

Table des matières

I	Introduction	1
1	Préambule	1
2	Stenheim	1
II	Cahier des charges	3
3	Description du problème	3
4	Tâches à effectuer	3
5	Planning	4
III	Analyse	5
6	Le haut-parleur	5
6.1	Eléments d'une chaîne hifi	5
6.2	Composition	5
6.3	Fonctionnement	6
6.4	Paramètres de Thiele & Small	6
6.5	Types de distorsion	7
6.5.1	Linéaire	7
6.5.2	Non-linéaire	8
6.6	Éléments non-linéaires	10
6.6.1	Facteur de force - Bl	10
6.6.2	Raideur de la suspension - k_{ms}	11
6.6.3	Autres	12
6.6.4	Tableau récapitulatif	12
7	Techniques de compensation sur haut-parleur	12
7.1	Basée sur les mesures	13
7.2	Basée sur le modèle	14
7.3	Mixte	14
8	Recherche des paramètres non-linéaires	15
8.1	Par la mesure	15
8.2	Table de compensation	16
8.3	Linéarisation	17
8.4	Suppression des harmoniques	18
9	Besoins de l'entreprise	18
10	Systèmes de compensation existants	19
10.1	Voigt	19
10.2	3A - Andante	20
10.3	Klippel - Controlled Sound	21
10.4	Devialet - Sam	22
10.5	Autres	23

11	Modélisation de haut-parleur	24
11.1	Partie électrique	24
11.2	Partie mécanique	25
11.3	Schéma Complet	26
11.4	Modélisation de ScanSpeak	28
11.5	Modélisation de Klippel	28
IV	Implémentation	30
12	Schéma bloc du système	30
13	Matériel utilisé	30
13.1	Outils de mesure	30
13.1.1	Carte d'acquisition	30
13.1.2	Sonde de courant	31
13.1.3	Sonde de tension	31
13.1.4	Capteurs lasers	32
13.2	Matériel mis à disposition	34
13.2.1	Amplificateur audio	34
13.2.2	Haut-parleur	34
14	Support capteur laser	35
15	Déroulement de la mesure	36
16	Signaux de test	36
17	Labview	38
17.1	VI : instrumentation virtuelle	38
17.2	VI de mesures	39
17.2.1	Bloc de lancement de mesure : Signal And Acquisition	39
17.2.2	Bloc de traitement : Data Treatment	39
17.2.3	Bloc de modélisation	39
17.2.4	OADM adapter	39
17.2.5	Peak detector	39
17.2.6	Laser Delay	40
17.2.7	Filtre à distorsion	40
V	Résultats	41
18	Validation du modèle linéaire	41
19	Distorsion mesurée	42
20	Compensation	43
VI	Conclusion	43
21	Analyse des résultats	44
22	Evolutions futures	44
23	Remerciements	44

VII	Annexes	46
A	Glossaire	46
B	Liste de figures	46
C	Documents	47
C.1	Datasheet ScanSpeak 32W/4878T00	47
C.2	Article : Modeling of nonlinear coil in a ferroresonant circuit	47
C.3	Andante 3A article	47
C.4	Mise en plan du support laser	47
C.5	Dix mesures de distorsion	47
D	Liens utiles	47
D.1	Modélisation de haut-parleur	47
D.2	Semi-inductance	47
D.3	Systèmes de compensations	48
D.4	Distorsion	48
D.5	Labview	48

Première partie

Introduction

1 Préambule

Dans le domaine de l'audio, chaque élément d'un système de retranscription sonore est important. Le principe est de recomposer au plus juste une musique ou ambiance par rapport à l'originale jouée par des musiciens par exemple. Le spectateur devrait presque ressentir que les artistes se trouvent dans la même pièce que lui. Des éléments tels que les enceintes, l'amplificateur, l'acoustique de la salle,... sont à prendre en compte pour obtenir le meilleur rendu. Le prix élevé d'une bonne installation audio provient du fait qu'aucune partie de la chaîne n'est laissée au hasard.

Le terme « hifi » pour haute-fidélité est souvent utilisé pour indiquer qu'un produit munit de ce "label" serait de meilleure facture qu'un autre qui ne l'a pas. Cependant, cette appellation ne se base pas sur des normes prédéfinies et peut donc être utilisée librement.

Cette thèse s'intéresse à l'étude pour l'amélioration d'une partie de la chaîne audio, le haut-parleur. Elle est faite en collaboration avec une entreprise du nom de Stenheim.

2 Stenheim

Stenheim¹ est une entreprise suisse basée à Vétroz qui travaille dans la conception d'enceintes sonores haut de gamme. Elle fut créée en 2010 par 5 membres fondateurs (Jean-Loup Afresne, Antoine Petroff, Maxime Perrin, Sébastien Benz and David Jilli). En peu de temps, elle s'est fait un nom à travers le monde. En effet, une bonne partie de ses clients se trouve en Asie (Chine, Thaïlande, Japon, ...). D'autres distributeurs se trouvent encore en Espagne, Suède, Danemark, ... L'entreprise est actuellement dirigée par Mr. Panchard Jean-Pascal.

Stenheim s'est fait découvrir grâce à des produits tels que les Alumine (2, 3, 5) et les enceintes Référence. La particularité de ces boîtiers est qu'ils ont été conçus en métal afin d'obtenir un meilleur rendu sonore et diminuer sa déformation lorsque les haut-parleurs sont en mouvement (le métal étant plus rigide que le bois, matériel utilisé habituellement). Ces modèles ont aussi l'originalité de posséder des haut-parleurs placés symétriquement de chaque côté du boîtier. Cela permet de réduire les vibrations agissant sur le boîtier ainsi que « d'élargir » le son. L'entreprise s'occupe aussi de la création de filtres pour enceintes. Le reste de la chaîne audio est faite par un autre fabricant.

Actuellement, beaucoup de fabricants sont en compétition pour proposer le système audio le plus performant. Stenheim ne déroge pas à la règle. Leurs enceintes sont déjà travaillées et ont démontré des résultats plus que satisfaisant. Le point restant à améliorer serait les haut-parleurs placés dans ces boîtiers. Cela ne veut pas dire qu'ils ne sont pas déjà choisis avec soin mais de part leur conception, les transducteurs ont tendance à déformer légèrement ou plus le son qu'ils émettent. Cette distorsion est surtout audible dans les basses fréquences et à fort volume, lorsque la membrane du haut-parleur a une grande amplitude de déplacement.

Il n'existe actuellement que peu de systèmes de compensation et pas forcément adaptés au besoin de l'entreprise, sans parler de leur prix élevé. C'est pourquoi Stenheim souhaiterait développer son propre produit.

1. Source : <http://www.stenheim.com/history/>



FIGURE 1: Alumine 5²

2. Source :<http://www.stenheim.com/alumine-five/>

Deuxième partie

Cahier des charges

3 Description du problème

Ce projet se base en premier lieu sur des systèmes de compensation existants. Le but n'est pas de réinventer un procédé mais d'analyser ce qu'il se fait déjà, observer les avantages et inconvénients de ses produits et proposer des solutions adaptées aux besoins de l'entreprise. Cette thèse n'a pas l'objectif de créer un produit fini mais plutôt l'étude et la mesure de haut-parleurs afin de comprendre leurs fonctionnements et leurs apporter une correction pour les perfectionner.

Plusieurs types de mesures (tension, courant, position de la membrane) permettront d'observer au mieux le transducteur et d'en proposer un modèle le plus précis possible.

Une compensation du haut-parleur est aussi envisageable en fonction du temps qu'il restera au projet.

4 Tâches à effectuer

- Rechercher et comprendre les systèmes tels que Controlled Sound de Klippel.
- Evaluer les avantages et inconvénients de ces différents systèmes.
- Concevoir un banc de mesure sur haut-parleur (mesure de courant, tension, déplacement de la membrane du haut-parleur avec un laser).
- Effectuer une modélisation du haut-parleur sur la base des mesures.
- Comparer les résultats obtenus. Observer s'il y a corrélation entre le modèle basé sur le déplacement de la membrane effectif (mesure au laser) et l'autre calculé à l'aide de la mesure courant/tension.
- Selon le temps, faire une régulation temps-réel simple sur PC (Matlab, Labview,...) pour corriger directement le haut-parleur de basse.

5 Planning

Voici la planification de ce projet.

Semaines (14.05 au 17.08.2018)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Définition du cahier des charges														
Recherches mesure tension/courant, position + carte d'acquisition														
Recherches systèmes de compensation similaires à celui de Klippel														
Recherches modélisation d'un haut-parleur														
Conception mécanique														
Programmation labview														
Calibrages mesure														
Mesures														
Recherches compensations														
Rapport														

TABLE 1: Planning du projet

Troisième partie

Analyse

6 Le haut-parleur

6.1 Éléments d'une chaîne hifi

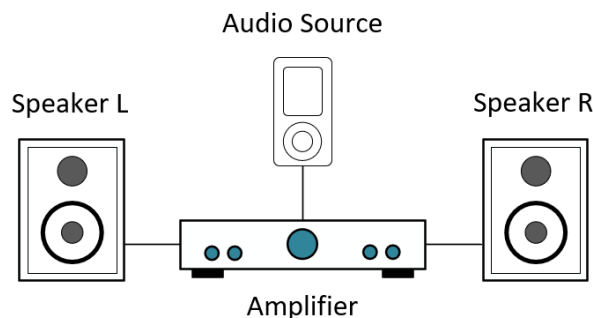


FIGURE 2: Schéma d'une chaîne hifi

Une chaîne hifi classique se compose de différents éléments. Il y a, en premier lieu, une source audio analogique (lecteur vinyle, sortie d'un téléphone, radio fm...) ou numérique (lecteur CD, DAB+, ...). Elle vient ensuite se connecter à un amplificateur audio. Ce dernier permet d'augmenter le gain du signal et de fournir assez de courant pour le bon fonctionnement des haut-parleurs, le 3ème élément de la chaîne. Ceux-ci permettent de transformer le signal électrique en signal acoustique audible pour l'oreille humaine.

6.2 Composition

Il existe plusieurs types de haut-parleur : électrodynamique, électrostatique, piézoélectrique, ... Cette thèse ne s'intéressera qu'à l'électrodynamique. Il s'agit de celui le plus répandu sur le marché. Ce haut-parleur est constitué de plusieurs éléments séparables en deux parties, l'une fixe et l'autre mobile. Dans les parties fixes, il y a un noyau (entrefer) soutenant un aimant permanent et le châssis. La partie mobile, quant à elle, se compose d'une bobine, une suspension centrale (spider), une suspension périphérique et une membrane.

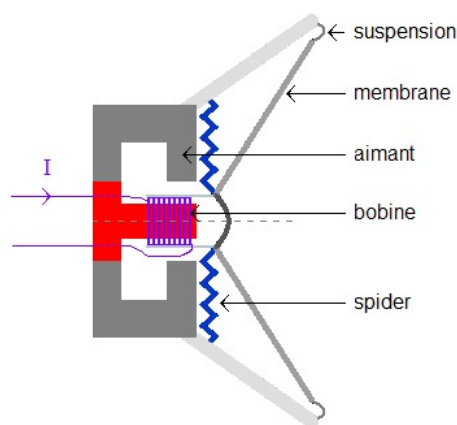


FIGURE 3: Coupe d'un haut-parleur ³

3. Source : https://www.cap-concours.fr/sanitaire-et-social/concours-paramedicaux/reviser/les-forces-electromagnetiques-cc_phy_24

6.3 Fonctionnement

La bobine se trouve baignée dans un champ magnétique créé par l'aimant permanent. Lorsqu'un signal électrique traverse la bobine, une force (selon la formule de Laplace) s'exerce sur elle. Celle-ci se déplace vers l'avant ou l'arrière (en fonction du sens du courant) et entraîne avec elle la membrane ainsi que les suspensions. Ces dernières permettent de ramener au plus vite la membrane à sa position initiale lorsqu'aucun signal ne traverse la bobine. En outre, elles permettent de limiter les hautes fréquences parasites. La membrane, quant à elle, produit un déplacement d'air en bougeant, une pression, ce qui crée une onde sonore audible. Celle-ci doit correspondre le mieux possible au signal électrique qui traverse le haut-parleur au même moment.

Deux conversions d'énergie sont réalisées par le transducteur : électrique vers mécanique et mécanique vers acoustique. Ces transformations entraînent des pertes assez conséquentes qui diminuent le rendement à 5% au maximum pour les meilleurs d'entre eux (1% ou moins en général). Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur par la bobine.

Ces hauts-parleurs sont déjà en partie caractérisés par les fabricants dans leurs données techniques. Les paramètres indiqués sont ceux développés par Mr. Thiele et Mr. Small.

6.4 Paramètres de Thiele & Small

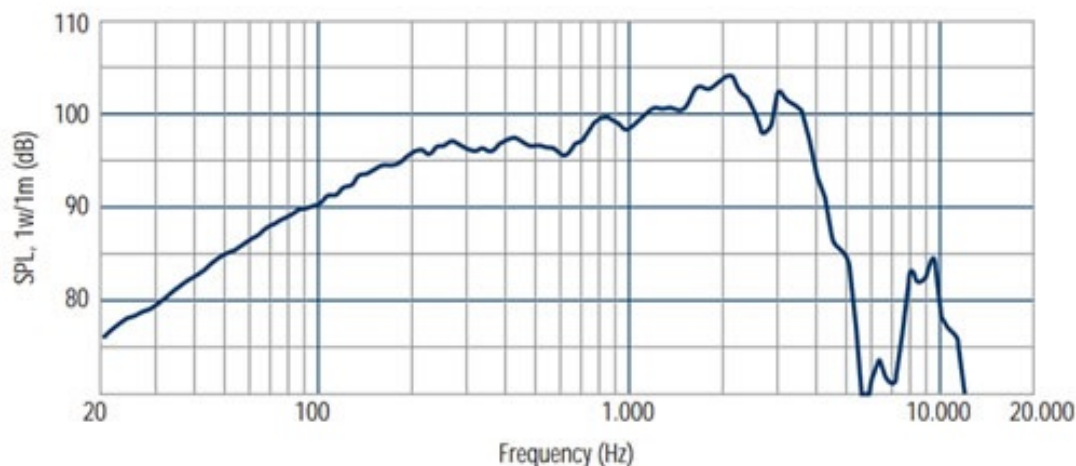
Il existe une grande quantité de transducteurs différents. Les différences les plus visibles sont la géométrie, la taille et le poids qui influencent directement son comportement. Par exemple, plus un haut-parleur possède une grande membrane plus il pourra descendre bas en fréquence et moins haut dans les aigus. Les paramètres de Thiele et Small (du nom de leurs inventeurs) permettent justement de différencier ces haut-parleurs en définissant ces caractéristiques électriques et mécaniques propres par différentes mesures. Ces paramètres sont définis pour la plage petits signaux (faible puissance) du haut-parleur. Voici quelques caractéristiques fondamentales :

Paramètre	Description	unité
R_e	Résistance de la bobine (à courant continu)	Ω
L_e	Inductance de la bobine	H
R_{ms}	Résistance mécanique	$\frac{kg}{s}$
M_{ms}	Masse de la partie mobile	kg
C_{ms}	Flexibilité de la suspension (inverse de la raideur k_{ms})	$\frac{m}{N}$
F_s	Fréquence de résonance	Hz
Bl	Facteur de force de la bobine plongée dans un champ magnétique	Tm
S_d	Surface de la membrane du haut-parleur	m^2
Q_{ms}	Facteur de qualité mécanique	-
Q_{es}	Facteur de qualité électrique	-

TABLE 2: Paramètres principaux de Thiele & Small

Ces paramètres permettent de concevoir un caisson adapté au haut-parleur. De plus, ils permettent directement à un fabricant ou à un initié de simuler le fonctionnement des haut-parleurs avant de les acheter. Lors du remplacement d'un transducteur défectueux dans une enceinte montée, ils facilitent la recherche d'un haut-parleur avec des caractéristiques similaires.

Pour finir, les haut-parleurs peuvent aussi être caractérisés sous forme graphique avec leur réponse en fréquence.

FIGURE 4: Réponse en fréquence du haut-parleur RCF L12P110K⁴

Voici donc les éléments pour comprendre le fonctionnement d'un haut-parleur parfait. Il convient maintenant d'étudier les défauts du transducteur et la distorsion qu'ils engendrent sur le son.

6.5 Types de distorsion

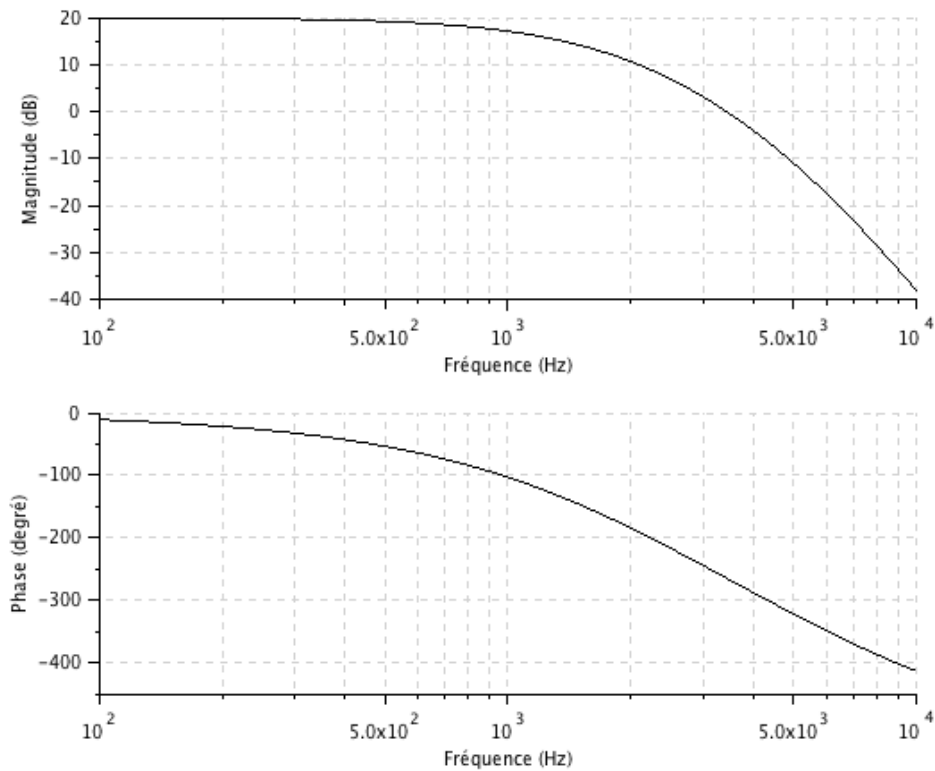
Un haut-parleur est dimensionné pour donner le meilleur dans des plages de fonctionnement spécifiques (température, puissance, fréquence, ...). Chaque haut-parleur est unique même comparé à un modèle provenant d'une série identique. De par sa fabrication et ses composants, les caractéristiques du produit diffèrent légèrement. De plus, un haut-parleur aura tendance à créer plus ou moins de distorsion.

6.5.1 Linéaire

Il existe deux types de distorsion linéaire, la distorsion en amplitude et la distorsion en phase. La première modifie la « dynamique » du signal. Cela correspond à un gain ou une atténuation d'une certaine plage de fréquences. Un exemple simple serait les pertes dans les câbles traversés par un signal audio. Plus le câble est long, plus les hautes fréquences du signal seront atténuées. Dans le cas du haut-parleur, la masse mécanique en mouvement (membrane, bobine, ...) complique la restitution des hautes fréquences de part son inertie.

La distorsion de phase, quant à elle, apporte un retard sur certaines parties du signal. Si l'on prend un diagramme de Bode comme exemple, cela est très vite remarquable. Sur le 2ème graphique de la figure ci-dessous, un déphasage (retard) est apporté par le système. Ce retard est accentué à mesure que la fréquence du signal augmente. Les filtres (condensateurs, bobines) apportent ce genre d'effet qui n'est pas forcément perceptible par l'oreille humaine. Le haut-parleur peut aussi être assimilé à un filtre de part sa bobine et ses composantes mécaniques qui reprennent les caractéristiques des inductances et capacitances.

5. Source : http://ressources.unisciel.fr/TraitementDuSignal/Semaine04/co/module_Semaine04_10.html

FIGURE 5: Diagramme de Bode⁵

6.5.2 Non-linéaire

Contrairement à la distorsion linéaire, la non-linéaire rajoute des fréquences inexistantes au signal initial. Il peut s'agir de fréquences harmoniques (multiple d'une fréquence déjà existante) ou non. Il est parlé alors de distorsion harmonique sous l'appellation THD (total harmonic distortion). Les figures 6 et 7 permettent d'observer ce phénomène sous deux points de vues. A la figure 6 le signal devrait normalement être un sinus pur mais il est "entaché" par des fréquences supérieures. Dans le domaine fréquentiel (7), Les pics représentent la composante fondamentale (ici à 20Hz) et harmoniques à chaque multiple de la fréquence fondamentale.

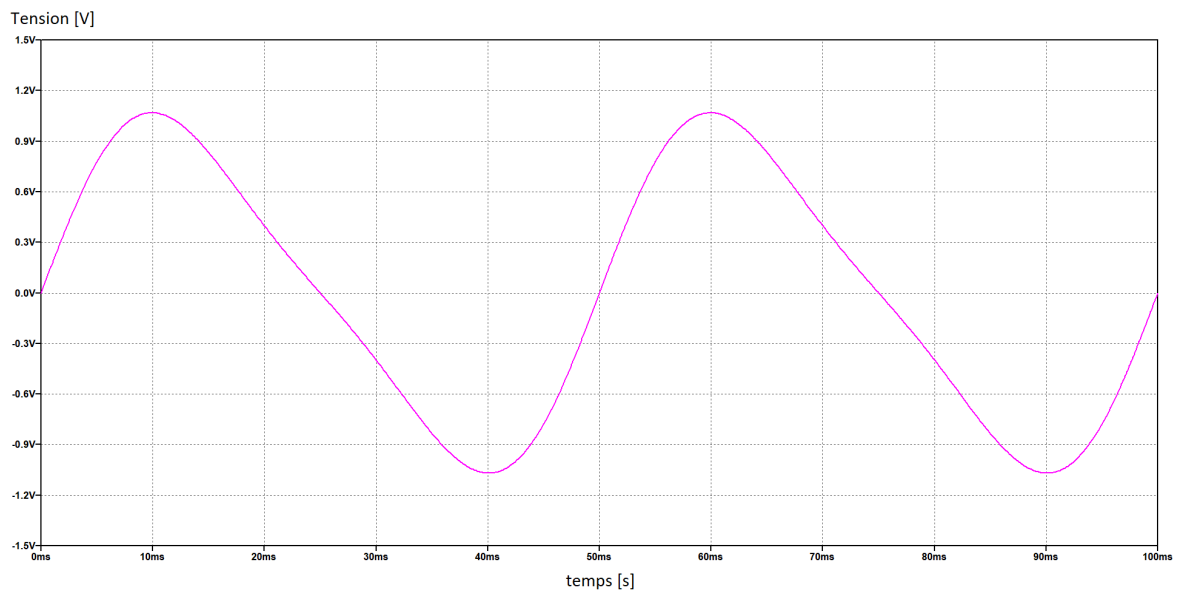


FIGURE 6: Distorsion harmonique : Domaine temporel

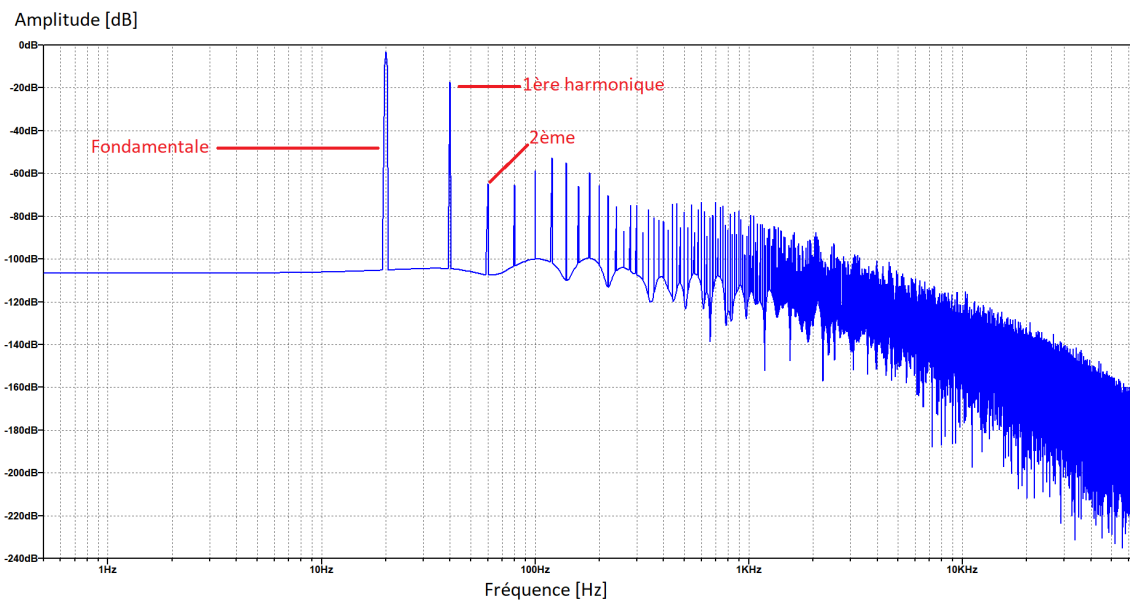


FIGURE 7: Distorsion harmonique : Domaine Fréquentiel

Un autre type est appelé intermodulation. Celle-ci intervient lorsqu'une source est composée de signaux de différentes fréquences. En fonctionnement linéaire, ces signaux devraient simplement être superposés à la sortie du système. En pratique, il peut arriver que de nouvelles fréquences apparaissent avec l'addition ou la soustraction de la fréquence de deux signaux. La représentation temporelle de la figure 6 ressemble à celle de l'intermodulation. Dans le domaine fréquentielle, des différences marquantes sont présentes :

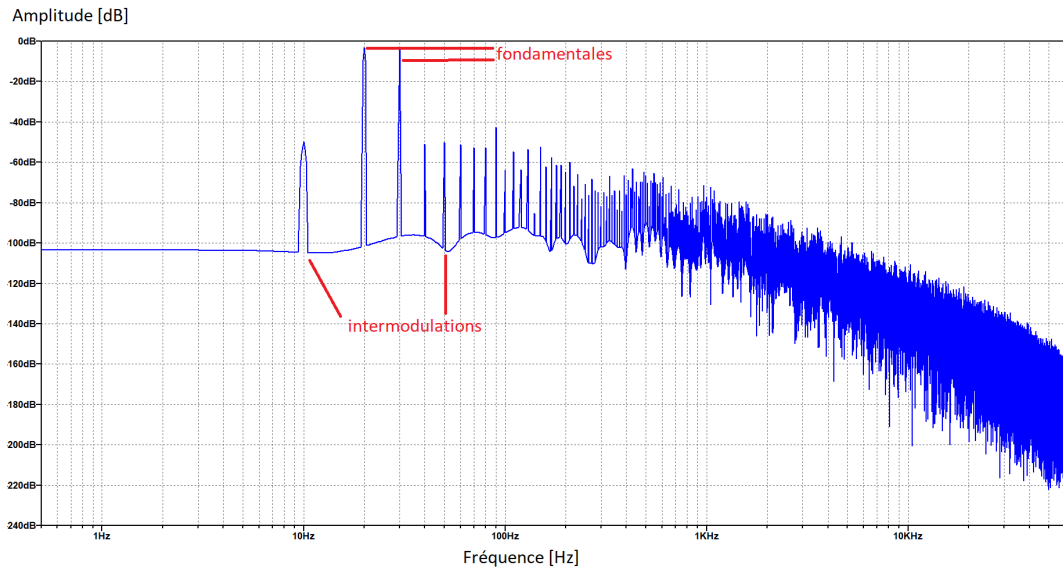


FIGURE 8: Intermodulation : domaine temporel

Les éléments non-linéaires du haut-parleur doivent ensuite être décrits.

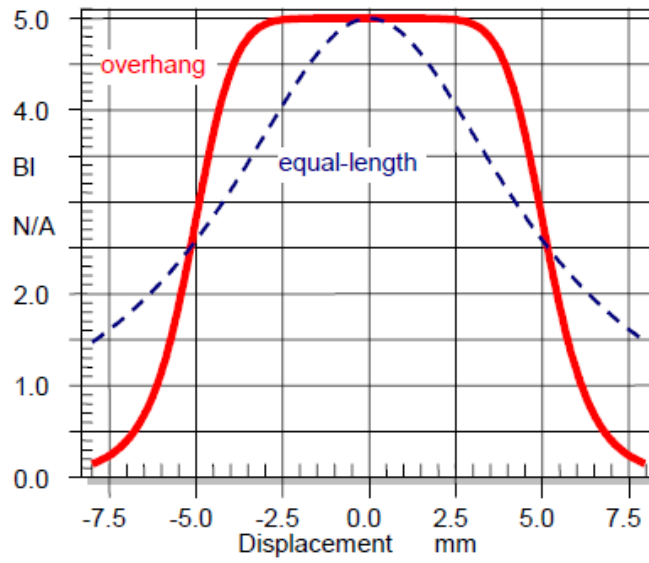
6.6 Éléments non-linéaires

Il convient à présent de citer les principaux éléments apportant de la distorsion ou de la compression dans le son. En effet, en fonction de la fréquence, l'amplitude ou même la température que subit le haut-parleur, ses composants auront des valeurs sensiblement différentes.

6.6.1 Facteur de force - Bl

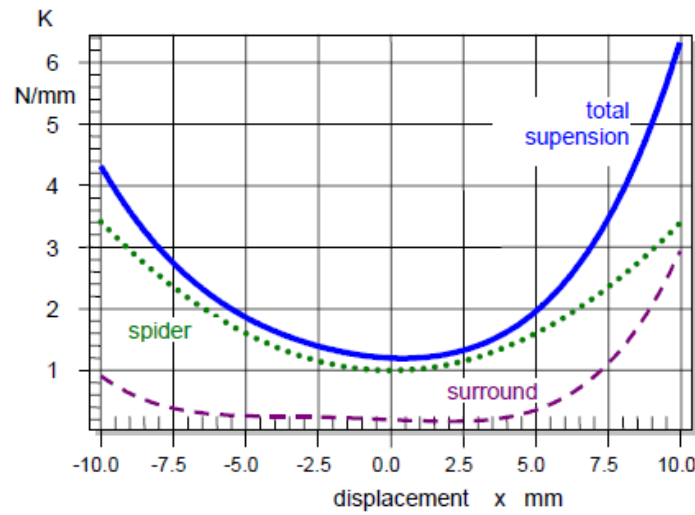
Facteur de force Bl : varie en fonction de la position instantanée de la membrane. En effet, en position de repos, la bobine se situe dans l'entrefer d'un aimant permanent. Lorsque la bobine se déplace, elle ne sera plus exactement au centre du flux émanant du champ magnétique et une partie se retrouvera totalement en dehors. Cela a pour conséquence de limiter la force de Laplace et donc de limiter le déplacement de la membrane à fort niveau. La figure 9 représente cet effet physique en démontrant la non-linéarité de Bl en fonction du déplacement de la membrane.

6. Source : Loudspeaker Nonlinearities – Causes, Parameters, Symptoms, Wolfgang Klippel (https://www.klippel.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Loudspeaker_Nonlinearities%20%93Causes_Parameters_Symptoms_01.pdf)

FIGURE 9: Facteur de force Bl⁶

6.6.2 Raideur de la suspension - k_{ms}

La Raideur ($k_{ms} = \frac{1}{C_{ms}}$) de la suspension impose une force de retour à la position initiale de la membrane. Cette force n'est pas la même en fonction de la position. Plus la membrane effectue un grand déplacement, plus la suspension émettra de résistance. De plus, cette résistance n'est pas nécessairement identique dans les deux sens de déplacement. De par la forme et la matière des suspensions, elles auront plus ou moins de flexibilité dans un sens que dans l'autre.

FIGURE 10: Raideur de la suspension⁶

6.6.3 Autres

L'échauffement a pour effet d'augmenter son impédance, ce qui diminue le courant dans le haut-parleur et donc le déplacement de la membrane.

D'autres facteurs plus compliqués entrent aussi en ligne de compte comme la variation de la géométrie du cône du haut-parleur due à sa vibration mécanique, l'effet Doppler dans la propagation des différentes ondes, la déformation du boîtier, . . . Le domaine est très vaste. Cette thèse ne parlera que des phénomènes ayant le plus fort impact sur le fonctionnement du haut-parleur.

6.6.4 Tableau récapitulatif

Composant non-linéaire	Cause	Effet
<i>Facteur de force Bl</i>	Varie en fonction de la position x de la membrane. Maximal au repos, diminue plus le déplacement est élevé	Limite le déplacement de la membrane à fort niveau sonore
<i>Raideur de la suspension k_{ms}</i>	Varie en fonction de x . Augmente en fonction du déplacement	Limite le déplacement de la membrane à fort niveau sonore
<i>Bobine F_e</i>	Crée une force de force de réluctance ($F_m = L_e \cdot i^2$)	Limite le déplacement de la membrane
	Variation de l'impédance en fonction de la température	Limite le courant et le déplacement de la membrane

TABLE 3: Tableau récapitulatif des éléments non-linéaires d'un haut parleur

Maintenant que les défauts principaux sont développés, l'élément suivant à aborder parle des types de correction possible.

7 Techniques de compensation sur haut-parleur

Le principe de la compensation est assez simple à comprendre. Il est désormais connu qu'un haut-parleur ne respecte pas toujours fidèlement le son qu'on lui demande de transmettre. Il n'est pas possible d'aller directement filtrer sa membrane vibrante. Le seul élément pouvant être adapté est la tension appliquée à l'entrée de l'amplificateur audio. Le principe est donc de créer soi-même une sorte de distorsion "inverse" à celle présente sur le haut-parleur. Le résultat ressemble aux deux figures suivantes :

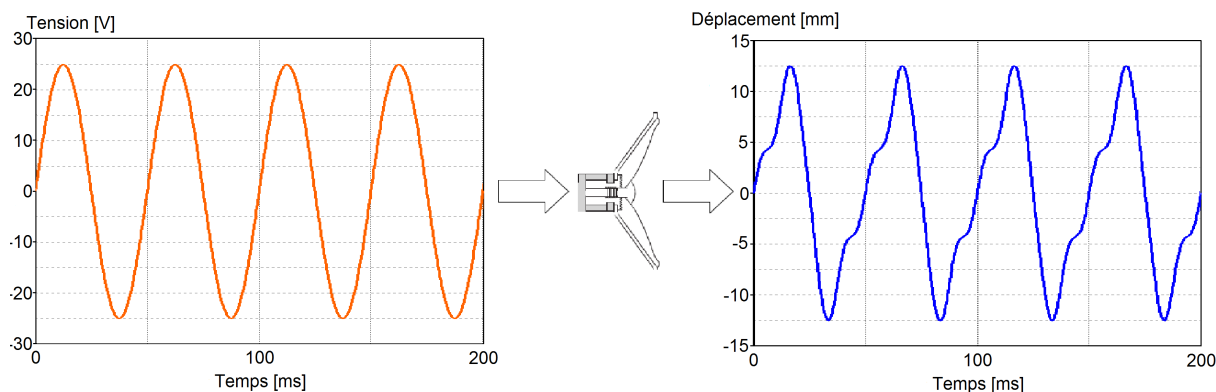
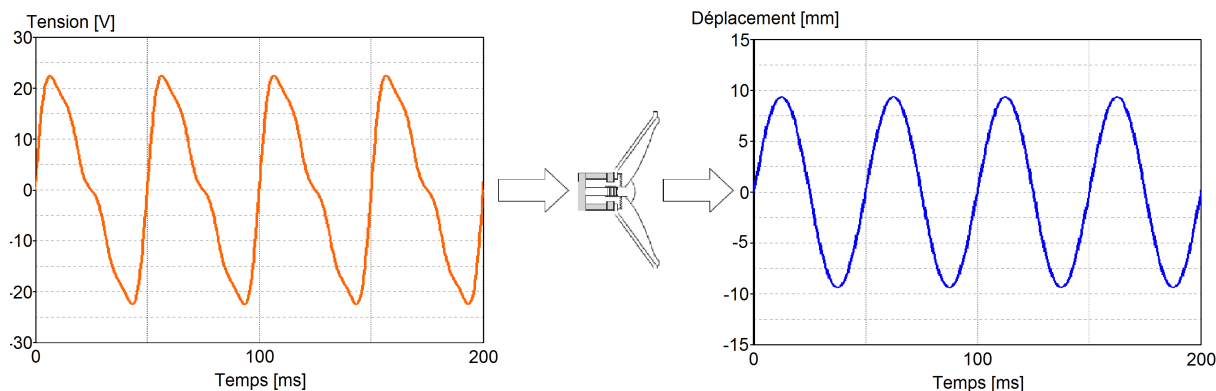


FIGURE 11: Distorsion sans adaptation de la tension d'entrée ⁷

⁷. Source : Rapport de fin d'étude de Tristan Lebrun, Université de la Sorbonne, <https://afalaize.github.io/publis/M2.pdf>, page 7 (Les images ont été modifiées)

FIGURE 12: Contrôle de la distorsion avec adaptation de la tension d'entrée⁷

Avant toute chose, il faut penser que le fait d'augmenter la plage utilisable du haut-parleur oblige de le protéger. En effet, il sera possible de profiter d'un volume plus élevé qu'auparavant sans perdre en qualité. Deux risques importants peuvent surgir :

- Surchauffe de la bobine : Cela peut survenir lorsque le haut-parleur est utilisé pendant une période prolongée à un volume trop élevé. Cela entraîne la destruction de la bobine.
- Rupture mécanique due à un trop grand déplacement de la membrane. Ce phénomène peut intervenir lorsqu'une partie du signal audio demande un déplacement trop important à la membrane pour le restituer (un coup de grosse caisse à volume trop important par exemple). Cela entraîne le déchirement des suspensions.

Voici différentes techniques permettant de limiter la distorsion d'un haut-parleur :

7.1 Basée sur les mesures

Cette compensation est une régulation en boucle fermée. Elle se base sur les mesures effectuées en temps réel sur le haut-parleur (courant, tension, position de la membrane, vitesse, pression,...). Ces valeurs sont ensuite transformées (selon un modèle parfait du haut-parleur établi au préalable) pour être comparé avec le signal d'entrée de l'amplificateur. L'erreur entre les deux signaux correspond à la distorsion présente. L'erreur est "inversée" et réinjectée à l'entrée de l'amplificateur.

La précision de ce modèle dépend de la qualité de la modélisation et surtout de la précision des mesures. Le prix de mise en oeuvre est variable en fonction des capteurs utilisés pour les mesures. Un capteur laser de position avec une précision suffisante coûtera bien plus cher qu'une simple résistance shunt pour la mesure de courant par exemple. Des convertisseurs A/D et D/A doivent aussi être achetés parce que la modélisation est implémentée dans une unité de calcul. Cette dernière doit être la plus rapide possible (DSP, FPGA, microprocesseur). En effet, les valeurs mesurées à transformer selon le modèle prennent un certain temps qui doit être le plus court possible. Cela n'est pas un problème pour gérer des signaux de basses fréquences où le processus sera assez rapide mais au-delà d'une certaine plage, cela devient problématique.

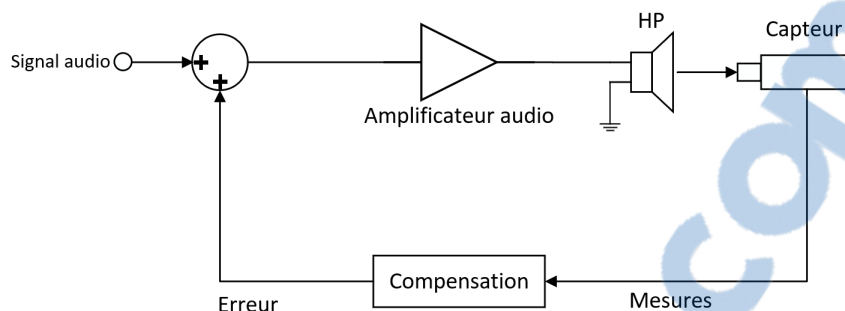


FIGURE 13: Compensation basée sur les mesures

7.2 Basée sur le modèle

Cette compensation ne possède pas de boucle de régulation. Le principe repose sur une modélisation précise et complète du haut-parleur parce qu'aucune mesure n'est effectuée sur ce dernier. Le signal d'entrée est injecté en même temps sur un filtre et sur le modèle qui simule le comportement du haut-parleur. Suite aux distorsions détectées par le modèle, un bloc correcteur va adapter un filtre réglable qui compensera en déformant la tension appliquée au haut-parleur.

Le principal avantage de ce système est son prix. En effet, l'achat de capteurs de mesure n'est pas nécessaire. L'utilisation d'un DSP et de convertisseurs A/D, DA/A reste toutefois nécessaire pour la modélisation.

Le désavantage majeur provient de la modélisation. Mieux elle sera, plus la correction sera importante mais plus elle demandera de ressources au DSP (et donc de temps de calcul) ce qui empêchera une compensation dans les plus hautes fréquences.

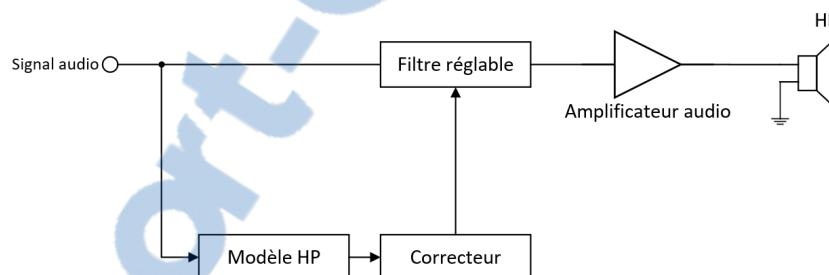


FIGURE 14: Compensation basée sur le modèle

7.3 Mixte

Cette solution est hybride entre les deux précédentes. Elle repose sur une modélisation correcte mais incomplète du haut-parleur et sur les mesures. Le but est de gagner en rapidité grâce à un modèle demandant un minimum de ressources au processeur et d'y apposer une amélioration grâce aux mesures. Cela permettrait de diminuer la puissance de calcul sans perte en efficacité de compensation.

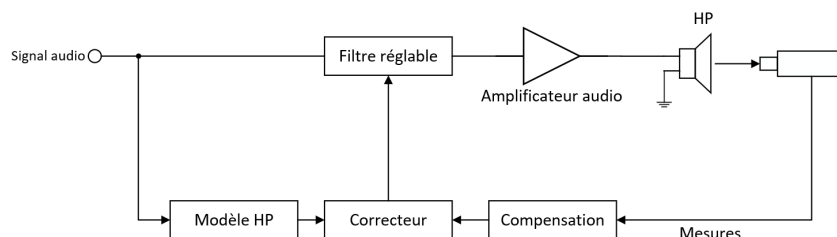


FIGURE 15: Compensation mixte

8 Recherche des paramètres non-linéaires

Comme cité précédemment, certains composants voient leur valeurs modifiées non-linéairement. Il serait intéressant de pouvoir mesurer ces différences et de les insérer dans le modèle. Pour ce faire, il existe plusieurs moyens de mesure.

8.1 Par la mesure

Une première méthode permet la mesure du facteur de couplage Bl et de la raideur de la flexibilité mécanique de la suspension C_{ms} . Le courant et la position sont mesurés en deux étapes.

Première étape

Le haut-parleur (ainsi que son boîtier) est positionné à l'horizontale (transducteur vers le haut). Un courant continu est injecté dans la bobine afin de supprimer les forces liées à l'accélération et à la vitesse de la membrane. En effet, une tension continue impose une position statique à la membrane et non un déplacement (d'une fois que la membrane a atteint la position d'équilibre). Les forces présentes sur la membrane sont les suivantes :

$$\underbrace{Bl(x) \cdot i_1}_{F_{Bl}} = \underbrace{\frac{x}{c_{ms}(x)}}_{F_{susp}} + \underbrace{mg}_{F_g}$$

Ensuite, une masse M connue est positionnée sur le dôme de la membrane et la même expérience est réalisée. La somme des forces devient :

$$\underbrace{Bl(x) \cdot i_2}_{F_{Bl}} = \underbrace{\frac{x}{c_{ms}(x)}}_{F_{susp}} + \underbrace{(m + M)g}_{F_g}$$

Les deux équations mises ensemble, la force de la suspension s'annule et le facteur de couplage est isolé :

$$Bl(x) = \frac{M \cdot g}{i_2 - i_1}$$

La mesure se répète pour différentes valeurs de courant et de déplacement. La caractéristique du couplage en fonction du déplacement est ainsi mesurée.

Deuxième étape

Une fois le facteur de couplage déterminé, l'enceinte est repositionnée à la verticale pour que le poids de la partie mobile du haut-parleur ne rentre plus dans l'équation des forces. Cela donne :

$$\underbrace{Bl(x) \cdot i}_{F_{Bl}} = \underbrace{\frac{x}{C_{ms}(x)}}_{F_{susp}}$$

Et donc :

$$C_{ms}(x) = \frac{x}{Bl(x) \cdot i}$$

Avantages

- Les paramètres principaux de distorsions sont mesurés
- De ces paramètres peuvent être déduits les autres

Inconvénients

- Appliquer un courant continu sur une bobine n'est pas conseillé (similaire à faire un court-circuit), cela entraîne un échauffement trop important quasiment instantanément avec de grandes chances d'endommager le composant.
- L'échauffement de la bobine entraîne une augmentation de sa résistance, ce qui induit une diminution du courant et du déplacement de la membrane (distorsion linéaire). La mesure est donc faussée avec l'augmentation de la température.

Cette solution n'est pas conservée parce que le risque de dégradation du haut-parleur est trop important.

Deux articles transmis par mr. Gilbert Maître conforte dans l'idée de ne pas appliquer un courant continu sur une bobine. Ils traitent d'un modèle non-linéaire d'une bobine dans un champ ferromagnétique. Leurs conclusions sont unanimes par rapport à la possibilité non-négligeable de destruction de la bobine. De plus les modèles proposés ne semblent pas être assez précis pour une prédire le comportement réel de la bobine.^{8 9}

8.2 Table de compensation

Lorsque la problématique de la distorsion est observée dans le domaine temporel, les non-linéarités sont clairement visibles. La figure 16 le prouve.

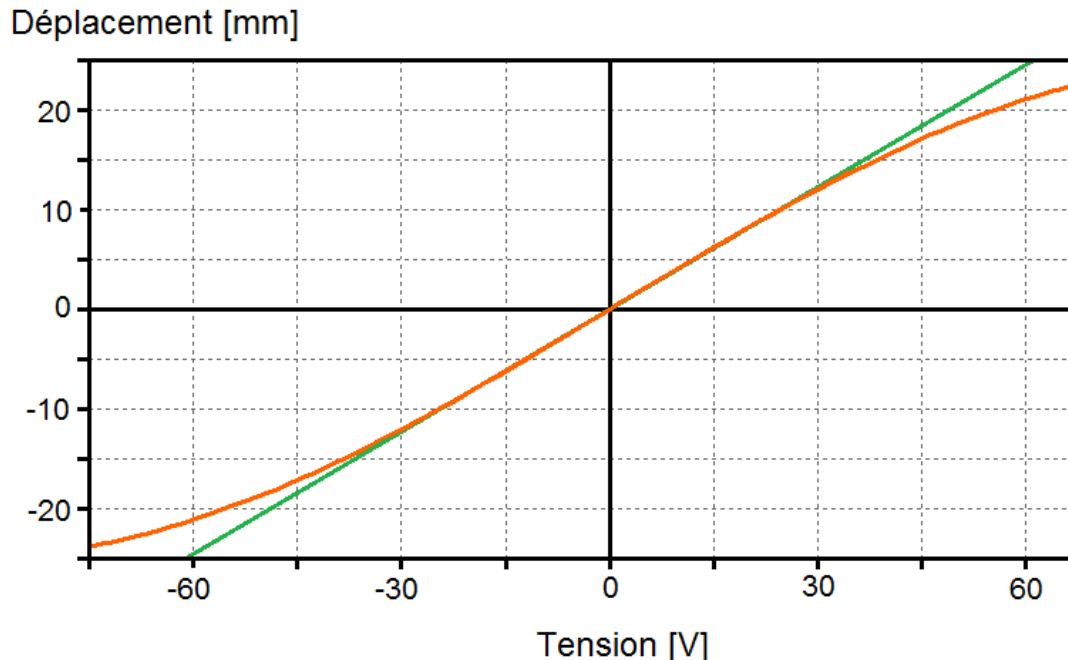


FIGURE 16: Déplacement en fonction de la tension

8. Chua's model of nonlinear coil in a ferroresonant circuit : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-016-2871-5>

9. Modeling of nonlinear coil in a ferroresonant circuit, annexe C.2

La courbe orange représente celle d'un haut-parleur alors que la verte représente le modèle idéal. Ce graphe correspond à une mesure faite à une fréquence fixe.

L'idée serait donc comparer les mesures de distorsion à différentes fréquences et amplitudes pour en sortir un rapport entre la valeur mesurée (courbe orange de la figure 16) et la valeur souhaitée (droite verte). Cela permettrait de connaître, en chaque point de la courbe, la tension instantanée à appliquer. Ces rapports seraient placés dans une table.

Avantages

- Suivant la précision de la table de correspondance, le modèle trouvé peut être très précis.
- Il n'y a pas besoin de notions quant aux éléments physiques agissant sur le haut-parleur.

Inconvénients

- Compliqué de trouver une relation entre les courbes pour différentes fréquences sachant qu'elles varient en fonction de beaucoup de paramètres et de façon non-linéaires.

Cette solution n'est pas non plus conservée de part sa complexité de mise en oeuvre. Il n'y a pas de liens logiques entre les courbes à différentes fréquences et les connaissances nécessaires pour calculer des systèmes non-linéaires sont au-dessus de celles obtenues durant ces trois ans de Bachelor.

8.3 Linéarisation

Cette idée reprend la précédente (cf. ??). Afin de simplifier le calcul d'une table de compensation, les courbes mesurées seront linéarisées en droites de différentes pentes.

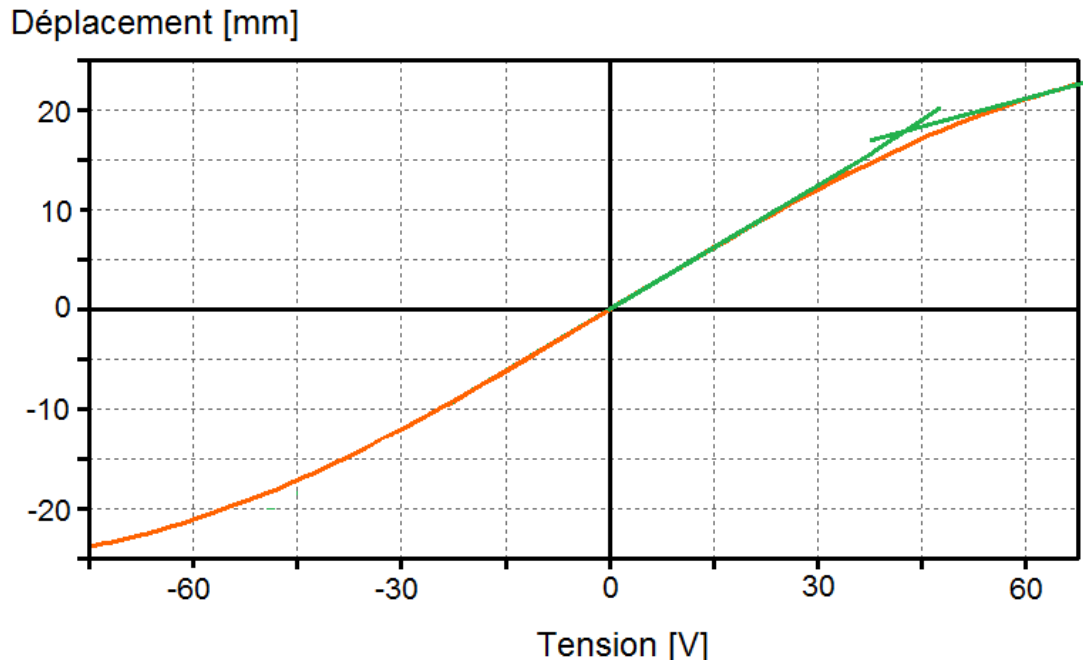


FIGURE 17: Linéarisation de la distorsion

Comme visible sur la figure 17, les deux segments verts représentent la courbe orange linéarisée avec deux pentes différentes. Plus il y a de segments, plus la linéarisation sera précise mais plus le calcul sera compliqué.

Cette solution n'a pas eu le temps d'être testée mais le sera après le rendu de ce rapport.

8.4 Suppression des harmoniques

Le principe de cette régulation repose sur une analyse fréquentielle du déplacement de la membrane. Le haut-parleur a tendance à créer de la distorsion harmonique à fort niveau sonore. L'idée serait de mesurer les premières harmoniques du signal. Ensuite, il faudrait trouver la fonction de transfert inverse à ce signal uniquement composé d'harmoniques avant de le réinjecter sur l'entrée de l'amplificateur audio.

Cette méthode n'est pas conservée parce qu'elle est autant complexe que celle dans la section ?? (Table de compensation). Il n'y a pas non-plus de lien linéaire entre les différentes fréquences à analyser et l'amplitude.

Maintenant que les différents types de compensations sont analysés, il convient de s'intéresser aux besoins de Stenheim.

9 Besoins de l'entreprise

Stenheim souhaite travailler sur plusieurs points avec leurs haut-parleurs. L'objectif final vise à obtenir une réponse en fréquence de l'enceinte la plus plate possible. C'est à dire que le haut-parleur produirait le même volume sonore pour toute sa gamme de fréquences. Les figures 18 et 19 permettent de comparer une mauvaise et une bonne réponse en fréquences. L'intérêt qu'elle soit la plus plate possible est que l'enceinte va produire un son "neutre" et plus ressemblant au son qui lui est demandé de jouer.

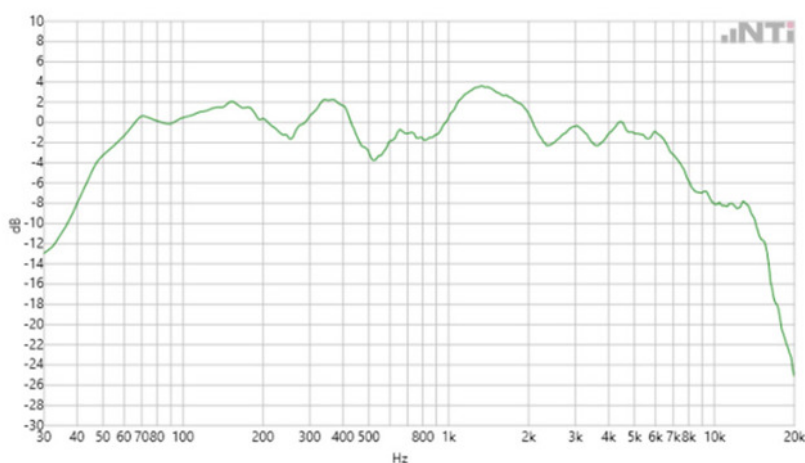


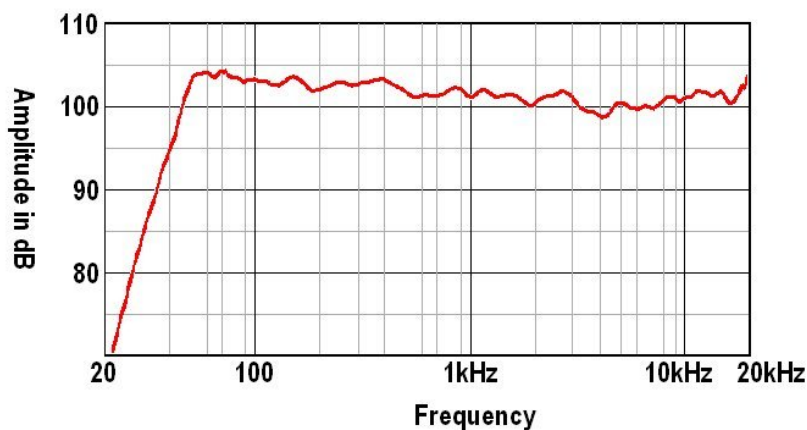
FIGURE 18: Courbe de réponse en fréquence pas plate¹⁰

Un autre point consiste en l'augmentation de la bande passante du haut-parleur, résultat qui découlerait de la compensation de la distorsion.

De plus, n'utiliser aucun équipement de mesure ou un minimum dans l'enceinte serait un plus pour des raisons de prix. Il faudrait déterminer s'il est possible d'établir un modèle offrant une précision suffisante pour se passer de mesures comme la compensation basée sur le modèle vu précédemment.

10. Source : <https://all-about.website/2018/02/15/un-autre-test-detecte-homepod-reponse-en-frequence-plate-mais-les-resultats-potentiellement-vide-de-sens/>

11. Source : <https://fr.audiofanzine.com/mastering/editorial/dossiers/enceintes-et-mastering.html>

FIGURE 19: Courbe de réponse en fréquence plate¹¹

Par la suite, Stenheim voudrait réduire la taille de leurs enceintes et le tout en augmentant le rendement et la qualité dans les limites du possible. Le fait de diminuer la taille des boîtiers complique le déplacement de la membrane du haut-parleur. La pression exercée par un plus petit volume d'air sur la face arrière du boîtier impose des contraintes supplémentaires au haut-parleur dont la membrane se déplacera avec plus de difficultés et sur de plus petites amplitudes. La compensation permettrait de palier à ces pertes de rendement.

Il convient maintenant d'observer ce qui existe déjà sur le marché.

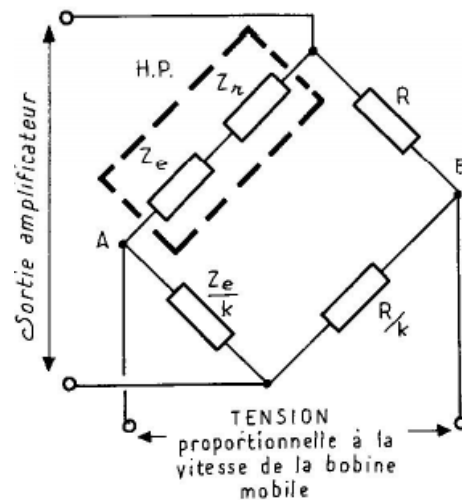
10 Systèmes de compensation existants

Cette section commence par la présentation de deux systèmes faisant partie de l'histoire de la compensation mais ils permettent de se rendre compte que cette problématique ne date pas d'hier et que les solutions sont difficiles à mettre en place. Les autres systèmes sont par contre basés sur des technologies actuelles.

10.1 Voigt

Voigt est le nom d'un inventeur qui proposa en 1924 un schéma théorique permettant d'obtenir la vitesse instantanée de la membrane d'un haut-parleur par une tension proportionnelle. La mesure se base sur un pont de résistances proportionnelles dans lequel fait partie la bobine du haut-parleur. Le système possède un rendement médiocre parce que le haut-parleur voit sa puissance partagée entre plusieurs résistances qui ne font que dissiper de la chaleur.

12. Source : http://cyrille.pinton.free.fr/electroac/lectures_utiles/asservissement/general/LafaurieOnSubServo.pdf, page 44

FIGURE 20: Pont de Voigt¹²

10.2 3A - Andante

3A pour Art et Acoustique Appliquée est une entreprise française basée à Antibes sur la côte d'Azur. Elle n'existe plus actuellement mais était fortement active dans les années 70 - 80. Un modèle de leur marque est intéressant pour cette étude, l'Andante.

Andante

Cette enceinte bénéficie d'un asservissement en pression. Un système de mesure du mouvement de la membrane basé sur un pont de Voigt amélioré est utilisé. Une régulation contrôlée électroniquement (en analogique) sur la base des mesures permet de "gommer" les imperfections du haut-parleur et de réduire le volume du caisson pour un même résultat sonore.

FIGURE 21: Enceinte Andante¹³

13. Source : <http://3a-art-et-acoustique-appliquee.fr/catalogue.php?nom=Art%20et%20Acoustique%20Appliquee&serie=Andante&type=Lineaire>

10.3 Klippel - Controlled Sound

Klippel est une entreprise allemande spécialisée dans le test d'équipements audio, de haut-parleurs, écouteurs et casques. L'entreprise a été fondée en 1997 par le professeur Wolfgang Klippel à Dresde. Elle possède de solides connaissances d'électronique, mécanique, physique et acoustique en lien avec le haut-parleur grâce à leurs 20 ans d'expérience. Plusieurs publications concernant la problématique de l'audio et des haut-parleurs sont disponibles sur leur site internet.¹⁴

En plus de tester des appareils, elle propose des solutions pour améliorer la qualité d'un système audio déjà monté. Il est aussi possible d'acquérir un système de mesure complet pour effectuer soi-même ses propres tests. En effet, Klippel possède un analyseur pour haut-parleur constitué de composants physiques (amplificateur de mesure, microphones, laser,...) et d'un logiciel de traitement pour l'analyse. De plus, cette firme propose un système de traitement de signaux (appelé Controlled Sound) qui permet de compenser la distorsion et la non-linéarité créée par le haut-parleur afin d'en améliorer la qualité en temps réel.

Controlled Sound

Ce système professionnel est composé d'un logiciel et d'une partie matérielle. Controlled Sound est capable de modéliser un haut-parleur en fonction de certains paramètres de base déjà implémentés par Klippel et deux mesures en temps réel (courant/tension). Seulement grâce à ces seules informations, le contrôleur est capable d'analyser tous les types de distorsion présents sur le haut-parleur et de les corriger grâce à une boucle de régulation. Une protection contre la surcharge (mécanique et thermique) du haut-parleur est aussi offerte. Le système est disponible pour les haut-parleurs de basse fréquence. Il s'agit aussi du système le plus complet trouvé sur le marché.

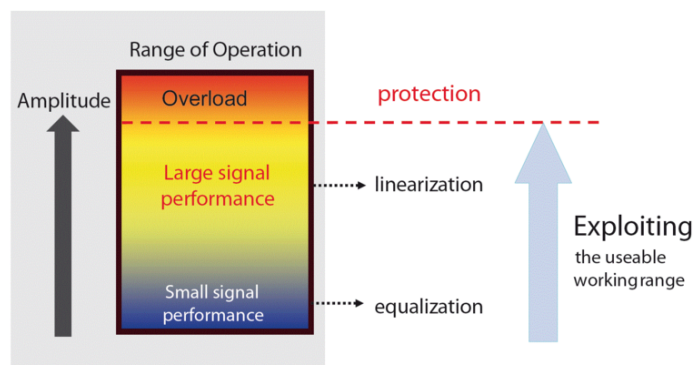


FIGURE 22: Système Controlled Sound¹⁵

La figure 22 explique le fonctionnement du système. Sur de petits signaux d'entrée, un filtrage permet de régler la gamme de fréquence plus atténuée que les autres par le transducteur. Le filtrage à plus fort niveau supprime la distorsion jusqu'à une protection contre la surcharge.

14. <https://www.klippel.de/products/controlled-sound.html>

15. Source : <https://www.klippel.de/products/controlled-sound.html>

Avantages

- Solution clé en main
- Protection contre la surchauffe et le déplacement excessif de la membrane du haut-parleur
- Égalisation sur les petits signaux d'entrée

Inconvénients

- Prix trop élevé pour tester (évalué à 10'000 CHF selon Jean-Pascal Panchard, responsable de Stenheim)
- La documentation autour du système est fournie mais il n'est pas dit comment fonctionne exactement le système (propriété intellectuelle) ni ses résultats réels.
- Le produit n'est pas adaptable en fonction des besoins.

10.4 Devialet - Sam

Devialet est une entreprise française basée à Paris. Elle est spécialisée dans la création et l'amélioration de produits dans le domaine du son. Devialet a conçu un nombre conséquent d'inventions qui lui valu de recevoir des prix. Parmi ces inventions, il y a : ADH (Analog Digital Hybrid) qui combine les avantages d'une amplification analogique et numérique ou encore HBI (Heart Bass Implosion) qui permet d'obtenir des basses profondes dans un petit volume d'enceinte,... L'invention intéressante à développer ici s'appelle SAM.

Le système SAM, acronyme de Speaker Active Matching, propose une compensation avec correction en temps réel. Le haut-parleur du client (avec quelques 800 modèles compatibles) est tout d'abord analysé et mesuré au sein de l'entreprise. Ensuite, ses paramètres sont insérés dans une modélisation que Devialet a conçue. Le système offre ensuite une compensation de la distorsion à basses fréquences avec une remise en phase des enceintes possédant plusieurs voies (haut-parleurs de différentes gammes de fréquences). Une protection contre les surcharges est aussi proposée avec une augmentation de la bande passante dans les graves.

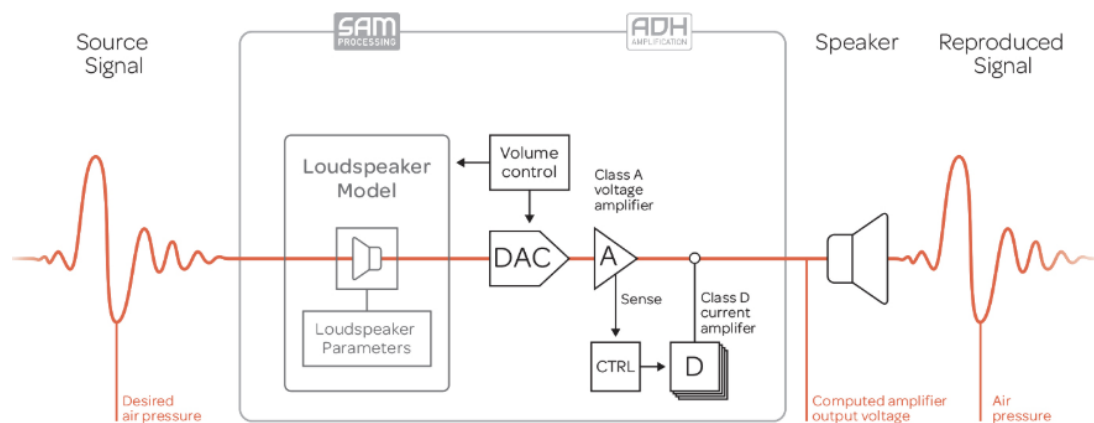


FIGURE 23: Schéma bloc du système SAM ¹⁶

16. Source : <https://www.devialet.com/fr-ch/expert-pro-sam/>

Avantages

- Solution clé en main
- Protection contre la surchauffe et le déplacement excessif de la membrane du haut-parleur
- Rephasage des différents haut-parleur

Inconvénients

- Aucune information n'est délivrée quant à la modélisation et au pourcentage de distorsion réellement compensé
- Le produit n'est pas adaptable en fonction des besoins et ne répond pas forcément aux besoins de Stenheim.

10.5 Autres

Il n'existe en fait pas beaucoup de systèmes qui permettent l'analyse et la correction en temps réel d'un haut-parleur. Les logiciels qui s'y rapportent le plus permettent de faire des mesures sur le haut-parleur, amplificateurs, filtres et souvent des mesures de la pièce où se trouvent les enceintes. Ils proposent ensuite automatiquement un filtre pour compenser les harmoniques et obtenir des courbes de réponse en fréquence plus lisses. Pour citer quelques exemples, il y a le logiciel AUDIOLENSE conçu par l'entreprise JUICE (création automatique de filtres de correction après mesure) ou encore le logiciel open source rePhase (correction du déplacement de phase des différents composants du système audio).

Un travail effectué par un étudiant français apporte à son tour quelque éléments nouveaux à cette thèse.

Rapport de projet de fin d'étude de Tristan Lebrun

Il s'agit d'un travail effectué dans l'unité mixte de recherche STMS (Sciences et technologies de la musique et du son) de l'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) à Paris dans les filière « Génie Mécanique / Acoustique et Vibrations Industrielles ». Le thème est : « Correction temps-réel d'un haut-parleur électrodynamique ». Une modélisation du haut-parleur a été effectuée, un banc de mesure pour estimer les paramètres du modèle et une correction de la distorsion. Trois mesures sont faites simultanément : tension, courant et déplacement de la membrane du haut-parleur. Le courant est mesuré avec un capteur à effet Hall. Le capteur de position est composé d'une photodiode et d'un phototransistor (et un élément réfléchissant placé sur la membrane du haut-parleur). La tension est directement reliée à un convertisseur A/D d'une carte électronique (dSpace DS2004 qui possède un DSP).

Avantages

- Le rapport est bien détaillé

Inconvénients

- Utilisation de notions mathématiques et physiques qui n'ont pas été étudiées ici à l'école (équations de Hamilton, simulation à passivité).
- Utilisation d'une photodiode et non un laser pour la mesure de la membrane, ce qui oblige de placer une bande réfléchissante sur le haut-parleur.

Voici donc les systèmes existants. Le problème majeur de ces systèmes vient du fait qu'ils ne dévoilent pas leur fonctionnement. D'autres fabricants de matériels audio possèdent aussi des systèmes de compensation mais n'en font même pas forcément mention. Ces améliorations techniques ont tendances à rester dans l'ombre.

A présent, il convient d'analyser la modélisation de haut-parleur avant de continuer dans une compensation de distorsion plus complète et surtout plus complexe.

11 Modélisation de haut-parleur

Le but de la modélisation est de représenter sous forme de schéma électronique tous les paramètres qui influencent le fonctionnement du haut-parleur. La modélisation possède trois parties distinctes : la partie électrique, mécanique et acoustique, chacune s'influencant mutuellement. Il n'existe pas de modélisation parfaite d'un haut-parleur, il s'agit d'approximation. Divers modèles existent. Deux représentations différentes seront présentées ici.

Ce travail s'arrêtera à la modélisation de la partie électrique et mécanique par manque de temps et de connaissances dans l'acoustique. De plus, cette modélisation est basée sur les paramètres de Thiele et de Small. Elle n'est donc valable que dans la partie linéaire du haut-parleur.

11.1 Partie électrique

Cette partie représente simplement la bobine du haut-parleur avec la résistance (mesurée en courant continu) qui la caractérise.

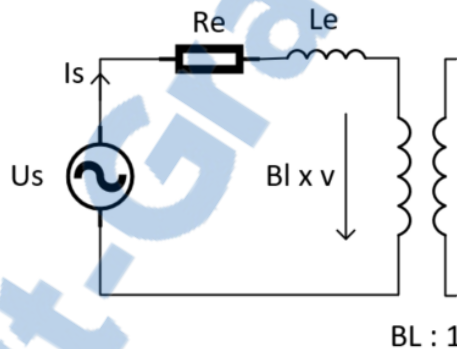


FIGURE 24: Partie électrique

Le couplage entre les parties électrique et mécanique est représenté ici par un transformateur de rapport Bl . Ce dernier provient du champ magnétique B dans lequel est baigné la bobine multiplié par la longueur de la bobine. La tension présente aux bornes de ce transformateur correspond au rapport Bl multiplié la vitesse de déplacement de la membrane.

Selon la loi des mailles de Kirchhoff, la formule suivante est obtenue :

$$U_s(t) = R_e \cdot i_s(t) + L_e \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_s(t) + Bl \cdot v(t)$$

11.2 Partie mécanique

Il convient tout d'abord de se représenter les forces en action sur le haut-parleur.

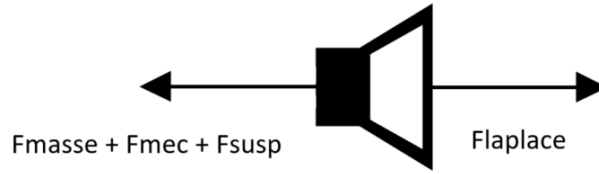


FIGURE 25: Forces s'exerçant sur le haut-parleur

$$F_{masse}(t) = M_{ms} \cdot a(t)$$

$$F_{mec}(t) = R_{ms} \cdot v(t)$$

$$F_{susp}(t) = K_{ms} \cdot x(t)$$

Une seule force engendre le déplacement de la membrane (sans parler de la pression de l'air sur la face arrière de la membrane), il s'agit de la force de Laplace créée par le courant traversant la bobine du haut-parleur baignée dans un champ magnétique ($Bl \cdot i$). D'autres forces présentes viennent à l'encontre de ce déplacement : la raideur de la suspension, l'inertie de la partie mobile du haut-parleur et la résistance mécanique de l'ensemble.

Ces forces sont identiques à celles présentes dans un système masse-ressort-amortisseur.

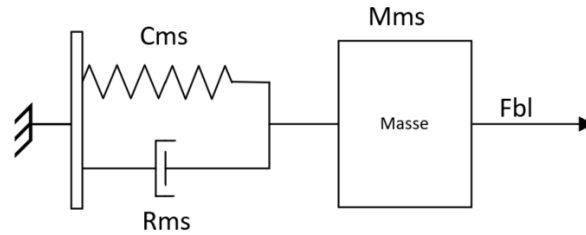


FIGURE 26: système masse-ressort-amortisseur

C_{ms} : flexibilité mécanique (inverse de k_{ms} , la raideur du ressort)

R_{ms} : résistance mécanique

M_{ms} : masse en mouvement

Il ne reste plus qu'à convertir cela en un schéma électronique.

Le courant est ici représenté par la vitesse de déplacement de la membrane. Tous les éléments sont placés en série parce qu'ils subissent la même vitesse. La masse mobile M_{ms} est caractérisée par une bobine, tandis que la rigidité de la suspension (C_{ms}) est représentée par un condensateur. La résistance R_{ms} correspond à la résistance mécanique du haut-parleur. Selon les lois de Kirchhoff, il est obtenu :

$$Bl \cdot i_s(t) = \frac{x(t)}{C_{ms}} + M_{ms} \cdot a(t) + R_{ms} \cdot v(t)$$

Les deux parties de la modélisation ont été abordés. Passons maintenant à la vue d'ensemble de la modélisation.

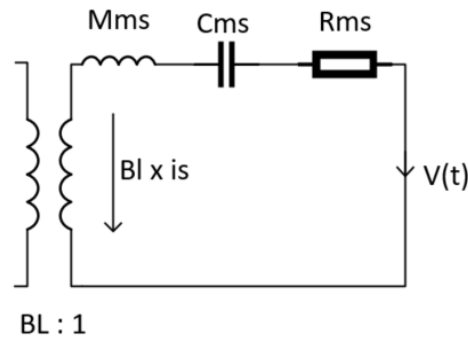


FIGURE 27: Représentation électrique de la partie mécanique

11.3 Schéma Complet

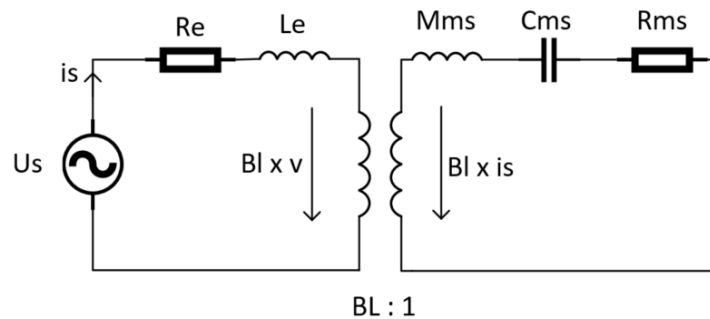


FIGURE 28: Schéma électronique complet

En reprenant les formules précédentes, on obtient 2 équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} U_s(t) = R_e \cdot i_s(t) + L_e \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_s(t) + Bl \cdot v(t) \\ Bl \cdot i_s(t) = \frac{x(t)}{C_{ms}} + M_{ms} \cdot a(t) + R_{ms} \cdot v(t) \end{cases}$$

Ou :

$$\begin{cases} U_s = R_e \cdot i_s + L_e \cdot \dot{i}_s + Bl \cdot \dot{x} \\ Bl \cdot i_s = \frac{x}{C_{ms}} + M_{ms} \cdot \ddot{x} + R_{ms} \cdot \dot{x} \end{cases}$$

Ces équations sont ensuite transposées dans le domaine fréquentiel grâce à la transformée de Laplace ($S = j\omega$). Les conditions initiales sont négligées :

$$\begin{cases} U_s(s) = R_e \cdot i_s(s) + sL_e \cdot i_s(s) + sBl \cdot x(s) \\ Bl \cdot i_s(s) = \frac{x(s)}{C_{ms}} + s^2 M_{ms} \cdot x(s) + sR_{ms} \cdot x(s) \end{cases}$$

La fonction de transfert du déplacement de la membrane en fonction de la tension d'entrée est obtenue en combinant les deux équations :

$$F(s) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{Bl}{s^3 MmsLe + s^2(R_e Mms + R_ms L_e) + s(R_e R_ms + \frac{L_e}{C_ms} + Bl^2) + \frac{R_e}{C_ms}}$$

Le boîtier a une influence non négligeable sur le fonctionnement du haut-parleur, c'est pourquoi il convient de l'intégrer à la modélisation. Le volume de l'enceinte joue un rôle dans la flexibilité mécanique (C_{ms}) vue par le haut-parleur.

$$C_{mb} = \frac{v(t)}{\rho \cdot c^2 \cdot S_d^2}$$

$V \rightarrow$ volume intérieur du boîtier : 50.62 [l] = 0.05 [m³]

$\rho \rightarrow$ masse volumique de l'air à 25°C : 1.18 [$\frac{kg}{m^3}$]

$c \rightarrow$ vitesse de la lumière : 344 [$\frac{m}{s}$]

$S_d \rightarrow$ surface effective de la membrane [m²]

Le volume correspond ici au volume total intérieur sans le haut-parleur encastré. Pour une mesure plus précise, il faudrait déterminer le volume d'encombrement du transducteur afin de le soustraire au volume total. La résistance mécanique du boîtier peut être assimilée comme une bobine placée en parallèle avec la résistance mécanique du haut-parleur.

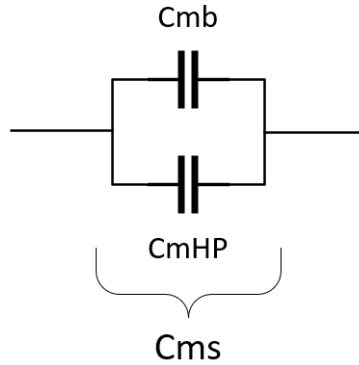


FIGURE 29: Flexibilité de la membrane et flexibilité du boîtier en parallèle

La dernière étape consiste à discrétiser le système en fonction de la fréquence d'échantillonnage du système. Cela permettra par la suite d'utiliser un DSP ou une FPGA avec cette fonction de transfert numérique. La fréquence d'échantillonnage des fichiers musicaux utilisés est de 44100 [Hz], ce qui équivaut à 1 échantillon chaque 22.68 [us]. La transformation bilinéaire est utilisée ($z = e^{st}$) pour la discrétisation. La transformation est effectuée sur Matlab et pourtant le résultat n'est pas correct. La fonction de transfert trouvée est :

$$F(Z) = \frac{4.309^{-10} z^3 + 1.293^{-9} z^2 + 1.293^{-9} z + 4.309^{-10}}{z^3 - 2.749 z^2 + 2.5 z - 0.751}$$

La fonction est stable parce que les zéros du dénominateur sont dans le cercle unité. A la mesure par contre, la fonction ne trouve pas le même résultat que celle de Laplace. Après discussion avec Mr. Gilbert Maître, il se pourrait que le problème vienne de l'approximation des valeurs pendant la transformation

bilinéaire. Matlab calcule avec un nombre fini de chiffres après la virgule, la transformation étant itérative, les erreurs s'additionnent jusqu'à donner un résultat qui n'est plus cohérent. Une solution serait de rapprocher la fréquence d'échantillonnage des signaux à mesurer. La transformation bilinéaire aura alors une fonction de transfert avec des coefficients plus grand calculable sans arrondis par Matlab. La fonction de transfert en Laplace est utilisée pour valider le modèle.

Il est important de rappeler que le modèle proposé ci-dessus est seulement valable dans la zone linéaire du haut-parleur. Il conviendra de l'adapter pour le reste des opérations. Voici encore deux modélisations existantes qui pourraient être utilisées.

11.4 Modélisation de ScanSpeak

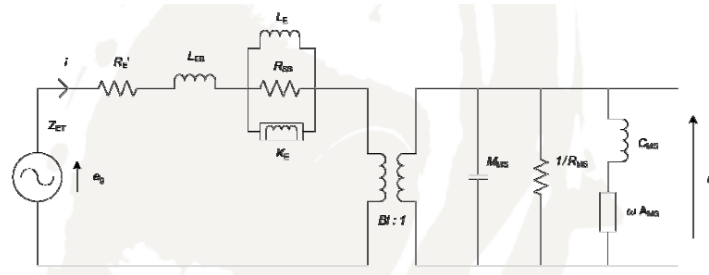


FIGURE 30: Modélisation du ScanSpeak 32W4878T00 ¹⁷

Cette modélisation est différente de celle proposée précédemment. Elle est utilisée spécifiquement par le fabricant de haut-parleur ScanSpeak. Dans la partie électrique, trois composants en parallèle sont placés : L_e pour l'inductance à l'intérieur de l'entrefer, R_{ss} pour une résistance shunt et k_e pour une semi-inductance. Ces trois éléments sont utilisés pour représenter au mieux la bobine du haut-parleur. Il y a par exemple une distinction entre la partie de la bobine qui se trouve en dehors de l'entrefer (L_{eb}), ne disposant que d'un faible taux de champ magnétique et celle à l'intérieur de l'entrefer (L_e). La semi-inductance représente différents effets présents dans les matériaux soumis à un courant (courants de Foucault et effet pelliculaire).

La partie mécanique se démarque aussi parce les éléments sont placés en parallèle, la vitesse de la membrane étant considérée comme une tension. Sinon, les mêmes composants sont présents excepté une résistance ($A_{ms} \cdot w$) représentant l'admittance (l'inverse d'une résistance) au déplacement de la membrane en fonction de la fréquence du signal.

Ce modèle n'est pas utilisé parce qu'il est difficilement implémentable avec l'impédance de la semi-inductance qui vaut $k_e \cdot \sqrt{j\omega}$.

11.5 Modélisation de Klippel

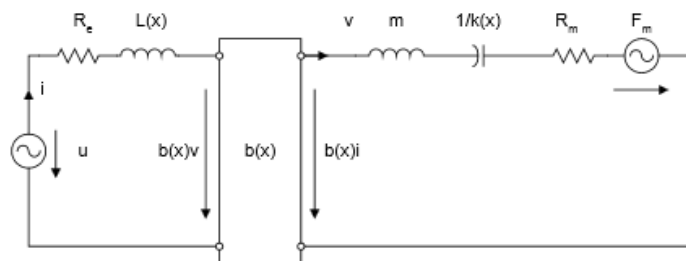


FIGURE 31: Modélisation de Klippel

17. Fiche technique du ScanSpeak 32W4878T00 : <http://www.scan-speak.dk/datasheet/pdf/32w-4878t00.pdf>

Ce montage ressemble particulièrement à celui utilisé dans ce projet mis à part la source de tension F_m . Il s'agit de la force de reluctance (résistance) électromagnétique qui permet d'affiner la modélisation. Il a l'avantage de prendre en compte les non-linéarités survenant lors du déplacement de la membrane représenté par un "x".

Après la modélisation sous sa forme théorique, il faut développer à présent l'implémentation mis en place pour effectuer les mesures dans de bonnes conditions et valider les éléments recherchés.

Quatrième partie

Implémentation

12 Schéma bloc du système

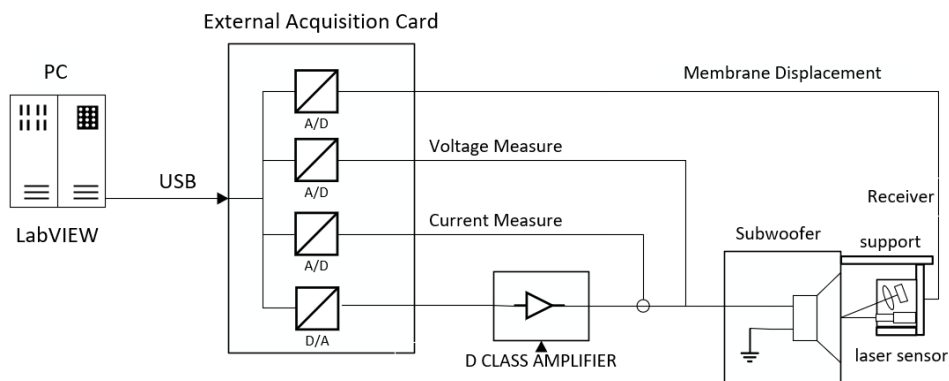


FIGURE 32: Schéma bloc de la mesure

La partie logique du système est le PC. Il sert à l'acquisition des données, l'affichage et la comparaison des mesures. Le logiciel LabVIEW sera utilisé pour le traitement des données. C'est aussi cet élément qui démarrera la mesure en transmettant un signal particulier à la carte d'acquisition. Le PC est relié à cette dernière par USB. La carte possède des convertisseurs A/D et D/A afin de pouvoir traiter numériquement les mesures faites en analogique. Un amplificateur de classe D fournit la puissance pour alimenter le caisson de basses. Un laser surmonté d'un capteur optique s'occupera d'observer le déplacement de la membrane du haut-parleur. Le courant est mesuré par une sonde ampèremétrique et la tension par une sonde différentielle.

13 Matériel utilisé

Afin de minimiser les coûts du projet ainsi que les temps de commande, tout le matériel choisi appartient à l'école ou à l'entreprise Stenheim. Le coût du projet s'élève donc à 0 CHF en terme de matériel.

13.1 Outils de mesure

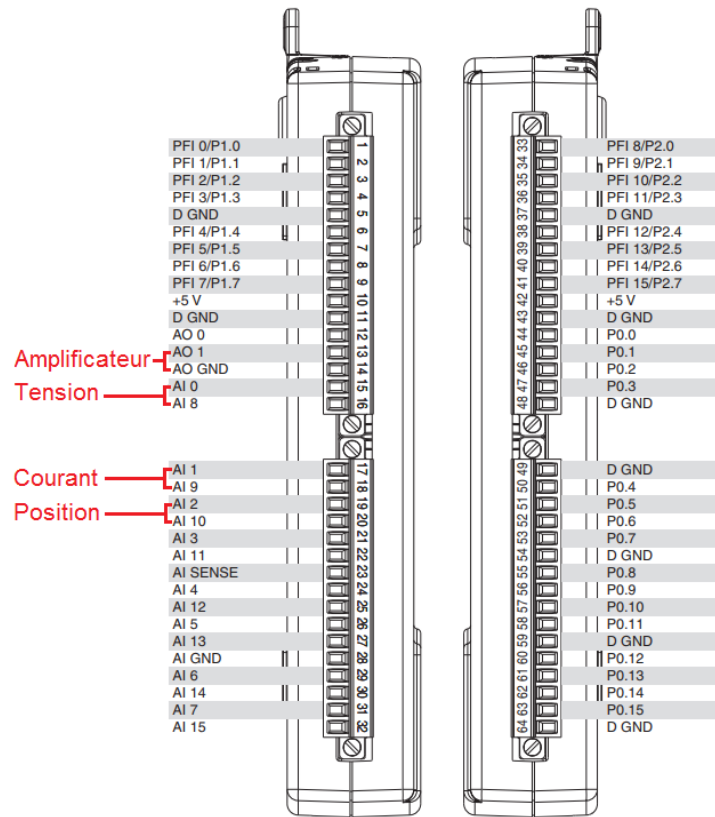
13.1.1 Carte d'acquisition

Il s'agit d'un composant de National Instrument, le USB-6212. Son intérêt provient de son convertisseur A/D et D/A. En effet, la vitesse du convertisseur A/D est de 400 échantillons par secondes pour un canal avec une résolution de 16 bits. Trois entrées sont utilisées en parallèle, ce qui permet une fréquence d'échantillonnage maximale de $400/3 = 133$ [kHz] (les entrées se partagent le même convertisseur A/D), ce qui est largement suffisant pour cette application.

La seule limitation vient du fait qu'elle ne supporte que des tensions d'entrées comprises entre $\pm 10[V]$, ce qui n'est pas suffisant pour mesurer les performances du haut-parleur. Des sondes de mesure sont donc utilisées.

Les branchements pour les mesures sont faits comme suit :

18. Source : <https://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>, page A-6

FIGURE 33: Connectique du NI USB 6212¹⁸

13.1.2 Sonde de courant

La LEM PR30 est une sonde prévue pour oscilloscope. Elle peut mesurer jusqu'à un courant de 30A¹⁹, ce qui est supérieur à la valeur maximale du courant traversant le haut-parleur :

$$P = R \cdot I^2 \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1000}{4}} = 15.81[A]$$

La réactivité de la sonde est de 14[ns] selon sa fiche technique. Cette valeur est négligeable parce le temps d'échantillonnage de la carte d'acquisition est de 10[us], ce qui est bien plus grand. Sa précision est de 1% sur une mesure de 2[mA].

13.1.3 Sonde de tension

La Pewatron SI-9001 permet une mesure de tension jusqu'à 70V²⁰ ce qui est suffisant pour cette application. La tension maximale théorique mesurée est de :

$$P = \frac{U^2}{R} \rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1000 \cdot 4} = 63.25[V]$$

La réactivité de cette sonde est aussi de 14 [ns], ce qui est encore une fois négligeable.

19. Source : <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo382/wp-includes/images/PR30.pdf>

20. Fiche technique du Pewatron SI-9001 : <https://www.pewatron.com/fileadmin/products/datasheets/200/450-01-404-010-EH-0309.pdf>, page 5

13.1.4 Capteurs lasers

OptoNCDT 1800-10



FIGURE 34: Laser OptoNCDT 1800-10²¹

Ce capteur de distance possède une résolution de 8 μ m et peut effectuer jusqu'à 5000 mesures par secondes. Le seul désavantage est sa plage de mesure qui est seulement de 1cm, ce qui est insuffisant pour mesurer le déplacement total de la membrane du haut-parleur. Il sera utilisé sur de faibles déplacements pour valider la modélisation du haut-parleur dans la plage linéaire.

Le délai entre la mesure et le résultat de la mesure est de 600[us] selon le fiche technique. Le boîtier de contrôle du laser possède un port série d'entrée/sortie. Seuls quelques pattes de ce composant sont utilisées : l'alimentation (+24V, GND) et la sortie de mesure (Output +, Output -). La sortie fonctionne entre 0 et 10V étant respectivement les points minimums et maximum de la mesure. Le laser est placé de manière à mesurer 5V lorsque le haut-parleur est au repos.

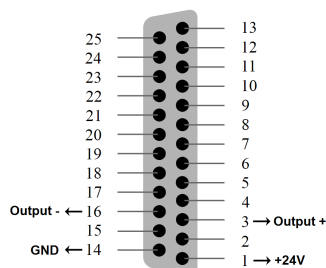


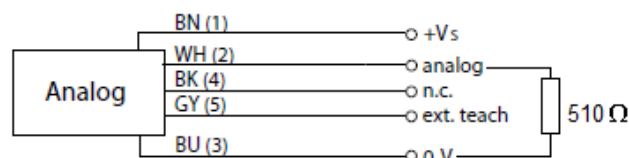
FIGURE 35: Port série²²

21. Fiche technique du OptoNCDT : https://www.lagerwerk.com/media/pdf/b3/48/60/optoNCDT180X_en.pdf, page 11

22. Source : https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_port, l'image a été modifiée

OADM 20I2480S14CFIGURE 36: Laser OADM 20I2480S14C²³

Ce laser peut mesurer une distance jusqu'à 50cm mais ne possède pas une précision exemplaire avec 0.05 à 2 [mm] d'erreur. Il servira à basse fréquences sur les grands déplacements de la membrane. Le capteur est configurable sur une plage plus petite que les 50cm maximum. C'est pourquoi il est configuré pour une plage de 5cm qui est suffisant pour la mesure de l'oscillation de la membrane du haut-parleur. La sortie du capteur est de 4 à 20 [mA] respectivement 0 à 5 [cm]. La carte d'acquisition ne possède que des entrées en courant, c'est pourquoi une résistance de 510 [ohm] est insérée en parallèle sur les pattes 2 et 3 pour convertir le courant en tension (2.04 à 10.2 [V]).

FIGURE 37: Pining OADM²⁰

Sa réactivité n'est pas clairement dans la fiche technique parce que la réflectivité de la membrane est inférieure à 7%. La seule information est qu'elle n'excède pas 2.8 millisecondes. La valeur mesurée est de 2 millisecondes.

23. Fiche technique du OADM : https://www.baumer.com/fr/en/product-overview/distance-measurement/optical-distance-sensors-/performance-class/factory-automation/oadm-20i2480-s14c/p/medias/___secure___/OADM_20I2480_S14C_web_FR.pdf?mediaPK=8799840337950

13.2 Matériel mis à disposition

Afin d'effectuer les tests dans de bonnes conditions, l'entreprise Stenheim met à disposition son matériel.

13.2.1 Amplificateur audio

Il provient de la marque Powersoft audio. Il s'agit du Litemod dont voici les caractéristiques :

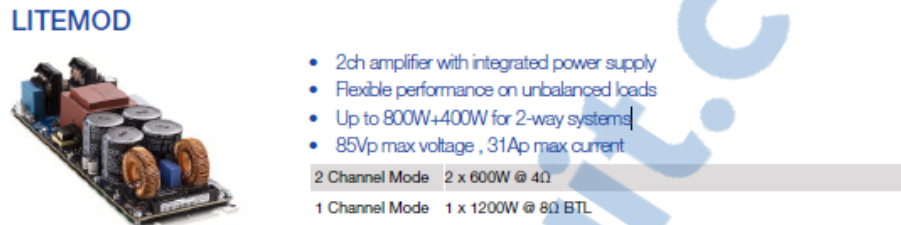


FIGURE 38: Litemod²⁴

L'amplificateur est utilisé dans le mode 1 canal pour avoir de la marge en terme de puissance et un gain de 39,9.

Il contient aussi un module DSP (digital signal processing).

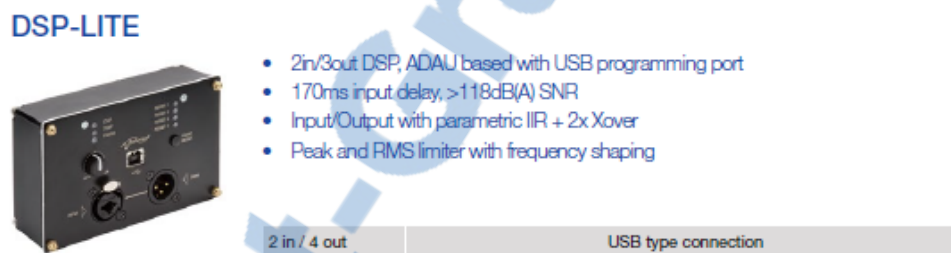


FIGURE 39: Dsp Lite²⁴

Celui-ci est commandable avec un logiciel (Armonia Pro Audio Suite) via une connexion USB. Ce programme permet entre autres de créer des filtres ou des limitations de puissance sur le système. Un pilote spécifique est utilisé pour la communication USB (sérielle), il s'agit de VCP de chez Silicon Labs. Il permet la sérialisation des données USB vers UART.

13.2.2 Haut-parleur

Le haut-parleur à caractériser est aussi mis à disposition. Il s'agit d'un Scan-Speak 32W/4878T Revelator, celui utilisé dans l'enceinte Alumine Sub de Stenheim.

Ce transducteur est spécialement conçu pour la restitution des basses fréquences parce qu'il possède une surface imposante et sa membrane est capable d'effectuer de grandes excursions. Ses caractéristiques principales sont exposées ci-après :

Le haut-parleur est placé dans un boîtier en bois possédant les dimensions de l'Alumine Sub. Des feutres ont été placés sous le caisson pour limiter la transmission de vibrations avec le sol, ce qui avait tendance à créer des résonances parasites durant son utilisation.

24. Source : <http://www.powersoft-audio.com/en/downloads/documentation/brochures/983-line-brochure-amp-modules-web/file>

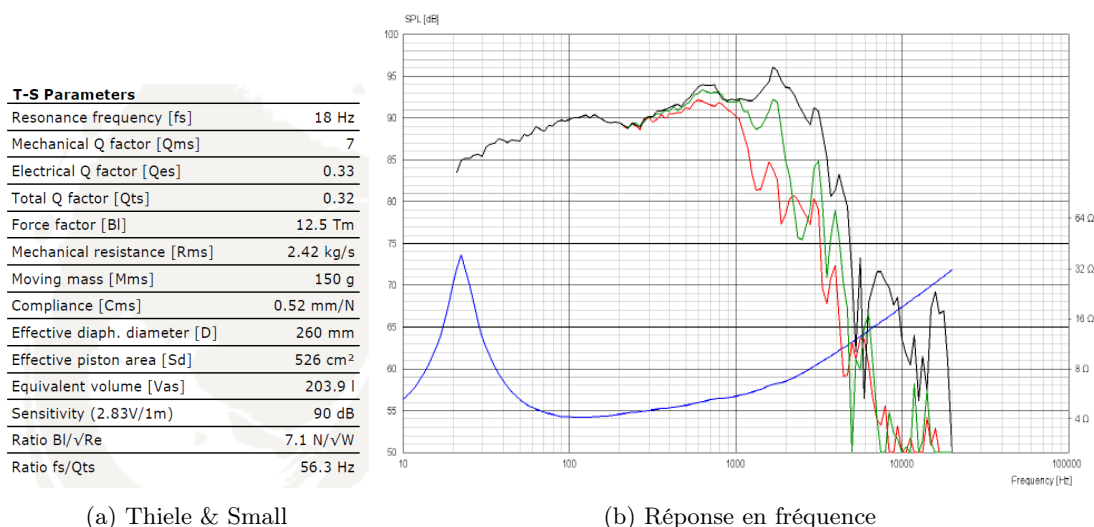
26. Source : <https://www.madisoundspeakerstore.com/approx-12-subwoofers/scan-speak-32w/4878t-revelator-13-subwoofer/>

26. Source : <http://www.stenheim.com/alumine-sub/>

27. Fiche technique du ScanSpeak : <http://www.scan-speak.dk/datasheet/pdf/32w-4878t00.pdf>



FIGURE 40: Haut-parleur et caisson

FIGURE 41: Paramètres du ScanSpeak²⁷

14 Support capteur laser

Le capteur de distance laser doit pouvoir être déplacé de manière plus ou moins précise (de l'ordre du mm) sur le centre du haut-parleur, sur la surface bombée du cache poussière, le point milieu étant perpendiculaire au faisceau du laser. Un positionnement aléatoire du laser sur une surface non perpendiculaire se caractériserait par une perte de précision. Une surface non perpendiculaire aurait tendance à fausser la mesure parce que la réflexion du faisceau ne serait plus dirigée vers le récepteur positionné en-dessous du laser.

La structure est montée grâce à des profilés de la marque Item. Les 2 vis supérieures d'attaches pour la plaque métallique sur l'avant du boîtier sont utilisées pour accrocher le support. Des feutres sont placés pour ne pas rayer la plaque métallique du caisson et limiter les vibrations dans la structure. Deux profilés sont donc accrochés chacun à une vis de fixation du boîtier. Une autre barre se fixe perpendiculairement sur les deux autres profilés. Une dernière tige vient se fixer sur le bas du profilé transversal.

Une plaque de support acceptant les deux lasers et qui se fixe sur un profilé est conçue.

Voici le montage complet du boîtier avec les profilés.

Avec les capteurs et la carte d'acquisition trouvés, un support pour les lasers monté, la protocole de mesure peut être mis en place.

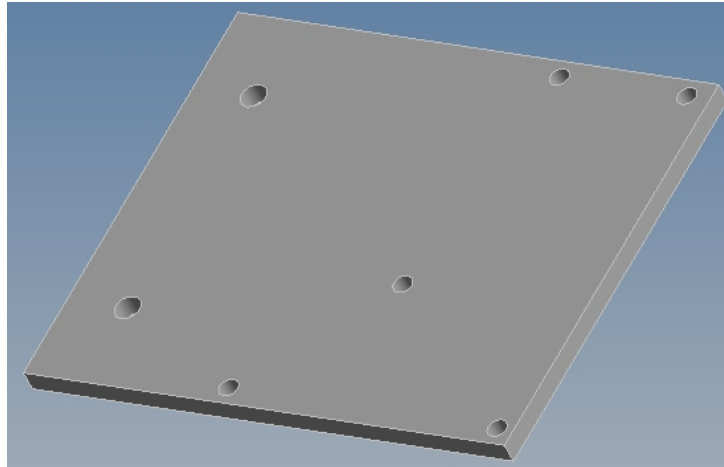


FIGURE 42: Plaque de support pour les lasers

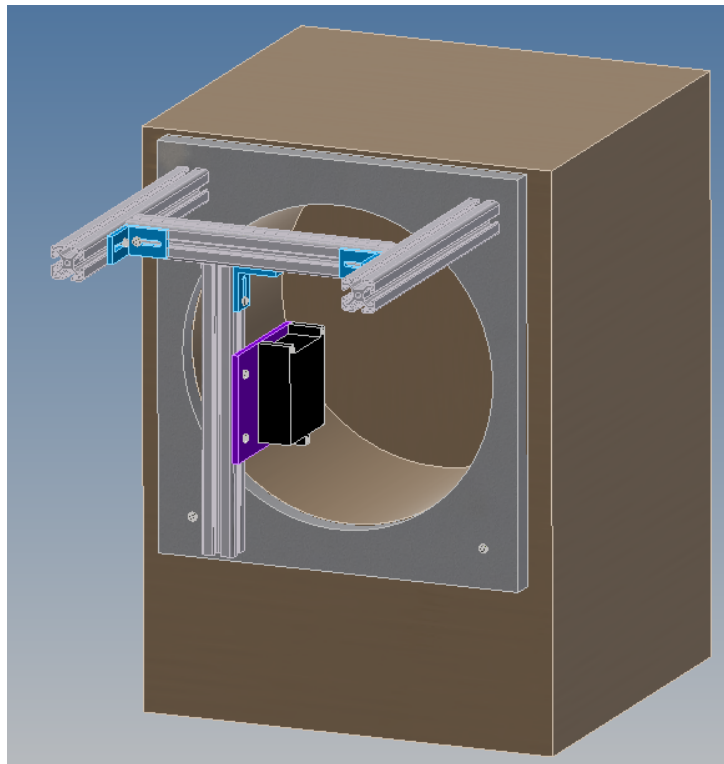


FIGURE 43: Boîtier complet

15 Déroulement de la mesure

Les mesures se font selon le même format. Un son est transmis au haut-parleur. Les mesures sont effectuées par les différentes sondes et le résultat est analysé sur Labview.

16 Signaux de test

Le haut-parleur sera testé grâce à différents signaux. Ils sont conditionnés dans des fichiers son au format WAV (Waveform audio file format) à une fréquence d'échantillonnage de 44.1 [kHz] pour une durée de 5[s] (choix arbitraire).

Il est important de préciser que les signaux n'excèdent pas une tension crête supérieure à 1V parce que

la sensibilité de l'amplificateur audio ne permet pas plus avec le volume placé à 0 [dB] sans créer de la saturation.

Validation de la modélisation

Un sinus d'amplitude faible (pour rester dans la zone linéaire du haut-parleur) avec une fréquence linéairement croissante (de 20 à 200Hz) est créé. Un autre fichier contenant le son d'un coup de grosse caisse permettra de déterminer la précision de la modélisation.

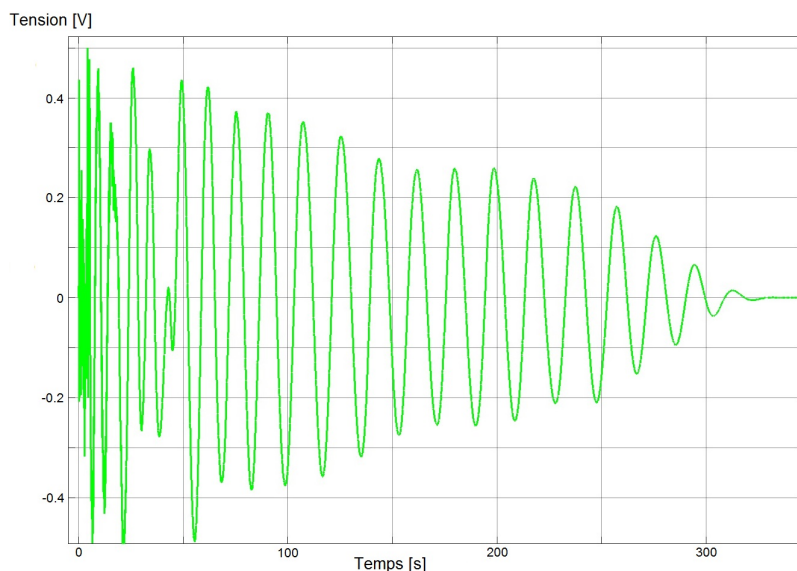


FIGURE 44: Signal d'un coup de grosse caisse

Mesure de compression et distorsion

Il n'est pas possible de mesurer directement le déplacement de la membrane en appliquant une tension continue pour plusieurs raisons :

- L'amplificateur audio filtre les signaux en dessous de 20Hz.
- Le déplacement maximal change en fonction de la fréquence du signal (plus la fréquence est élevée, moins le déplacement est important).
- La bobine du haut-parleur va s'échauffer très rapidement et fausser les mesures parce que le courant diminue quand la température augmente.

La solution est de créer un signal avec une fréquence fixe et une amplitude augmentant linéairement. La mesure est effectuée à chaque pic (positif et négatif) du sinus. Plusieurs signaux à différentes fréquences permettront d'observer au mieux le déplacement

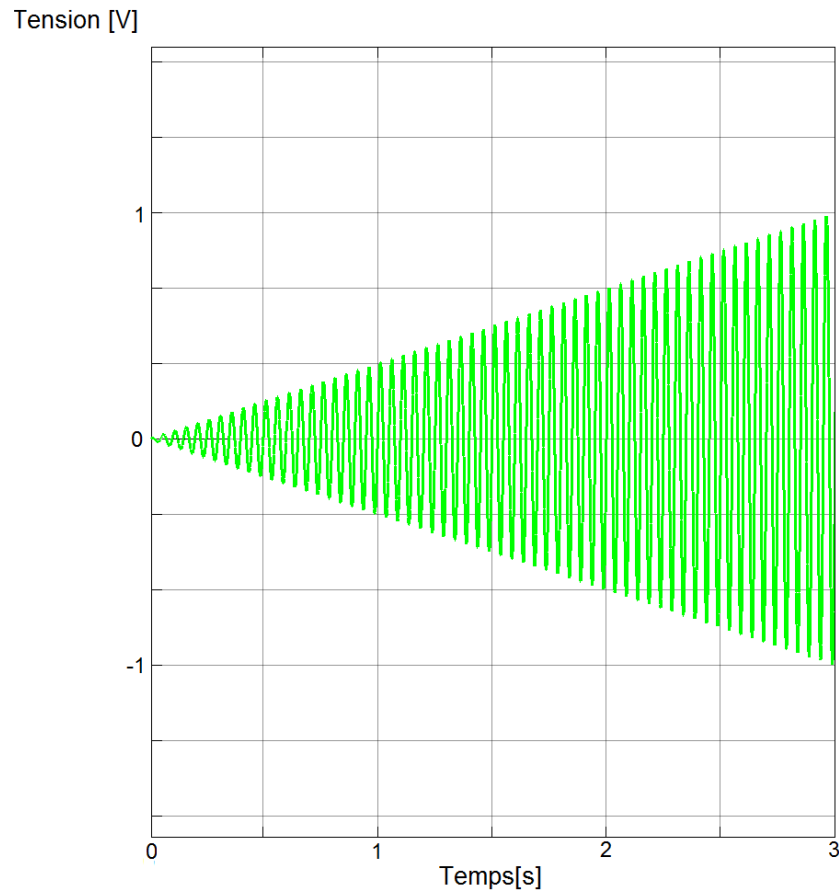


FIGURE 45: Sinus d'amplitude croissante

17 Labview

Labview est un logiciel conçu par National Instrument pour le développement de systèmes. Il permet de développer rapidement des applications de test ou de mesure. Il est utilisé dans ce projet pour l'acquisition et l'analyse des mesures.

L'application est une sorte d'environnement de développement amélioré pour de la programmation graphique.

L'intérêt de ce logiciel est qu'il peut être couplé très facilement avec une carte d'acquisition de National Instrument utilisée pour convertir les mesures analogiques du haut-parleur vers des données numériques assimilables par le programme.

17.1 VI : instrumentation virtuelle

Il s'agit de programmes que l'utilisateur crée avec labview. Un VI possède deux fenêtres de travail, la face avant et le diagramme. La face avant est l'interface utilisateur du programme. C'est de là que seront visibles les mesures effectuées (sous forme de graphe ou de tableau). Le diagramme quant à lui possède les différents blocs de programmation graphique.

A noter qu'il est possible de placer un bloc VI (alors appelé sous-VI) dans un autre VI.

Le nom "instrumentation virtuelle" est défini parce que la face avant ressemble aux outils de mesures conventionnels (multimètre, oscilloscope,...).

17.2 VIs de mesures

17.2.1 Bloc de lancement de mesure : Signal And Acquisition

Ce programme permet à l'utilisateur de choisir le fichier .WAV à jouer. Lorsque le VI est activé et exécuté, le fichier son est transmis à l'amplificateur audio via la carte d'acquisition. En parallèle, le VI enregistre les mesures faites sur le haut-parleur dans un fichier binaire (.tdms).

17.2.2 Bloc de traitement : Data Treatment

Il s'agit du VI principal utilisé pour afficher et traiter les mesures faites sur le haut-parleur. Il possède les graphes des mesures de courant, tension et déplacement mesuré ainsi que le déplacement calculé,...

Pour utiliser ce bloc, il faut tout d'abord choisir le fichier de mesure à lire avec le bloc "Lire un fichier de mesures" (double-clique dessus). Ensuite, le fichier WAV correspondant aux mesures peut être choisi si l'on souhaite le comparer à une mesure. Un bouton sur la face avant permet de choisir si la mesure a été faite avec le laser optoNCDDT ou alors le OADM. Enfin, il suffit d'exécuter le bloc.

Les deux lasers possèdent un offset de tension lorsqu'ils mesurent le haut-parleur au repos (ils ont une plage de mesure entre 0 et 10V pour l'optoNCDDT et de 2 à 10V pour l'OADM). Un bloc appelé "Mesures d'amplitudes et de niveaux" analyse le signal entrant et en calcul la moyenne (offset). Cette moyenne est déduite du signal de base pour enlever cette tension continue. Cependant, le bloc a besoin d'une certaine quantité d'échantillons avant d'obtenir une moyenne stable. Le début de la mesure du laser ne doit être pris en compte parce qu'elle ne représente pas encore le déplacement de la membrane.

Il est important de préciser que certaines parties du VI ne fonctionnent qu'avec certains signaux. Par exemple, pour obtenir la courbe de la tension sur le haut-parleur en fonction de son déplacement, il faut impérativement un sinus (de n'importe quelle fréquence) avec une amplitude croissante. Différents sous-VIs sont utilisés dans ce système. Il sont décrits ci-dessous.

17.2.3 Bloc de modélisation

Ce bloc possède le modèle linéaire du haut-parleur sous forme d'une fonction de transfert. L'utilisateur place en entrée la tension mesurée et le logiciel calcule le déplacement idéal de la membrane du haut-parleur.

Le VI utilise un bloc appelé MathScript permettant d'importer du code matlab dans labview. Ce code applique la fonction de transfert en Laplace développée dans la partie modélisation.

Ce bloc n'est pas optimale. L'entrée de la boucle MathScript est limitée à 100'000 échantillons pour une raison inconnue. Il n'est donc possible de modéliser le haut-parleur que pendant 1 seconde (avec la fréquence d'échantillonnage de 100 [kHz]). Cela est suffisant pour valider le modèle.

D'autres méthodes utilisant la boucle de simulation et de contrôle (bloc labview) permettant la simulation d'une fonction de transfert ont été testé mais il n'y a pas eu de résultats concluants.

17.2.4 OADM adapter

Le laser OADM affiche une tension proportionnelle à sa mesure. Ce bloc permet simplement d'adapter le rapport entre la tension et le déplacement.

Le laser optoNDCT n'a pas besoin de ce bloc parce que son rapport est de 1 (0V = 0mm, 10V = 10mm).

17.2.5 Peak detector

Ce VI permet de calculer la tension d'entrée en fonction du déplacement de la membrane ce qui permet de voir la distorsion.

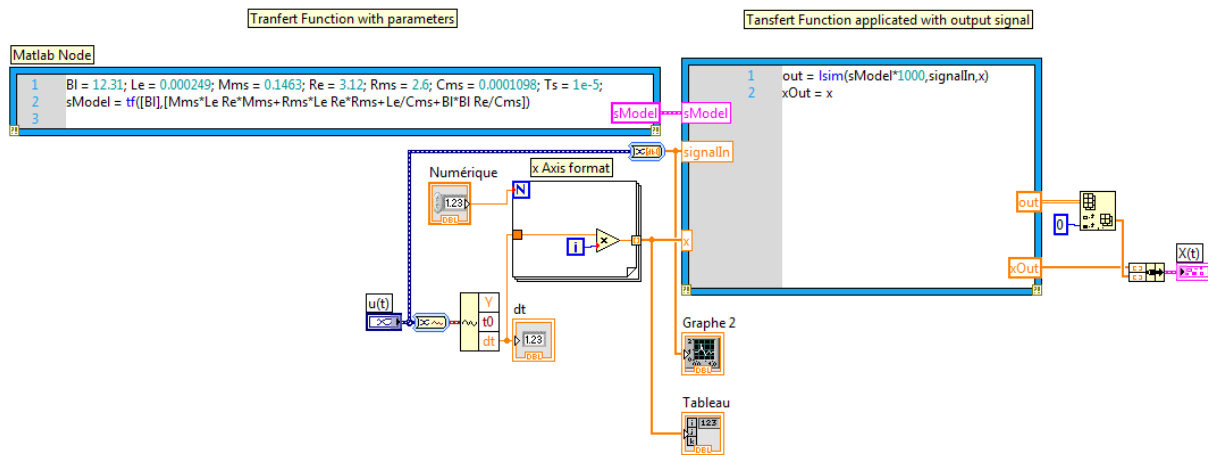


FIGURE 46: Diagramme de la modélisation

Il utilise un bloc appelé "Peak Detect" qui, comme son nom l'indique, permet de détecter les pics positifs de tension d'un signal en donnant sa valeur et sa position dans les échantillons. Le signal en entrée est alors inversé pour mesurer aussi les pics négatifs de tension. Le signal est ensuite rééchantillonné à la bonne base de temps.

17.2.6 Laser Delay

Le VI permet de mesurer le délai sur la mesure des lasers. Il calcule l'écart temporel entre les pics des deux signaux d'entrée. Il fait ensuite une moyenne de tous ces écarts et affiche le résultat.

Le signal comparé avec la mesure du déplacement est le déplacement calculé avec la modélisation.

17.2.7 Filtre à distorsion

Ce bloc permet l'analyse de la distorsion au niveau fréquentiel. Il suffit de placer le signal à mesurer en entrée ainsi que sa fréquence. Le VI va ensuite filtrer les 4 premières harmoniques du signal. Le taux de distorsion harmonique entre le signal d'entrée et de sortie peut être mesuré.

L'implémentation terminée, il est temps de passer aux résultats.

Cinquième partie

Résultats

18 Validation du modèle linéaire

Voici des graphes de comparaison entre le déplacement réel de la membrane et celui calculé.

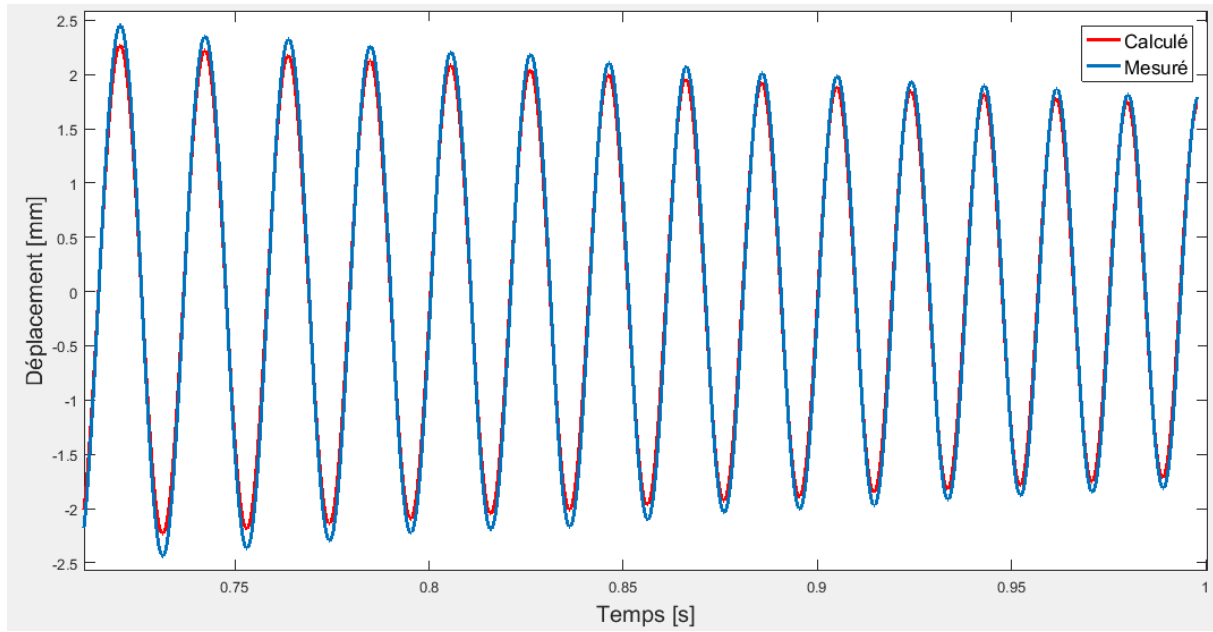


FIGURE 47: Comparaison sur un sweep en fréquence

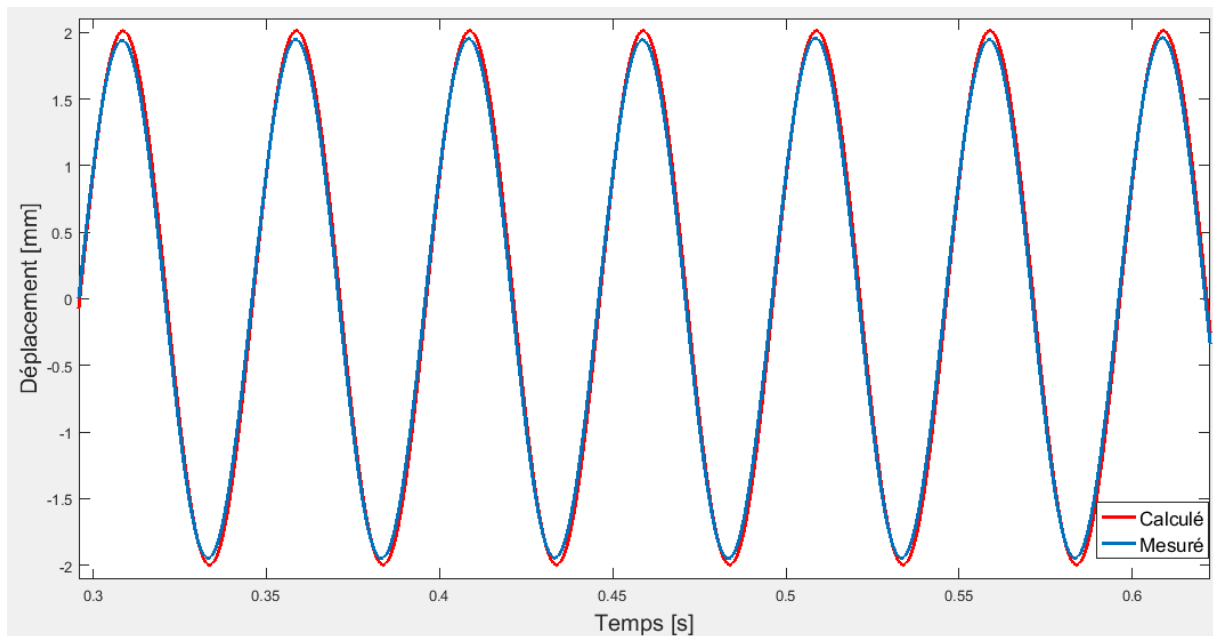


FIGURE 48: Comparaison sur un sinus de fréquence fixe

Il est bien visible que l'erreur de calcul est globalement faible. Le facteur de différence vient certainement du fait que le volume du boîtier qui influence le paramètre C_{ms} du haut-parleur n'est pas exactement

le bon. Le volume occupé par le haut-parleur dans le caisson (qui diminue donc le volume interne du boîtier) a été négligé parce qu'il est difficile à calculer exactement.

19 Distorsion mesurée

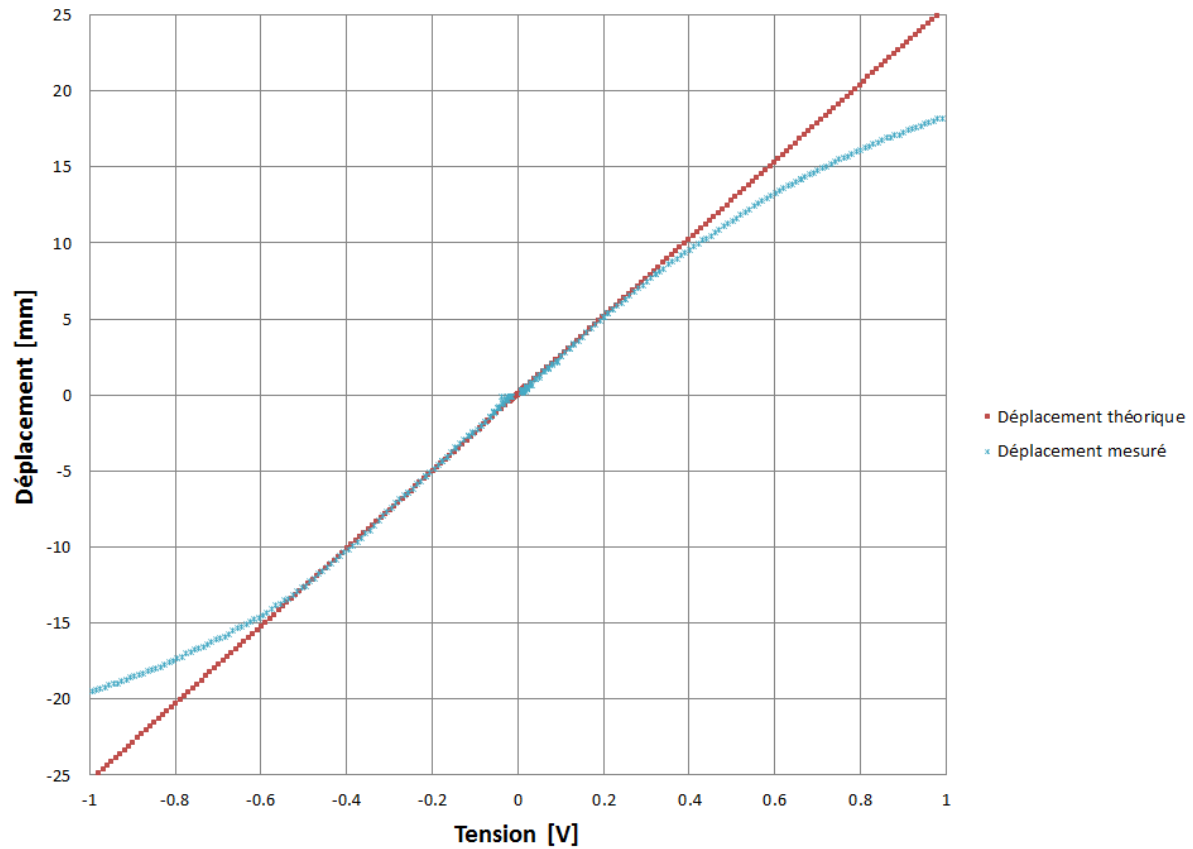


FIGURE 49: Distorsion à 20 Hz

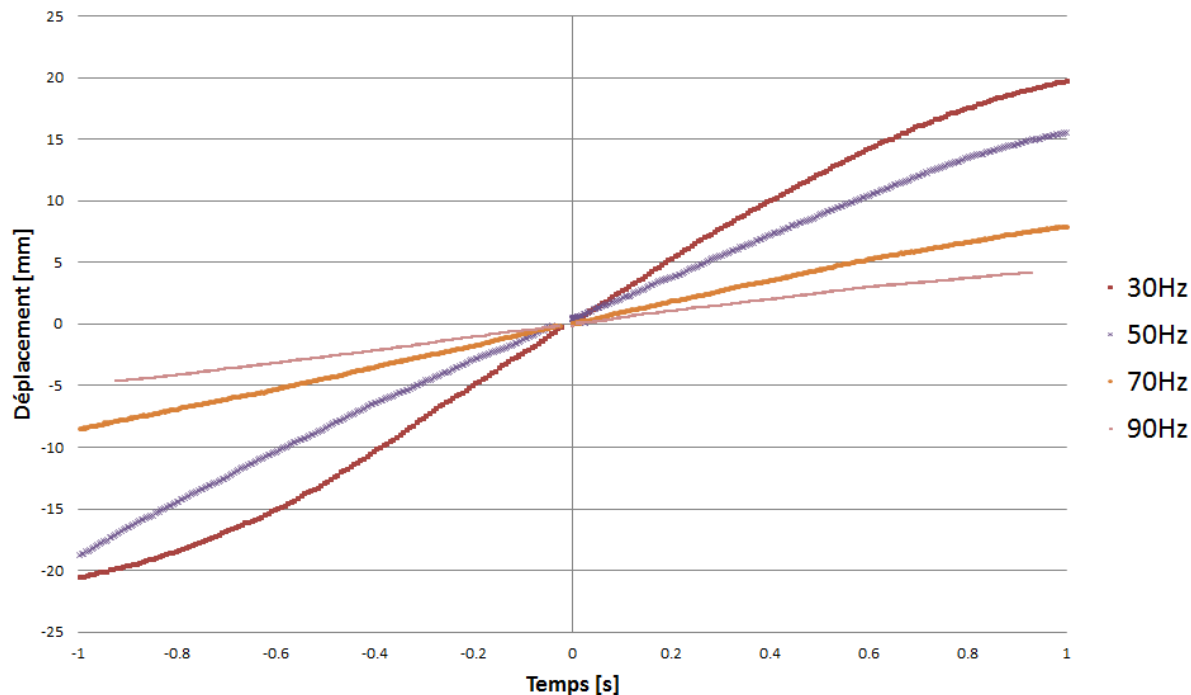


FIGURE 50: Distorsion à différentes fréquences

La distorsion est très clairement visible sur ces graphiques. Plusieurs éléments sont constatés. Plus la fréquence est basse, plus le phénomène de compression pour un déplacement élevé est important. Lorsque la fréquence augmente, la membrane se déplace de moins en moins. Un phénomène particulier apparaît. La membrane du haut-parleur a plus de facilité de déplacement vers l'extérieur que l'intérieur. Cela peut être dû à différents phénomènes :

- Le facteur de couplage Bl et (ou) la raideur de la suspension k_{ms} ne diminuent pas de manière symétrique.
- Le haut-parleur a plus de facilité à décompresser le volume d'air à l'intérieur du caisson qu'à le compresser.

20 Compensation

La compensation ne donne pas à l'heure actuelle de résultats satisfaisants. Les différentes méthodes présentées auparavant n'ont pas été concluantes ou n'ont pas eu le temps d'être finalisées. Le problème majeur étant survenu est le manque de connaissance théorique au niveau mathématique et physique qui aurait permis de mieux appréhender les difficultés rencontrées et d'obtenir une compréhension plus rapide. D'autres tests seront encore effectués après le rendu de ce rapport

Sixième partie

Conclusion

21 Analyse des résultats

La problématique du haut-parleur a été posée. Ce dernier a ensuite été analysé en profondeur pour en ressortir un modèle linéaire qui offre de bons résultats. Il a pu être démontré (dans le domaine linéaire) que le déplacement de la membrane peut se calculer sur une simple mesure de tension. Il serait possible de se séparer totalement de la mesure faite au laser dans le cas où la modélisation du haut-parleur prend en compte ses non-linéarités.

Des propositions quant à une méthode de compensation sont formulées. Elles restent cependant assez simples et n'apporteraient pas forcément de résultats satisfaisants.

Différents systèmes de compensations existants sur le marché ont été analysés. Ils ne correspondent pas exactement aux attentes de Stenheim parce qu'ils ne sont pas modulables et n'expliquent pas de façon détaillée leur manière de procéder.

Pour conclure, cette thèse aborde la problématique de la distorsion des hauts-parleurs déjà remarquée dans les années 1920. Malgré tout, il n'y a que très peu de système existants actuellement. Plusieurs systèmes sont quand même parvenu à produire des résultats satisfaisants en se basant sur de nombreuses années d'expériences. L'entreprise Klippel avec ses 20 ans est un exemple dans ce domaine.

Le domaine de l'audio est très vaste et demande des connaissances de mathématiques, physiques, mécaniques et acoustiques importantes, supérieures au bagage technique développé dans cette école. Il a quand même été néanmoins possible de proposer des résultats et de se faire une idée générale sur cette compensation. Avec plus de temps, il aurait été possible d'aller plus en profondeur dans les recherches.

22 Evolutions futures

Les possibilités d'avancées pour obtenir un produit fini sont élevées. Le premier point à valider serait de trouver un système de compensation obtenant des résultats satisfaisants ou modéliser directement les non-linéarités du haut-parleur.

Par la suite, l'idée serait de tenter une régulation simple en temps réel avec labview, ce qui demanderait de revoir toute la programmation graphique.

Il serait important aussi de pouvoir valider si l'utilisation de capteurs de mesure dans l'enceinte (après la vente de celle-ci) serait nécessaire ou si effectuer un banc de tests pour modéliser le haut-parleur avant la commercialisation suffirait.

En s'éloignant du cahier des charges de cette thèse, la prochaine étape serait d'adapter le système pour le placer sur un DSP afin de passer à sur un système embarqué intégrable dans l'enceinte ou dans l'amplificateur.

23 Remerciements

Un remerciement particulier est adressé à Mr. Christophe Bianchi qui a permis d'avoir un point de vue externe durant le projet.

Un important a aussi été proposé par Mr. Gilbert Maître dans le domaine technique.

Un grand merci évidemment aux membres de l'entreprise Stenheim et son directeur Mr. Jean-Pascal Panchard sans qui cette thèse n'aurait pu avoir lieu.

Pour finir, il faut remercier Mr.Dario Biner pour les précieux conseils apportés au long du projet.

Laurent PFEFFERLÉ

Sion, le 17 août 2018

Septième partie

Annexes

A Glossaire

— DSP	Digital Signal Processor
— FPGA	Field-Programmable Gate Array
— A/D	Analogique/Digital
— D/A	Digital Analogique
— 3A	Art et Acoustique Appliquées
— SAM	Speaker Active Matching
— USB	Univeral Serial Bus
— UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
— WAV	Waveform Audio File Format

B Liste de figures

Table des figures

1	Alumine 5	2
2	Schéma d'une chaîne hifi	5
3	Coupe d'un haut-parleur	5
4	Réponse en fréquence du haut-parleur RCF L12P110K	7
5	Diagramme de Bode	8
6	Distorsion harmonique : Domaine temporel	9
7	Distorsion harmonique : Domaine Fréquentiel	9
8	Intermodulation : domaine temporel	10
9	Facteur de force Bl	11
10	Raideur de la suspension	11
11	Distorsion sans adaptation de la tension d'entrée	12
12	Contrôle de la distorsion avec adaptation de la tension d'entrée	13
13	Compensation basée sur les mesures	14
14	Compensation basée sur le modèle	14
15	Compensation mixte	14
16	Déplacement en fonction de la tension	16
17	Linéarisation de la distorsion	17
18	Courbe de réponse en fréquence pas plate	18
19	Courbe de réponse en fréquence plate	19
20	Pont de Voigt	20
21	Enceinte Andante	20
22	Système Controlled Sound	21
23	Schéma bloc du système SAM	22
24	Partie électrique	24
25	Forces s'exerçant sur le haut-parleur	25
26	système masse-ressort-amortisseur	25
27	Représentation électrique de la partie mécanique	26
28	Schéma électronique complet	26
29	Flexibilité de la membrane et flexibilité du boîtier en parallèle	27
30	Modélisation du ScanSpeak 32W4878T00	28
31	Modélisation de Klippel	28
32	Schéma bloc de la mesure	30
33	Connectique du NI USB 6212	31
34	Laser OptoNCDT 1800-10	32



35	Port série	32
36	Laser OADM 20I2480S14C	33
37	Pining OADM	33
38	LiteMod	34
39	Dsp Lite	34
40	Haut-parleur et caisson	35
41	Paramètres du ScanSpeak	35
42	Plaque de support pour les lasers	36
43	Boîtier complet	36
44	Signal d'un coup de grosse caisse	37
45	Sinus d'amplitude croissante	38
46	Diagramme de la modélisation	40
47	Comparaison sur un sweep en fréquence	41
48	Comparaison sur un sinus de fréquence fixe	41
49	Distorsion à 20 Hz	42
50	Distorsion à différentes fréquences	43

C Documents

C.1 Datasheet ScanSpeak 32W/4878T00

C.2 Article : Modeling of nonlinear coil in a ferroresonant circuit

C.3 Andante 3A article

C.4 Mise en plan du support laser

C.5 Dix mesures de distorsion

D Liens utiles

Cette section regroupe différents sites internet, fiches technique et articles ayant servi à la compréhension du projet et l'élaboration du rapport.

D.1 Modélisation de haut-parleur

Francis.audio,

4.2 Comment modéliser l'impédance d'un haut-parleur ?,

<https://sites.google.com/site/francisaudio69/le-haut-parleur/4-2-comment-modeliser-l-impedance-d-un-hp>

Amplification Audiophile et DIY,

Haut-parleur (et enceinte),

<http://jm.plantefeve.pagesperso-orange.fr/acou.html>

TLHP.com (Tout Le Haut Parleur.com ,

Les paramètres Thiele and Small,

<https://www.toutlehautparleur.com/parametres-thiele-and-small>

D.2 Semi-inductance

US National Library of Medicine National Institutes of Health Search databaseSearch term Search,

What the electrical impedance can tell about the intrinsic properties of an electrodynamic shaker,

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5362209/#pone.0174184.e065>

D.3 Systèmes de compensations

Klippel - Controlled Sound,*Les articles dans la section Read More,*<https://www.klippel.de/products/controlled-sound.html>**Audiolense,***Juice,*<http://juicehifi.com/>**Sourceforge,***rePhase,*<https://sourceforge.net/projects/rephase/>**Devialet,***Sam,*<https://www.devialet.com/fr-ch/expert-pro-enceintes-sam-ready/>**Devialet,***Sam,*<https://www.devialet.com/fr-ch/expert-pro-enceintes-sam-ready/>

D.4 Distorsion

Audiofanzine,*La distorsion,*<https://fr.audiofanzine.com/enceinte-sono/editorial/dossiers/la-distorsion.html>

D.5 Labview

National Instruments,*Forum et aides de fonctions,*<http://www.ni.com/fr-ch.html>