de dispersion devient

$$f_{p,q,r} = \frac{c}{2} \left[\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{l^2} + \frac{r^2}{h^2} \right]^{1/2}, \quad (1.6)$$

et la représentation modale est

$$p_N(M) = A_N \sin \frac{p\pi x}{L} \sin \frac{q\pi y}{l} \sin \frac{r\pi z}{h}, \quad (1.7)$$

avec $p, q, r = 0, 1, 2, \dots$

Les fréquences calculées grâce à la relation 1.7 ainsi que les fréquences calculées à partir du modèle numérique présenté dans le chapitre 3 sont reportées dans le tableau I.

Les fréquences des modes, trouvées avec le modèle analytique, ont été retrouvées avec un modèle numérique et une mesure de pression à l'intérieur de la cavité lorsque celle-ci est excitée par le haut-parleur (présentées dans le chapitre 3).

Dans le tableau I, l'écart de fréquence entre le calcul analytique et la mesure augmente en fonction de la fréquence. En effet, à plus haute fréquence, les obstacles à l'intérieur du boîtier, c'est-à-dire l'aimant du haut-parleur, influent sur la forme du mode et donc causent un décalage en fréquence.

1.2 Plaque simplement appuyée

Le calcul analytique pour une plaque simplement appuyée de longueur L et de largeur l sert à identifier les contributions sur le rayonnement acoustique du téléphone de la face avant du boîtier.

La formulation du problème est donnée par l'équation du mouvement suivante

$$D \cdot \nabla w(x, y, t) + M \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1.8)$$

avec $w(x, y, t)$ le déplacement perpendiculaire à la plaque aux coordonnées (x, y) et

$$\left\{ \begin{array}{l} D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Rigidité de flexion,} \\ M = \rho h \quad \text{Masse surfacique,} \\ \nabla = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}. \end{array} \right.$$

Aux limites (sur les bords de la plaque), le déplacement est nul,

$$w = 0.$$

La résolution de ce système est tiré de l'ouvrage de C. Lesueur [17] et donne la relation suivante pour déterminer les fréquences de résonance de la plaque, soit :

$$\omega_{mn} = \left(\frac{D}{M}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \right]. \quad (1.9)$$

La relation suivante permet de représenter les modes propres

$$w_{mn}(x, y) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{n\pi y}{l}. \quad (1.10)$$

La résolution analytique de la plaque permet d'identifier les premières fréquences de résonance, mais est rapidement inefficace. Les conditions aux limites réelles ainsi que la charge provenant du haut-parleur sur la plaque ne peuvent être formulées analytiquement.

1.3 Membrane circulaire simplement appuyée

L'expression du problème provient de l'ouvrage de R.J. Gibert [9]. La formulation présentée permet de calculer les modes axisymétriques. Mais la simplification de la forme du haut-parleur à une membrane ne permet pas d'ajuster plusieurs modes successifs.

Les modes axisymétriques peuvent être calculés avec la relation suivante

$$f_{0m} = \frac{k_{0m}^2}{4\pi} \frac{h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}, \quad (1.11)$$

et les modes peuvent être représentés avec la relation suivante

$$w_{0m}(r) = I_0(k_{0m})J_0\left(k_{0m}\frac{r}{R}\right) + J_0(k_{0m})I_0\left(k_{0m}\frac{r}{R}\right). \quad (1.12)$$

L'intérêt d'utiliser une membrane circulaire est de pouvoir faire des calculs de couplage entre la cavité et la membrane rapidement. Les phénomènes physiques observés avec cette simplification sont aussi présents dans le problème réel, seules les fréquences varient.

1.4 Plaque couplée avec une cavité

La plaque couplée avec une cavité est étudiée dans les articles de A.J. Pretlove [15, 16]. La résolution analytique, étant complexe, est inutile étant donné qu'un calcul à l'aide d'un modèle numérique est réalisé, au chapitre 6, pour expliquer les phénomènes de couplage entre la cavité et les différentes parties de la structure.

1.5 Conclusion

L'intérêt principal de la modélisation analytique : dans le cas de la géométrie simple, le calcul est rapide mais vite limité par la prise en compte des conditions aux limites. L'utilité principale est d'obtenir des ordres de grandeur pour les fréquences des modes principalement pour la cavité. Pour tout ce qui est du rayonnement acoustique du téléphone, l'outil numérique est nécessaire.

ANNEXE 2

VÉRIFICATION DES EFFETS DES FACTEURS MOUSSE ET ÉPAISSEUR

Cette annexe présente, pour les facteurs MOUSSE et ÉPAISSEUR, les résultats des vérifications entre les effets mesurés avec le plan d'expériences du chapitre 6 par rapport à ceux mesurés avec le plan d'expériences du chapitre 5.

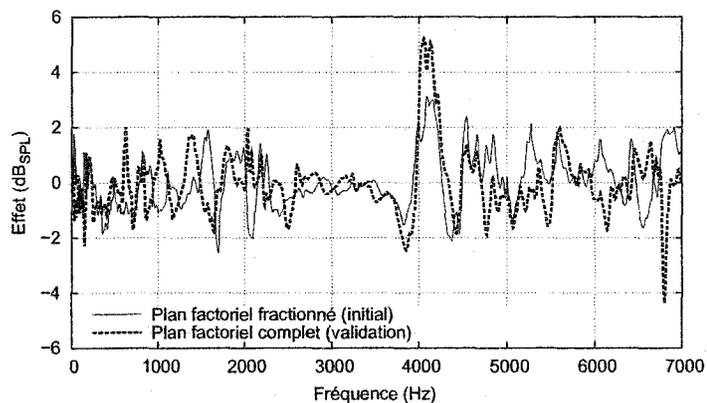


Figure 58 Vérification de l'effet du facteur MOUSSE

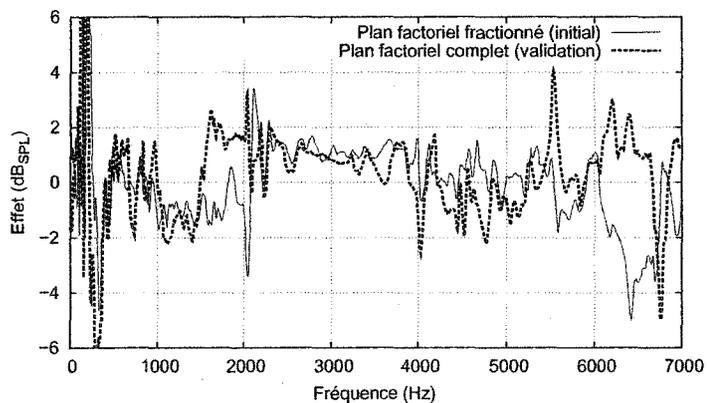


Figure 59 Vérification de l'effet du facteur ÉPAISSEUR

ANNEXE 3

**EFFET DES INTERACTIONS NON DOUBLES REPRÉSENTÉES DANS LE
DOCUMENT PRINCIPAL**

Cette annexe présente les résultats des interactions non représentées, trouvées dans le chapitre 5.

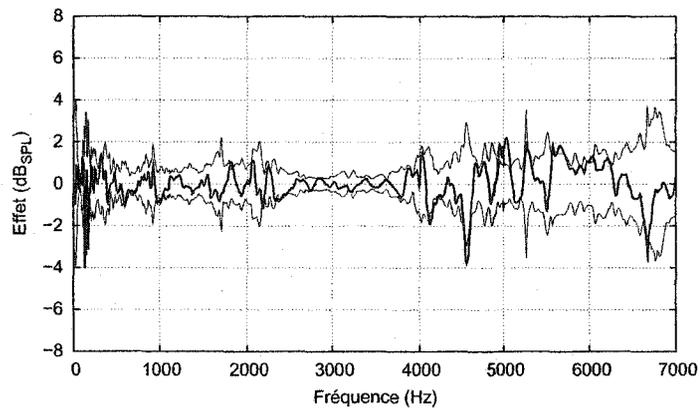


Figure 60 Effet de l'interaction entre les facteurs PLAQUE et ÉPAISSEUR

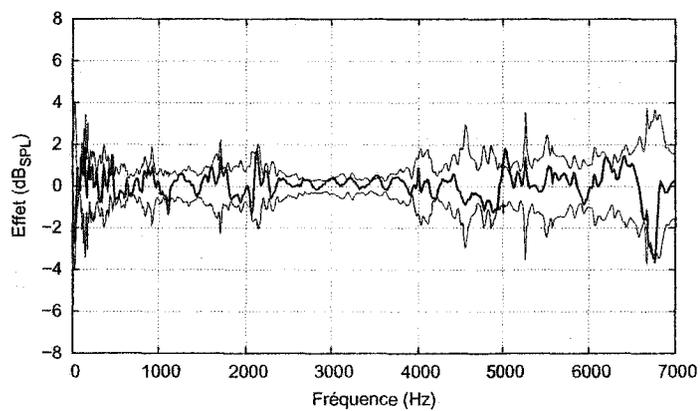


Figure 61 Effet de l'interaction entre les facteurs FUIITE et ÉPAISSEUR

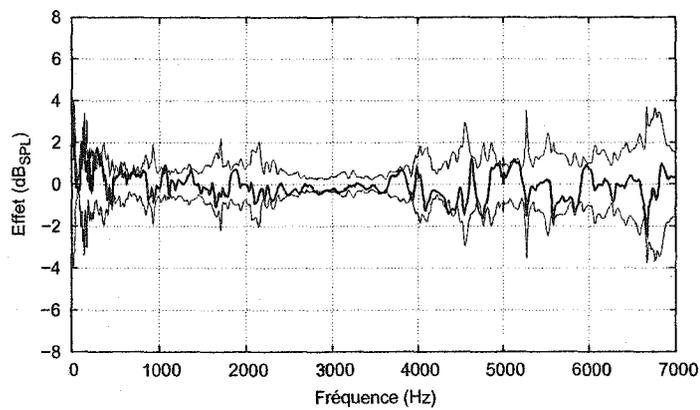


Figure 62 Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et ÉPAISSEUR

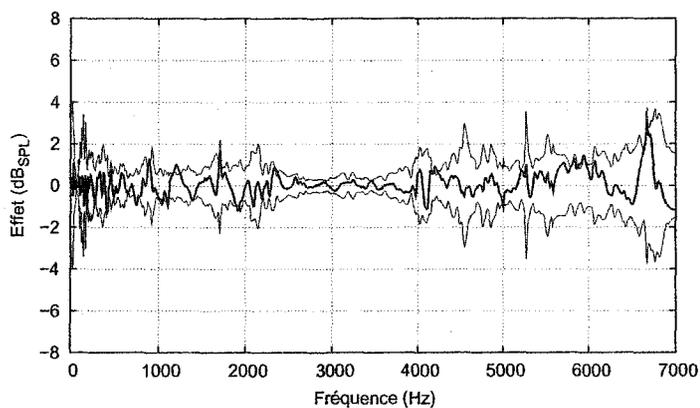


Figure 63 Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et FUIITE

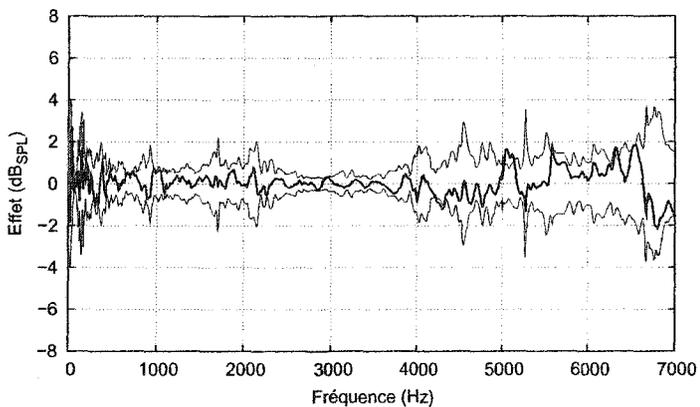


Figure 64 Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et MOUSSE

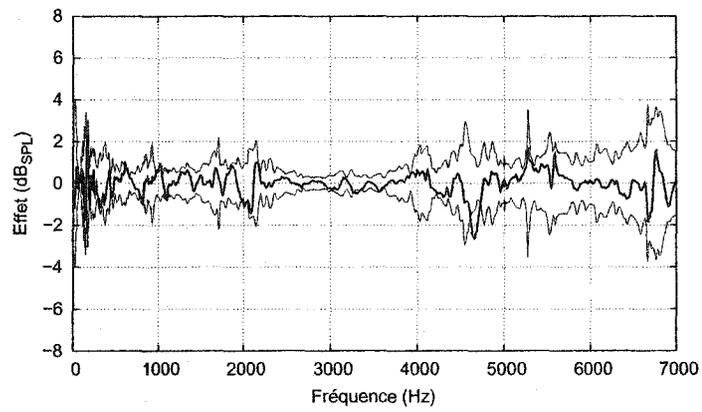


Figure 65 Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et PLAQUE

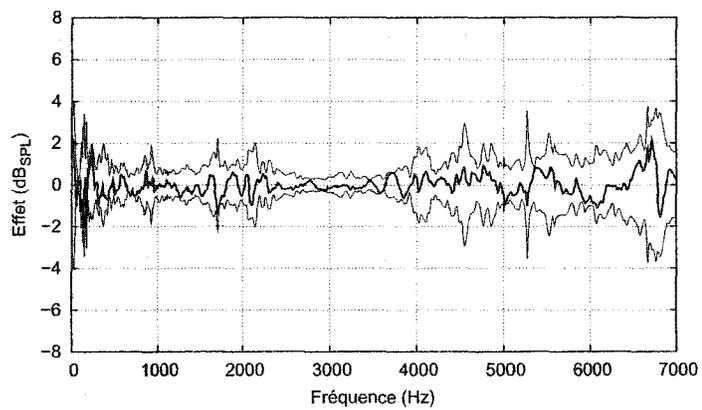


Figure 66 Effet de l'interaction entre les facteurs GRILLE et TROU

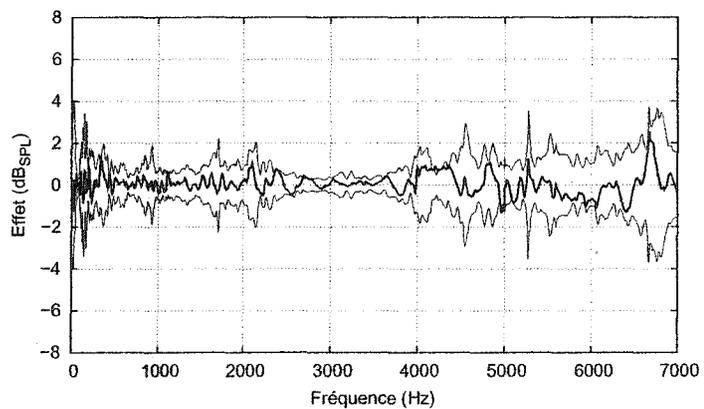


Figure 67 Effet de l'interaction entre les facteurs MOUSSE et FUITE

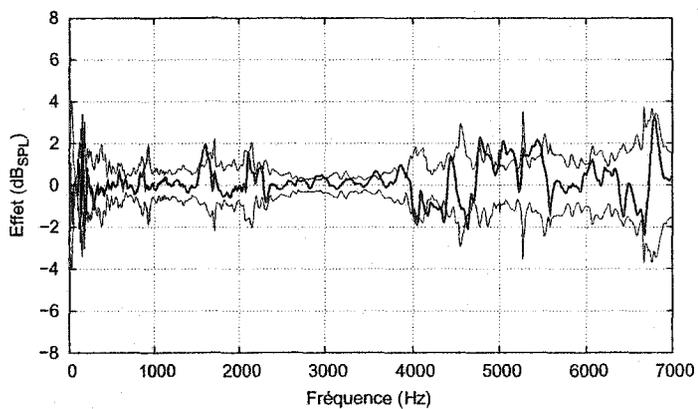


Figure 68 Effet de l'interaction entre les facteurs MOUSSE et PLAQUE

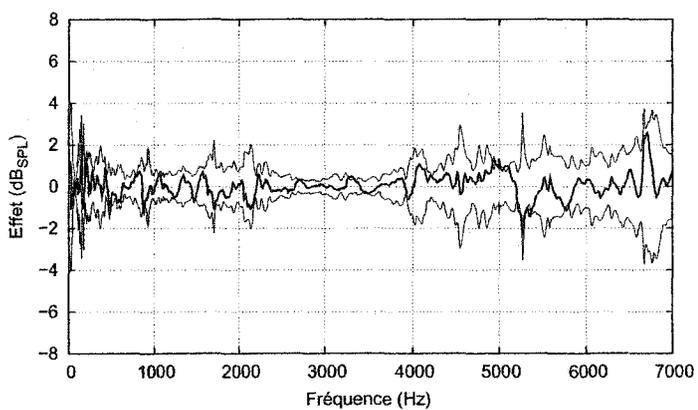


Figure 69 Effet de l'interaction entre les facteurs PLAQUE et FUITE

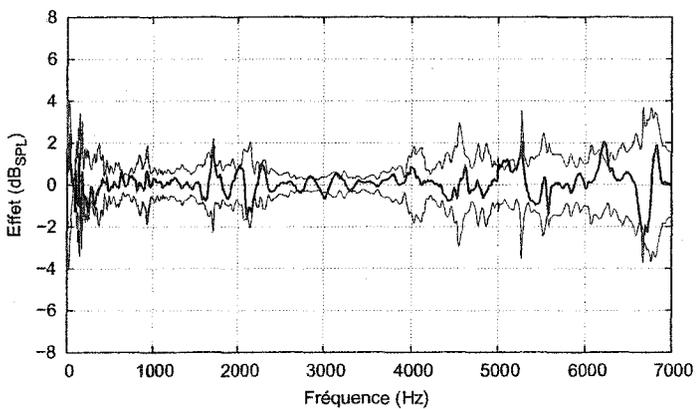


Figure 70 Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et FUITE

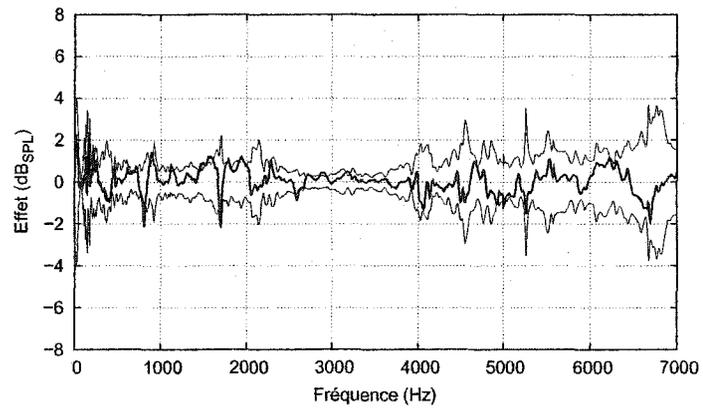


Figure 71 Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et MOUSSE

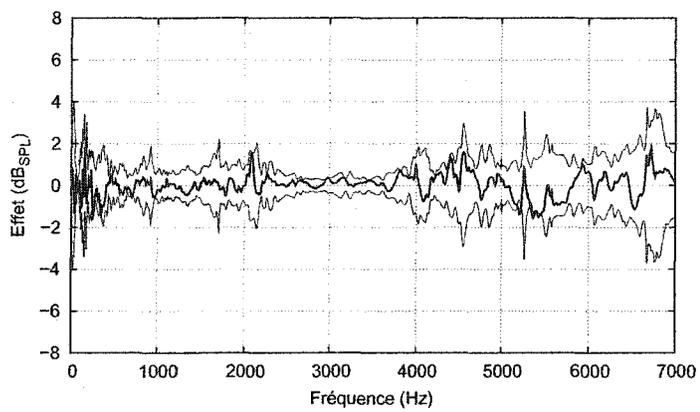


Figure 72 Effet de l'interaction entre les facteurs TROU et PLAQUE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ITU-T Draft revised recommendation. Transmissions characteristics of hands-free telephones, 1995.
- [2] ITU-T Draft revised recommendation. Transmissions characteristics of wide band hands-free telephones, 1995.
- [3] Eberhard Hänslér. The hands-free telephone problem - An annotated bibliography. *Signal Processing*, 27 :259–271, 1992.
- [4] Eberhard Hänslér. The hands-free telephone problem - An annotated bibliography update. *Ann. Télécommun.*, 49(7-8) :360–367, 1994.
- [5] Beaugeant C., Le Bouquin J. R., Scalart P., and Faucon G. Synthèse sur la réduction conjointe de bruit et d'écho pour les systèmes mains-libres. *Ann. Télécommun.*, 55(8-10) :538–552, 2000.
- [6] Birkett A.N. and Goubran R.A. Limitations of hands-free acoustic echo cancellers due to nonlinear loudspeaker distortion and enclosure vibration. In *IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics Proceedings of the 1995 IEEE*, New Paltz, NY, USA, 15-18 octobre 1995.
- [7] Mario Rossi. *Electroacoustique*. Presses polytechniques romandes, 1986.
- [8] Beranek Leo L. *Acoustics*. McGraw-Hill, New York, USA, 1954.
- [9] René-Jean Gibert. *Vibrations des structures : interactions avec les fluides sources d'excitation aléatoires*. Eyrolles, Paris, 1988.
- [10] Andre L. Goldstein and Samir N. Gerges. Loudspeaker modelling and simulation. *Noise Vib. Worldwide*, 29(7) :19, 1998.
- [11] M Kaltenbacher, M. Rausch, M Landes, and R. Lerch. Numerical modelling of electrodynamic loudspeakers. *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, 18(3) :504–514, 1999.
- [12] M. Rausch, R. Lerch, M. Kaltenbacher, G. Landes, Krump, and L. Kreitmeier. Optimization of electrodynamic loudspeaker-design parameters by using a numerical calculation scheme. *Acta Acustica Stuttgart*, 85(3) :412–419, 1999.
- [13] Zienkiewicz O. C, Taylor R. L, and Saiac Jacques-Herve. *La méthode des éléments finis : formulation de base et problèmes, traduit par Jacques-Herve Saiac ... [et al.] - The*

- finite element method : basic formulation and linear problems*. Association française de normalisation, Paris, 1991.
- [14] Jean-Louis Batoz and Gouri Dhatt. *Modélisation des structures par éléments finis*. Sainte-Foy : Presses de l'Université Laval ; Paris : Hermès, 1990-1992.
- [15] Pretlove A. J. Free vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 2(3) :197–209, 1965.
- [16] Pretlove A. J. Forced vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 3(3) :252–261, 1966.
- [17] Claude Lesueur. *Rayonnement acoustique des structures : vibro-acoustique interactions fluide-structure*. Eyrolles, Paris, 1988.
- [18] Kirkup S.M. and Jones M.A. Computational methods for the acoustic modal analysis of an enclosed fluid with application to a loudspeaker cabinet. *Applied Acoustics*, 48(4) :275–299, 1996.
- [19] Timoshenko S. *Théorie des plaques et des coques*. Paris et Liège, 1988.
- [20] Leissa Arthur W. *Vibration of plates*. American Institute of Physics, New York, NY, USA, 1993.
- [21] Abdulnour G, Dudeck R, and Smith M. Effect of different maintenance policies on the J.I.T. production system. *International Journal of Production Research*, 33(2) :565–583, February 1995.
- [22] Lam Tim Fai. Fea applications in doe and design optimization. In *Proceedings of the 1997 1st Electronic Packaging Technology Conference, EPTC*, pages 177–182, Octobre 1997.
- [23] Xianke Gao, Shixin Chen, Zhejie Liu, and Teck-Seng Low. Optimization and sensitivity analysis of HDD spindle motors to manufacturing process noises using fea and taguchi method. In *Digests of the intermag conference*, pages EQ–06, Mai 1999.
- [24] T. Ogle and L. Hoornberger. Technical note : Reduction of measurement variation : Small acoustic chamber screening of hard disk drives. *Noise Controle Eng. J.*, 49(2) :103–107, 2001.
- [25] Savage J.C. and J.P. Matterazzo. Application of design of experiments to determine the leading contributors to engine valvetrain noise. In *SAE Special Publications 972, New Engine Design and Engine Component Technology, paper 930884, International Congress and Exposition*, pages 193–198, Detroit, Michigan, 1-5 mars 1993.

- [26] R.S. Thomas, P.J. Stanecki, and P.H. Creutz. Development process to improve vehicle sound quality. In *SAE Preprints 244, Proceedings of the 1991 Noise and Vibration Conference*, pages 349–358, Traverse City, Michigan, 13-16 mai 1991.
- [27] Thomas M., Laville F., Beauchamp Y., and Simard F. An experimental design for reducing riveting noise. In *22nd International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Le Caire, Egypte, 20-22 décembre 1997.
- [28] Lessard N., Charron F, and Laville F. Using experimental design to reduce product sound level and variability. In *Congress on Air and Structure Borne Sound and Vibration*, Montréal, 1994.
- [29] Montgomery Douglas C. *Design and analysis of experiments Fourth edition*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
- [30] Dedieu S. and Moquin P. Use of BEM/FEM to improve handsfree telephone audio quality. In *Cahiers des actes, Semaine Canadienne d'Acoustique*, volume 29, pages 80–81, Septembre 2001.
- [31] Brun-Berthet J., Laville F., and Dedieu S. Using experimental design to choose an acoustical model for a hands-free telephone. In *139th Meeting, Acoustical Society of America*, pages 60–73, Columbus, Ohio, 1-5 novembre 1999.
- [32] Brun-Berthet J., Laville F., and Dedieu S. L'utilisation de plans d'expérience pour choisir la modélisation acoustique d'un téléphone mains-libres. In *Cahiers des actes, Semaine Canadienne d'Acoustique*, volume 27, Victoria, BC, 18-19 octobre 1999.
- [33] Brun-Berthet J. and Laville F. Validation d'une méthode de plans d'expérience appliquée aux choix des modèles acoustiques. In *Cahiers des actes, Semaine Canadienne d'Acoustique*, volume 28, Sherbrooke, Qc, Octobre 2000.
- [34] Brun-Berthet J. and Laville F. Using experimental design to characterize structural elements effect on a product acoustical response. *J. Acoust. Soc. Am.*, Soumis en octobre 2003.