DLR-AUDIO.COM
HEADPHONES HI-FI TESTS

Document Central d'Analyse et de Recherche d'Equipement Acoustique Ancien (DCAREAA)

Projet de Recherche en Acoustique

Analyse et mesure d'une enceinte acoustique Philips MFB 545 révision PL03

Valentin DEROUET[1]

[1]École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie de Lannion - Université De Rennes

14 août 2026

Mots-clés : Acoustique, Enceinte Hi-Fi, Mesure de Directivité, Analyse de Réponse en Fréquence, Distorsion Harmonique, Philips MFB 545, Méthodologie de Mesure, Ingénierie Audio, Systèmes de Reproduction Sonore, Documentation Technique.

Résumé :

Ce projet vise à caractériser de manière exhaustive les performances acoustiques et électroniques de l'enceinte Philips MFB 545, une enceinte emblématique des années 70 dotée de la technologie Motional Feedback (MFB). L'objectif est de réaliser une série de mesures acoustiques, telles que la réponse en fréquence, la distorsion harmonique, la réponse impulsionnelle et la directivité, afin de déterminer la qualité sonore de l'enceinte et de la comparer aux standards actuels de la Hi-Fi.

L'analyse technique porte également sur le circuit d'amplification intégré, en détaillant le fonctionnement des étages de préamplification, des filtres crossover, ainsi que la boucle de rétroaction MFB. Des simulations électroniques à l'aide de logiciels tels que LTspice sont réalisées pour vérifier les comportements théoriques des composants face aux résultats expérimentaux. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux des enceintes contemporaines de la Philips MFB 545, comme la Cabasse VTA Galion 3, pour évaluer la place de cette enceinte historique dans le contexte actuel.

Le projet explore également les sources d'erreur potentielles dans les mesures et propose des techniques pour minimiser ces biais. Enfin, une réflexion sur les améliorations possibles du circuit électronique, des composants acoustiques, ainsi que sur l'optimisation de la conception mécanique est développée. Ce travail offre une compréhension profonde de la technologie MFB et met en lumière les évolutions potentielles qu'un tel concept pourrait apporter à la Hi-Fi moderne.

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Objectif de la mesure **2**
2.1 Pourquoi mesurer cette enceinte ? . . . 2
2.2 Un défi personnel et technique . . . 2
2.3 Création de documentation et échange avec la communauté scientifique . . . 2
2.4 Comparaison et évaluation des performances . . . 2

3 Présentation du matériel **3**
3.1 Historique de l'enceinte Philips MFB 545 . . . 3
3.2 Contraintes de conception . . . 3
3.3 Performances mesurées . . . 4
3.4 Fonctionnement du Motion Feedback . . . 5
3.5 Caractéristiques techniques . . . 6

4 Méthodologie **7**
4.1 Lieu de la mesure . . . 7
4.1.1 Environnement de mesure . . . 7
4.1.2 Compromis et contraintes . . . 7
4.2 Équipement de mesure . . . 8
4.2.1 Matériel et logiciel utilisé . . . 8
4.2.2 Calibration . . . 8
4.3 Précision des mesures . . . 9
4.4 Configuration de mesure . . . 10
4.4.1 Schéma de l'installation . . . 10
4.4.2 Cas de mesure acoustique de la chaîne de reproduction complète . . . 10
4.4.3 Cas de mesure des caractéristiques des trois amplificateurs . . . 10
4.4.4 Distance de mesure et positionnement . . . 11

5 Protocole et prise de mesure **12**
5.1 Normes utilisées . . . 12
5.2 Mesures acoustiques . . . 13
5.2.1 Réponse en fréquence . . . 14
5.2.2 Distorsion harmonique à 1 mètre . . . 15
5.2.3 Réponse impulsionnelle . . . 16
5.2.4 Réponse transitoire (Step Response) . . . 17
5.2.5 Diagramme polaire de directivité . . . 17
5.2.6 Réponse en phase . . . 19
5.2.7 Réponse transitoire sinusoïdale . . . 19
5.2.8 Bruit de fond (Noise Floor) et Bruit de ronflement (Idle Humming Noise) . . . 20
5.2.9 Niveau de pression sonore (SPL) . . . 21
5.2.10 Waterfall plot (CSD) . . . 21
5.3 Mesures électroniques . . . 23
5.3.1 Réponse en fréquence des amplificateurs . . . 23
5.3.2 Puissance, linéarité et distorsion harmonique (THD) . . . 24
5.3.3 Réponse transitoire des amplificateurs . . . 24
5.3.4 Rapport signal/bruit (SNR) . . . 25
5.3.5 Bruit résiduel . . . 26

6 Analyse et compréhension technique **27**
6.1 Analyse des filtres . . . 27
6.1.1 Filtres crossovers . . . 27
6.1.2 Simulation électronique . . . 27
6.2 Analyse électronique des amplificateurs intégrés . . . 28
6.2.1 Schéma bloc de l'amplificateur . . . 28
6.2.2 Classes d'amplification . . . 28
6.2.3 Alimentation . . . 28
6.2.4 Rétroaction de vibration (Motional Feedback) . . . 28
6.2.5 Les modifications apportées sur les différentes révisions PL01-PL06 . . . 29

7 Résultats attendus et représentation des données **30**
7.1 Graphiques et modélisation . . . 30
7.1.1 Modélisation de la réponse théorique . . . 30
7.1.2 Choix des haut-parleurs . . . 30
7.1.3 Présentation des graphiques . . . 33
7.1.4 Comparaison historique . . . 33
7.1.5 Comparaison avec des concurrents . . . 33
7.2 Paramètres de qualité . . . 33
7.2.1 Tolérance sur la réponse en fréquence . . . 33
7.2.2 Qualité des transitoires . . . 33
7.3 Sources d'erreur et limitations . . . 34
7.3.1 Sources potentielles de biais . . . 34
7.3.2 Procédures de minimisation des biais . . . 34

8 Conclusion et critique **35**
8.1 Critique des résultats . . . 35
8.2 Comparaison avec les objectifs modernes . . . 35
8.3 Perspectives . . . 35

9 Annexe Technique **36**

Table des figures

1 Publicité française de la RH 545 affichant un prix de 6450 F . . . 1
2 Publicité originale de l'enceinte Philips MFB 545 . . . 3
3 Courbe de réponse de la 545 délivrée par le constructeur . . . 4
4 Principe de fonctionnement du MFB . . . 5
5 Vue de coupe d'un HP équipé d'un capteur d'accélération . . . 5
6 Schéma du filtrage de l'enceinte Philips MFB 545 . . . 5
7 Chambre anéchoïque de l'ENSSAT . . . 7
8 Courbe de correction appliquée au microphone Behringer ECM8000 . . . 8
9 Schéma de la chaîne de mesure et calibration . . . 9
10 Schéma de la configuration de mesure en mode *single channel* . . . 10
11 Configuration de mesure des amplificateurs de puissance . . . 10
12 Maquette théorique illustrant la topologie de la prise de mesure. . . . 11
13 Installation pratique dans la chambre anéchoïque. . . . 11
14 Ingénieur analysant des résultats à Philips, 1975 . . . 12
15 22RH532 en chambre anéchoïque Philips 1975 . . . 13
16 22RH532 en chambre d'écho Philips 1975 . . . 13
17 Courbe de réponse globale sur 20Hz / 20 kHz . . . 14
18 Comparaison de la réponse en fréquence avec (orange) et sans (jaune) caches de protection . . . 14
19 Taux de distorsion harmonique totale (THD) à 80 dB SPL à 1 mètre . . . 15
20 Détail des harmoniques (THD+N) . . . 16
21 Diagramme polaire de l'enceinte . . . 18
22 Diagramme polaire de l'enceinte . . . 18
23 Technicien effectuant les réglages Philips 1975 . . . 23
24 Enter Caption . . . 28
25 FFT AD0162/T8 - Philips 1976 . . . 30
26 FFT AD0163/T8 - Philips 1978 . . . 31
27 FFT AD0211/SQ8 - Philips 1978 . . . 32
28 FFT AD0210/SQ8 - Philips 1976 . . . 33

Liste des tableaux

1 Caractéristiques techniques de l'enceinte Philips MFB 545 . . . 6
2 Caractéristiques du haut-parleur AD0162/T8 . . . 30
3 Caractéristiques techniques du haut-parleur T8 . . . 31
4 Caractéristiques du haut-parleur AD0211/SQ8 . . . 32

1 Introduction

Le but de ce projet est de présenter et d'analyser les performances de l'enceinte Philips MFB 545, une enceinte légendaire reconnue pour sa technologie d'asservissement, qui visait à offrir la meilleure qualité de restitution sonore possible pour une utilisation en studio. Sortie en 1974, l'enceinte Philips MFB 545 a marqué un tournant dans l'industrie de l'audio en introduisant le concept de *Motional Feedback* (MFB), une approche innovante pour réduire la distorsion des basses fréquences et améliorer la précision sonore.

La Philips MFB 545, avec sa capacité à mesurer les mouvements de son propre haut-parleur et à corriger en temps réel les écarts indésirables grâce à un accéléromètre intégré, représentait une véritable avancée technologique. L'objectif de cette enceinte était de fournir une qualité sonore comparable aux enceintes professionnelles de studio, tout en restant accessible aux audiophiles exigeants de l'époque. En effet, la technologie MFB permettait une restitution des graves beaucoup plus linéaire, ce qui était exceptionnel pour les systèmes de cette taille. Ce type d'innovation reflétait la volonté de Philips de repousser les limites de l'audio domestique.

FIGURE 1 – Publicité française de la RH 545 affichant un prix de 6450 F

Ce projet de mesure a pour objectif non seulement de valider les performances de l'enceinte par rapport aux standards modernes, mais aussi de créer une documentation détaillée et précise sur un modèle emblématique des années 1970. L'analyse inclut la mesure de la réponse en fréquence, de la distorsion harmonique, de la réponse impulsionnelle, ainsi que de nombreux autres paramètres acoustiques, afin de fournir une évaluation complète des capacités de l'enceinte. En outre, ce projet vise à retracer l'histoire et l'impact de l'enceinte Philips MFB 545 sur l'industrie de l'audio, et à comprendre comment cette technologie novatrice se compare aux équipements actuels.

En fin de compte, ce projet est une exploration de la frontière entre l'ingénierie audio et l'art de la restitution sonore, permettant de se plonger dans les subtilités de la technologie MFB et de sa pertinence pour les audiophiles d'aujourd'hui. C'est aussi un défi personnel en tant que futur ingénieur, qui permet d'acquérir des compétences pratiques dans le domaine de l'acoustique et de la mesure, tout en contribuant à la préservation d'une partie de l'histoire de l'audio.

2 Objectif de la mesure

L'objectif de cette étude est de caractériser les performances acoustiques et électroniques de l'enceinte Philips MFB 545, version PL03. Les mesures porteront sur différents paramètres acoustiques, tels que la réponse en fréquence, la distorsion harmonique, et la réponse impulsionnelle. Ces analyses visent à obtenir une compréhension approfondie des qualités et des limitations de cette enceinte emblématique.

2.1 Pourquoi mesurer cette enceinte ?

L'intérêt principal de ce projet est de vérifier les performances de l'enceinte Philips MFB 545 et de les comparer aux standards modernes, ainsi qu'à des produits concurrents de la même époque, tels que la Cabasse VTA Galion 3 [1]. Il s'agit également de conserver un historique technique sur cette enceinte, qui est un exemple fascinant d'innovation acoustique des années 1970, notamment avec sa technologie de rétroaction de mouvement (MFB). En produisant une documentation complète et des mesures détaillées, le but est de contribuer à la mémoire collective de l'audiophilie.

2.2 Un défi personnel et technique

Ce projet constitue un défi personnel en tant que futur ingénieur, me permettant de me tester et de repousser mes limites techniques dans le domaine de l'acoustique. C'est une opportunité d'appliquer des compétences théoriques dans un cadre expérimental, tout en développant une expertise plus poussée dans le domaine de la mesure acoustique. Cela me permettra de mieux comprendre les subtilités de l'électronique et des systèmes mécaniques, tout en me spécialisant dans un domaine de niche au sein de l'ingénierie.

2.3 Création de documentation et échange avec la communauté scientifique

En plus des objectifs techniques, ce projet vise également à produire de la documentation de qualité sur l'enceinte Philips MFB 545, afin de la rendre accessible à d'autres passionnés, chercheurs, ou ingénieurs. Partager ces résultats permet de créer une base de connaissances qui pourrait être utile pour des discussions plus approfondies avec des chercheurs dans le domaine de l'acoustique, de la mécanique vibratoire, et de la rétroaction active. Le dialogue avec la communauté scientifique est une composante clé de ce projet, visant à favoriser un échange enrichissant et potentiellement à contribuer à des avancées dans les domaines concernés.

2.4 Comparaison et évaluation des performances

L'objectif principal reste la création d'une information quantitative précise sur les performances de l'enceinte, en la comparant non seulement aux autres enceintes de sa génération, mais également aux enceintes modernes. Ce processus de comparaison permettra de situer historiquement la Philips MFB 545 par rapport aux standards de qualité actuels, tout en soulignant les points forts et les limites de cette enceinte innovante pour l'époque.

En conclusion, ce projet mêle à la fois des objectifs personnels de développement technique, une volonté de contribuer à l'histoire de l'acoustique, et l'envie d'approfondir le dialogue avec la communauté des chercheurs et des passionnés. À travers l'étude de cette enceinte, il est question de mieux comprendre ce qui faisait la spécificité et la qualité des enceintes Philips MFB, et comment elles se comparent aux produits actuels et anciens. C'est à la fois un projet technique, historique, et pédagogique.

3 Présentation du matériel

3.1 Historique de l'enceinte Philips MFB 545

L'enceinte **MFB 545 Studio** de chez Philips était la plus avancée de Philips. Les ingénieurs de Philips avaient carte blanche pour la réalisation de cette dernière avec comme objectif d'obtenir la restitution la plus fidèle d'un signal audio par le moyen mécanique.

Sortie en 1974 au catalogue Philips, elle était aussi distribuée en France sous la marque Radiola. Vendue 6450 F à l'époque, c'est-à-dire environ 6000 € en 2024, par unité. Il fallait donc débourser plus de **12000 €** pour obtenir une paire !

Le projet s'est finalement avéré trop ambitieux et coûteux, même pour Philips. Selon une information [2], seuls environ 1 000 enceintes ont été produites avant l'arrêt de la production en 1979.

FIGURE 2 – Publicité originale de l'enceinte Philips MFB 545

3.2 Contraintes de conception

Le bureau d'étude de Philips s'est vu appliquer trois contraintes pour la réalisation de cette enceinte :

- Le son devait être suffisamment réaliste et crédible pour une utilisation professionnelle, même la plus exigeante.
- L'enceinte devait être capable de reproduire des basses parfaites jusqu'à 20 Hz à partir d'un caisson relativement petit, et même à un niveau de pression acoustique suffisamment élevé sans distorsion notable.
- La réponse en fréquence devait être réglable en fonction des exigences acoustiques du studio.

Les amplificateurs utilisés dans la 545 étaient tous de conception push-pull discrète, sans amplificateurs opérationnels, et fonctionnaient en classe AB ou B. Le trajet du signal du modèle RH 545 intégrait un total de 85 transistors et 39 diodes, témoignant d'une approche rigoureuse et complexe, visant à obtenir un son d'une qualité irréprochable. Cette conception sans compromis assurait une reproduction fidèle, tout en minimisant les distorsions et en garantissant une grande stabilité de l'amplification.

3.3 Performances mesurées

Lors des mesures en chambre anéchoïque, la réponse de la 545 montrait des performances exceptionnelles, avec une bande passante de 45 Hz à 17 kHz à ± 1,5 dB et de ± 3 dB entre 20 Hz et 20 kHz ! Cela illustre la capacité de l'enceinte à maintenir une précision remarquable sur toute la gamme audible.

Pour répondre aux exigences d'un environnement de studio, le niveau de pression acoustique total de l'enceinte a été mesuré sur une plage de plus de 7,5 octaves, atteignant 108 dB SPL à 1 mètre de distance. Cela indique que l'enceinte est capable de reproduire une large gamme de fréquences, allant de 20 Hz à plus de 10 kHz, couvrant environ 7,5 octaves.

— **Distorsion harmonique (THD)** : Les mesures montrent que la distorsion harmonique totale de l'enceinte Philips MFB 545 restait inférieure à 0,3% pour une grande partie de la bande passante, même à des niveaux élevés de pression acoustique. Cela garantit une reproduction fidèle sans coloration indésirable, un critère essentiel pour des enceintes de studio.
— **Réponse transitoire** : La 545 a également été testée [3] pour sa réponse transitoire. Les résultats montrent une excellente capacité à suivre des signaux rapides, grâce à l'utilisation du système Motion Feedback (MFB) qui réduit le délai de réponse et compense les mouvements non linéaires des haut-parleurs de graves.
— **Capacité en puissance** : L'enceinte est capable de délivrer une puissance continue de 100 W RMS, avec des pics pouvant atteindre 150 W sans distorsion notable. Cette capacité assure une reproduction dynamique adaptée aussi bien à l'écoute critique qu'aux situations où des niveaux sonores élevés sont requis.

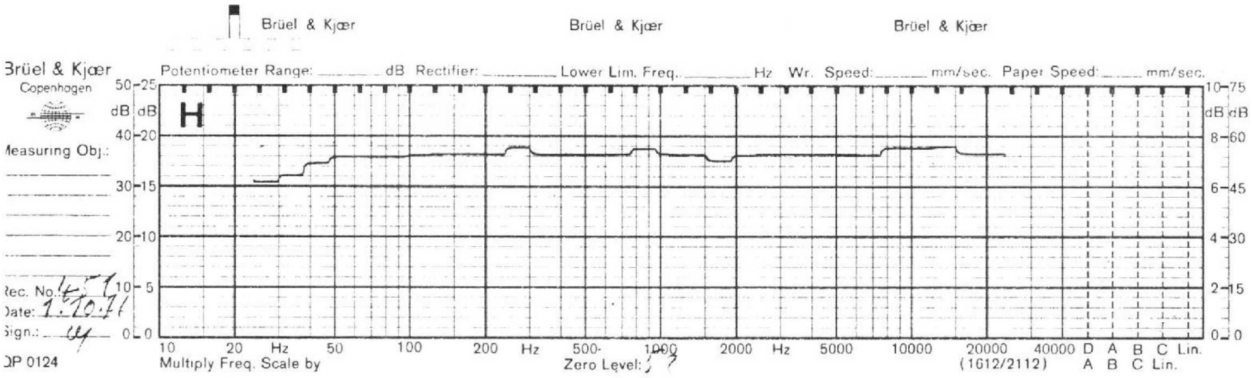


FIGURE 3 – Courbe de réponse de la 545 délivrée par le constructeur

De plus, les tests ont confirmé que l'enceinte maintenait une réponse en phase très linéaire sur toute la plage de fréquences, ce qui est essentiel pour la précision et la spatialisation du son. Cela permet une meilleure localisation des instruments et un respect des caractéristiques temporelles des signaux audio, élément crucial pour une utilisation en environnement professionnel.

3.4 Fonctionnement du Motion Feedback

Le système Motion Feedback (MFB) [4] est utilisé pour asservir le haut-parleur de basse fréquence afin de réduire la distorsion. Un accéléromètre est monté sur le cône pour mesurer les mouvements réels du haut-parleur, et ces informations sont utilisées pour corriger les erreurs dues à des facteurs comme la non-linéarité du cône ou des perturbations externes.

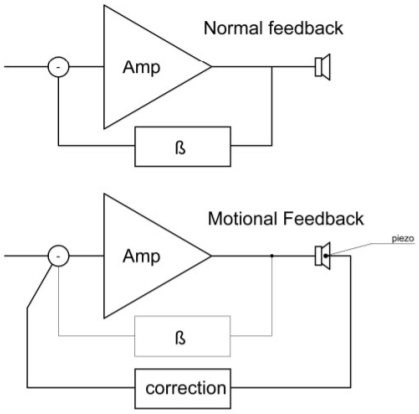


FIGURE 4 – Principe de fonctionnement du MFB

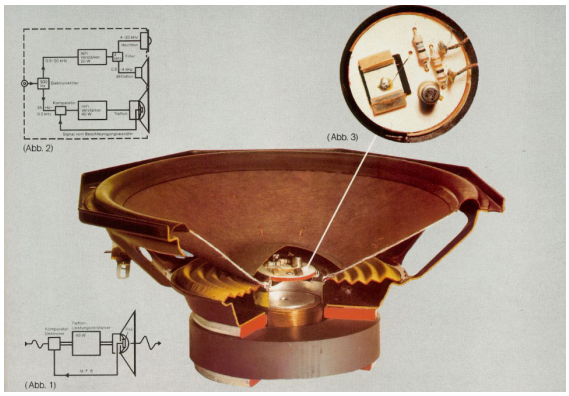


FIGURE 5 – Vue de coupe d'un HP équipé d'un capteur d'accélération

L'accéléromètre n'a été utilisé que dans le haut-parleur des graves, car à des fréquences inférieures à 500 Hz, le cône a tendance à se comporter uniformément sur toute sa surface, ce qui permet de déterminer la tension correspondant à la sortie de l'enceinte.

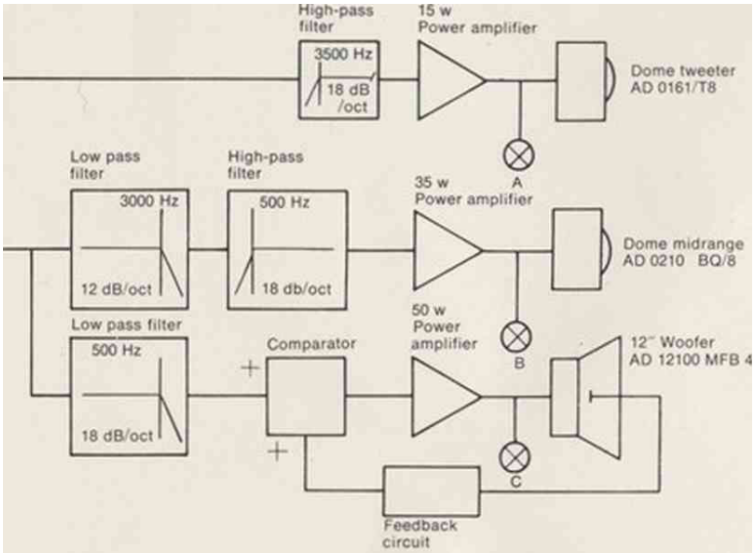


FIGURE 6 – Schéma du filtrage de l'enceinte Philips MFB 545

Philips fut le premier fabricant à réussir pleinement la commercialisation d'un haut-parleur à rétroaction de mouvement (Motion Feedback). Ce succès est en grande partie attribuable à *Piet Gouw*, qui dirigeait alors le groupe High Fidelity chez Philips. Sous sa direction, les premiers prototypes ainsi que les versions finales des haut-parleurs furent développés et perfectionnés, ouvrant ainsi la voie à une avancée technologique majeure dans le domaine de l'acoustique grand public. Grâce à cette innovation, Philips a su conjuguer performance technique et utilisation professionnelle, positionnant ainsi l'enceinte MFB 545 comme une référence incontestée de l'époque.

3.5 Caractéristiques techniques

TABLE 1 – Caractéristiques techniques de l'enceinte Philips MFB 545

Méthode	Amplificateur intégré / 3 voies / 3 haut-parleurs
Haut-parleurs	Basses : Type cône de 30 cm (AD12100/MFB4) Moyenne : Type dôme de 5 cm (AD0210/Sq8) Aigus : Type dôme de 2,5 cm (AD0162/T8)
Puissance Totale	Onde sinusoïdale continue 100 W
Caractéristiques de fréquence	Gamme de fréquences : 20 Hz à 20 kHz Pression acoustique à 1m : 108 dB Fréquences de crossover : 500 Hz, 3 kHz Volume de l'enceinte : 70 litres (50 litres partie acoustique)
Connectique entrée / sortie	Entrée / Sortie : Type asymétrique Entrée : Symétrique et asymétrique Sensibilité d'entrée : - Symétrique : 1 V à 23 V / 10 kΩ - Asymétrique : 1 V à 3 V / 100 kΩ ; 3 V à 23 V / 1 kΩ
Commutateur ON/OFF	ON : 1 seconde ou plus à partir de 1,5 mV en entrée OFF : Après 2 minutes ou plus sans signal
Filtre passe-bas	1 : -5 dB (200 Hz) 2 : -5 dB (60 Hz) 3 : -3 dB (de 55 Hz à 160 Hz)
Contrôle des basses	± 10 dB à 60 Hz, Fréquence de transition : 350 Hz
Contrôle des aigus	Variation continue : 0 à 20 dB/octave, Fréquence de transition : 7 kHz / 10 kHz
Amplificateur MFB	Puissance de sortie : 50 W Distorsion harmonique : 1% ou moins (50 W, 100 Hz), 0,1% ou moins (40 W, 100 Hz) Bande passante de sortie : 5 Hz à 5 kHz
Amplificateur bande moyenne	Puissance de sortie : 35 W Distorsion harmonique : 1% ou moins (35 W, 1 kHz), 0,1% ou moins (25 W, 1 kHz) Bande passante de sortie : 40 Hz à 30 kHz
Amplificateur hautes fréquences	Puissance de sortie : 15 W Distorsion harmonique : 1% ou moins (15 W, 5 kHz), 0,1% ou moins (10 W, 5 kHz) Bande passante de sortie : 100 Hz à 50 kHz
Autres caractéristiques	Semi-conducteurs : 85 transistors, 39 diodes Tension d'alimentation : AC 110V/127V/220V/240V Consommation : jusqu'à 200 W Dimensions : 436 mm (L) x 650 mm (H) x 320 mm (P) Poids : 31,0 kg

4 Méthodologie

4.1 Lieu de la mesure

4.1.1 Environnement de mesure

Les mesures seront réalisées dans une chambre anéchoïque, ainsi qu'en extérieur (champ diffus) pour simuler des conditions réalistes. L'utilisation de la chambre anéchoïque vise à éliminer les réflexions parasites pour obtenir des mesures précises des caractéristiques sonores de l'enceinte.

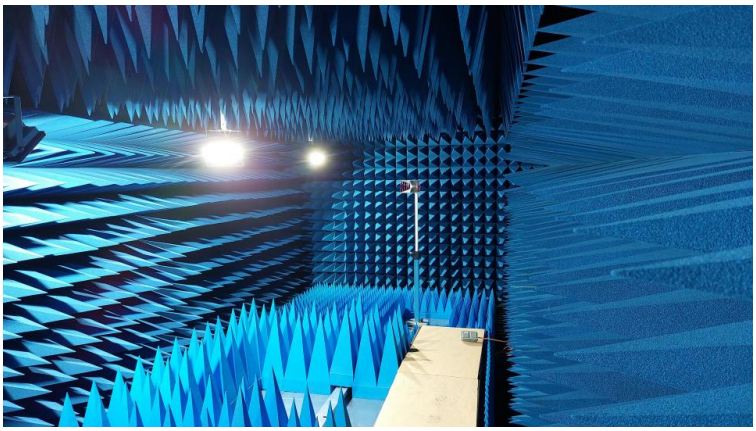


FIGURE 7 – Chambre anéchoïque de l'ENSSAT

Cependant, cette chambre n'est pas spécifiquement optimisée pour les fréquences audibles, mais plutôt pour des mesures de compatibilité électromagnétique (EMC) et des analyses RF. Elle est anéchoïque pour les fréquences électromagnétiques, offrant une isolation efficace à partir de **60 MHz** jusqu'à **6 GHz**, mais elle ne dispose pas de protections particulières sur la bande audible. De plus, il n'y a pas de composants, qu'ils soient actifs ou passifs, dédiés au filtrage en dessous de **40 kHz**. Cela implique que la chambre n'est pas totalement adaptée à l'élimination des réflexions acoustiques à des fréquences inférieures, ce qui pourrait limiter la précision de certaines mesures de très basses fréquences.

4.1.2 Compromis et contraintes

- **Optimisation RF** : La chambre est spécifiquement conçue pour les analyses RF (60 MHz à 6 GHz), ce qui signifie qu'elle est moins efficace pour supprimer les réflexions sonores dans la plage de fréquence audible.
- **Absence de filtrage acoustique dédié** : Bien que la chambre soit conçue pour minimiser les interférences électromagnétiques, elle ne comporte pas de traitement acoustique pour les fréquences inférieures à 40 kHz. Cela peut entraîner des perturbations dans la mesure des caractéristiques sonores, en particulier en dessous de 20 kHz, la limite supérieure de l'audition humaine.
- **Influence sur les mesures de son** : Malgré ces limitations, la chambre reste un environnement beaucoup plus contrôlé que d'autres options disponibles, comme une pièce classique non traitée. Elle permettra d'obtenir des mesures relativement précises pour la bande passante de l'enceinte, bien que des compromis soient à considérer en matière de fidélité pour les très basses fréquences.

Les conditions environnementales, telles que la température et l'humidité, seront notées, car elles influencent la propagation du son et peuvent avoir un impact sur la précision des mesures.

4.2 Équipement de mesure

4.2.1 Matériel et logiciel utilisé

- **Microphone de mesure : Behringer ECM8000** [5]
  - *Calibration nécessaire*
  - *Sensibilité* : –60 dB
  - *Réponse en fréquence* : 15 Hz - 20 kHz
- **Carte son : Scarlett 2i2, Gen3** [6]
  - *Entrée (IN)*
    - *Réponse en fréquence* : 20 Hz - 20 kHz ± 0,1 dB
    - *Gamme dynamique* : 110 dB (pondéré A)
    - *THD+N* : < 0,03 %
  - *Sortie (OUT)*
    - *Plage dynamique* : 108 dB
    - *THD+N* : < 0,002 %
    - *Niveau de sortie maximum (0 dBFS)* : 15,5 dBu
    - *Impédance* : 430 Ω
- **Suite de logiciels :**
  - ARTA, STEPS, LIMP (avec licence) [7]
  - Room EQ Wizard (REW) [8]
  - LTSpice [9]

4.2.2 Calibration

Pour assurer l'exactitude des mesures, chaque équipement doit être calibré de manière rigoureuse.

- **Calibrateur de microphone** : Pour calibrer le microphone de mesure Behringer ECM8000, un calibrateur de type *Digital Sound 8930B* est utilisé. Ce calibrateur est conforme à la norme IEC 60942 :2018 Classe 2, ce qui assure un niveau de précision adapté à des mesures acoustiques précises. Il convient à tous les sonomètres à tête de microphone mécanique, selon les normes IEC 61094-1 et IEC 61094-4, et permet de générer des niveaux de pression acoustique de 94, 104, ou 114 dB à 1 kHz [10].
- **Courbe de correction du microphone** : En plus du calibrateur, une courbe de correction sera appliquée pour le microphone, comme préconisé par Dominique Pétoin [11]. Cela permet de compenser les réponses en fréquence non linéaires du microphone et d'améliorer la précision globale des mesures.

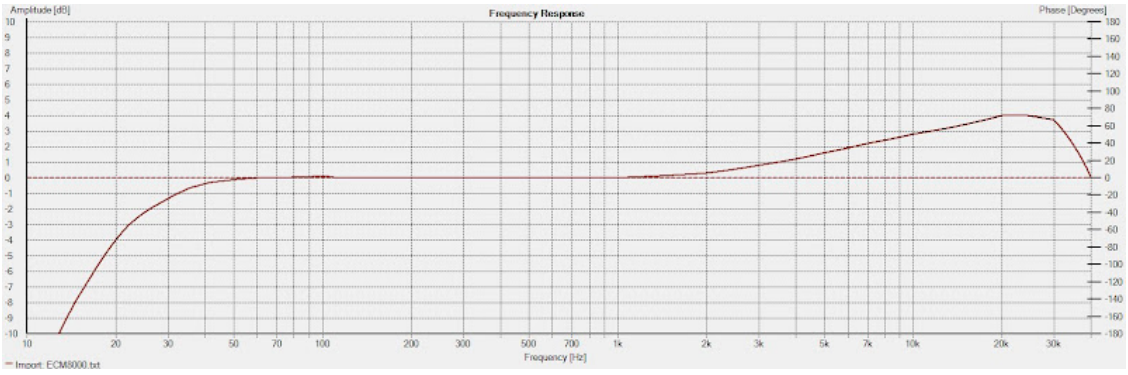


FIGURE 8 – Courbe de correction appliquée au microphone Behringer ECM8000

— **Calibration de la carte son** : La carte son Scarlett 2i2 Gen3 doit être étalonnée pour garantir des mesures fiables. Pour cela, on procédera à une calibration en plusieurs étapes :
  — **Calibration de la sortie gauche** : Cette calibration permet d'assurer que la sortie de la carte son est précise en termes de niveau de signal.
  — **Calibration de l'entrée gauche** : Cela permet de s'assurer que les niveaux de signal capturés par l'entrée de la carte son sont corrects, éliminant ainsi les déviations potentielles.

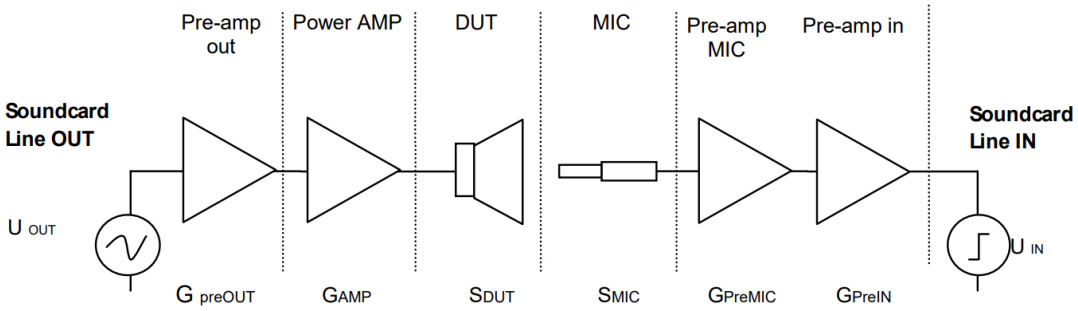


FIGURE 9 – Schéma de la chaîne de mesure et calibration

— **Autres équipements** : D'autres équipements tels qu'un voltmètre, un télémètre laser, un générateur de basse fréquence, un plateau tournant automatisé seront également utilisés, tous étant des appareils calibrés pour assurer une précision optimale.

Pour plus de détails sur l'équipement de mesure et les étapes de calibration, voir les références de Dominique Pétoin [12] et le guide de calibration du logiciel ARTA [13].

4.3 Précision des mesures

La précision des mesures dépendra principalement des performances de la carte son utilisée pour l'acquisition. Voici les considérations principales :

— **Précision maximale du THD** : La carte son Scarlett 2i2 Gen3 offre une précision maximale de $< \mathbf{0{,}03\ \%}$ au niveau du THD. Ce niveau de distorsion harmonique est inférieur à la limite de **0,1 %** spécifiée par les constructeurs pour les amplificateurs, ce qui garantit qu'il ne posera pas de problème pour les mesures acoustiques.
— **Compatibilité avec les mesures acoustiques** : La marge d'erreur liée au THD de la carte est suffisamment faible pour les mesures acoustiques, où les tolérances sont généralement plus élevées.
— **Précision des niveaux de signal** : La dynamique de 110 dB de la carte son assure une capacité à capturer des variations fines dans les niveaux sonores, essentielle pour les mesures en champ libre et proche.
— **Influence des résistances d'entrée/sortie** : L'impédance d'entrée de la carte son est suffisamment élevée ($> \mathbf{1\ M\Omega}$) pour ne pas altérer les signaux mesurés, tandis que la faible impédance de sortie garantit une transmission précise vers les appareils connectés.
— **Limitations de bande passante** : La carte son a une réponse en fréquence garantie entre **20 Hz et 20 kHz ± 0,1 dB**, ce qui couvre parfaitement la plage audible.

Les performances de la carte son sont largement suffisantes pour ce projet, à la fois pour les mesures acoustiques et les analyses des amplificateurs. Les éventuelles limitations de précision sont négligeables dans le cadre des objectifs visés.

4.4 Configuration de mesure

4.4.1 Schéma de l'installation

Plusieurs dispositions de mesures seront réalisées :
— Une configuration pour mesurer la reproduction mécanique et acoustique des haut-parleurs.
— Une autre configuration pour analyser les caractéristiques des différents amplificateurs intégrés.

4.4.2 Cas de mesure acoustique de la chaîne de reproduction complète

En raison de la nature active de l'enceinte, il est difficile de sonder directement chaque haut-parleur individuellement. Ainsi, les mesures acoustiques seront effectuées en mode *single channel*, avec un microphone unique capturant le résultat acoustique global.

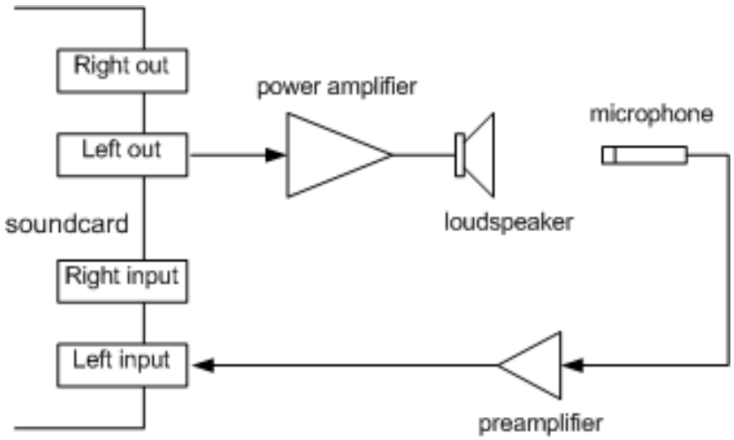


FIGURE 10 – Schéma de la configuration de mesure en mode *single channel*

4.4.3 Cas de mesure des caractéristiques des trois amplificateurs

Pour mesurer les caractéristiques des trois amplificateurs intégrés, une charge fictive (*dummy load*) de 4/8 ohms sera utilisée pour simuler un haut-parleur réel. Un atténuateur sera également inséré pour protéger la carte son contre des niveaux de signal trop élevés (cf. section dédiée à l'atténuateur).

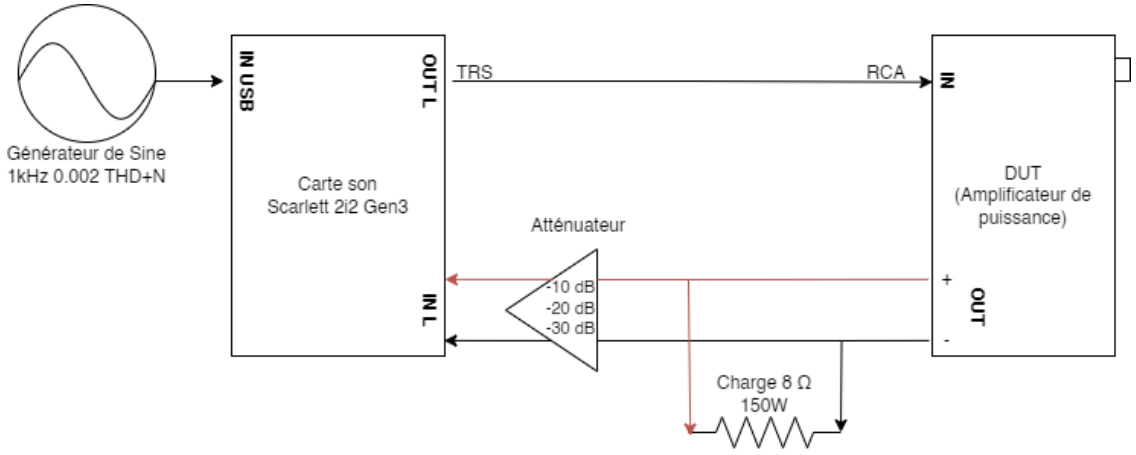


FIGURE 11 – Configuration de mesure des amplificateurs de puissance

4.4.4 Distance de mesure et positionnement

Les mesures seront effectuées en suivant les standards pour garantir des résultats précis et reproductibles. L'objectif est d'assurer que les conditions de distance et de positionnement sont optimales pour évaluer les caractéristiques acoustiques de l'enceinte.

- **Distance de mesure** : Une distance de **1 mètre** sera utilisée pour les mesures en champ libre, tandis qu'une distance de **3 à 5 cm** sera privilégiée pour les mesures en champ proche. Un mètre laser sera employé pour garantir la précision de ces distances.
- **Positionnement du microphone** : Le microphone sera placé sur l'axe du tweeter et des autres haut-parleurs, à hauteur du centre de rayonnement de l'enceinte, afin de garantir la fidélité des mesures.

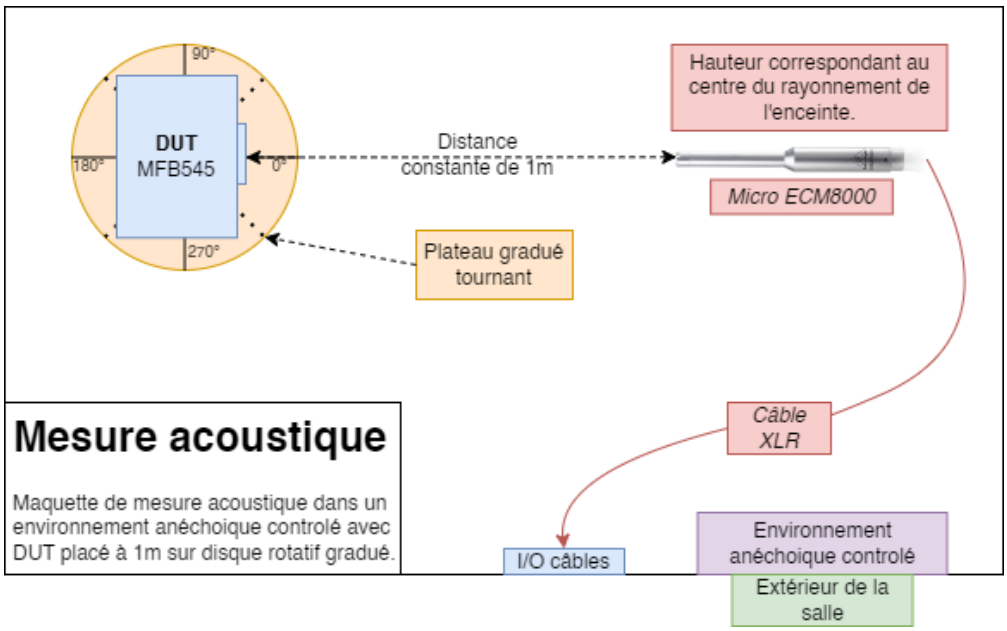


FIGURE 12 – Maquette théorique illustrant la topologie de la prise de mesure.

Pour compléter ces informations théoriques, voici une vue de l'installation réelle dans la chambre anéchoïque pour montrer le placement exact du microphone et de l'enceinte lors des mesures.

FIGURE 13 – Installation pratique dans la chambre anéchoïque.

5 Protocole et prise de mesure

5.1 Normes utilisées

FIGURE 14 – Ingénieur analysant des résultats à Philips, 1975

Ce cliché illustre l'importance des méthodologies standardisées dans les laboratoires Philips pour garantir des mesures cohérentes et reproductibles. Les protocoles établis à l'époque restent une référence incontournable pour l'évaluation acoustique des enceintes modernes. Ces mesures, souvent réalisées en chambre anéchoïque, permettent de déterminer des paramètres tels que la distorsion, la directivité et la linéarité spectrale.

Contexte des Normes

Les normes utilisées pour la mesure incluent la **DIN 45 573**, la **IEC 60268-5**, et la **ISO 3741/3745**, entre autres références pertinentes. Ces normes établissent des cadres précis pour des aspects tels que la réponse en fréquence, la distorsion harmonique et la puissance sonore des enceintes, garantissant des résultats conformes aux standards professionnels. Cependant, il est important de noter que ces normes sont conçues pour des environnements de laboratoire avec des équipements spécialisés, souvent hors de portée pour un projet amateur. Dans ce contexte, elles servent principalement de guides conceptuels pour structurer les mesures et interpréter les résultats.

Limites et Adaptation

Bien que l'objectif ne soit pas de respecter ces normes à la lettre, elles fournissent une base théorique et des méthodologies éprouvées qui enrichissent le cadre de ce travail. L'approche suivie ici cherche à équilibrer les contraintes pratiques avec une application simplifiée de ces standards.

5.2 Mesures acoustiques

Afin de garantir des mesures acoustiques précises et reproductibles, il est crucial de spécifier les conditions environnementales et de suivre les normes pertinentes. Les mesures acoustiques sont sensibles à des paramètres tels que la température de l'air, la pression atmosphérique et l'humidité relative, qui influencent directement la propagation du son.
Voici les conditions de mesure pour ce projet (moyenne glissante sur la durée totale de l'expérience) :

- **Température de l'air** : 21,0 °C ;
- **Humidité relative** : 45 %.

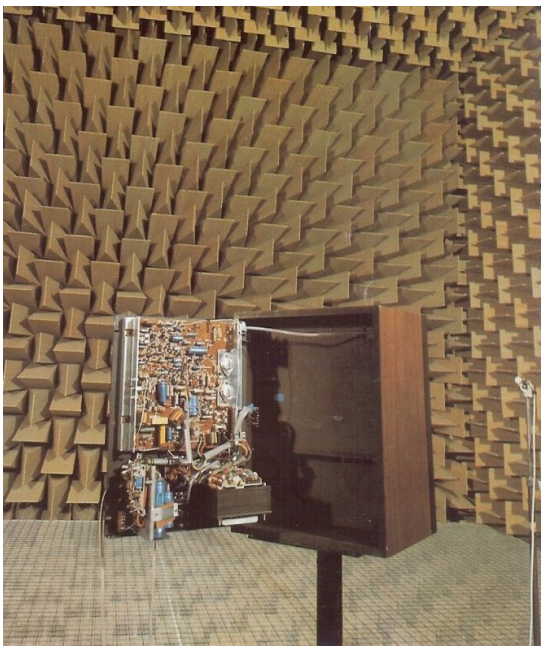


FIGURE 15 – 22RH532 en chambre anéchoïque Philips 1975

L'image illustre une session de mesure réalisée dans une chambre anéchoïque par Philips en 1975. Ces chambres, conçues pour absorber les réflexions sonores et simuler un espace ouvert infini, sont essentielles pour isoler les caractéristiques acoustiques d'une enceinte. Les mesures obtenues permettent d'analyser la réponse en fréquence, la distorsion harmonique, et d'autres paramètres clés, tout en minimisant les interférences extérieures.

FIGURE 16 – 22RH532 en chambre d'écho Philips 1975

Contrairement à la chambre anéchoïque, la chambre d'écho utilisée par Philips est conçue pour capturer les réflexions du son. Ici, le son émis par le haut-parleur est réfléchi contre tous les murs pendant environ 15 secondes avant d'être mesuré. Cette approche est idéale pour analyser la propagation et les réverbérations naturelles d'une pièce, offrant des informations complémentaires sur les performances des enceintes dans des environnements réels.

Attention

Cette mesure en chambre d'écho ne sera pas réalisée car aucun endroit s'y prête dans le cadre de ce projet.

5.2.1 Réponse en fréquence

La mesure de la réponse en fréquence vise à évaluer la capacité de l'enceinte à reproduire toutes les fréquences audibles de manière linéaire, sans accentuation ni atténuation.

Procédure

- Génération d'un balayage sinusoïdal entre 20 Hz et 20 kHz.
- Réitérer en retirant les caches de protection.

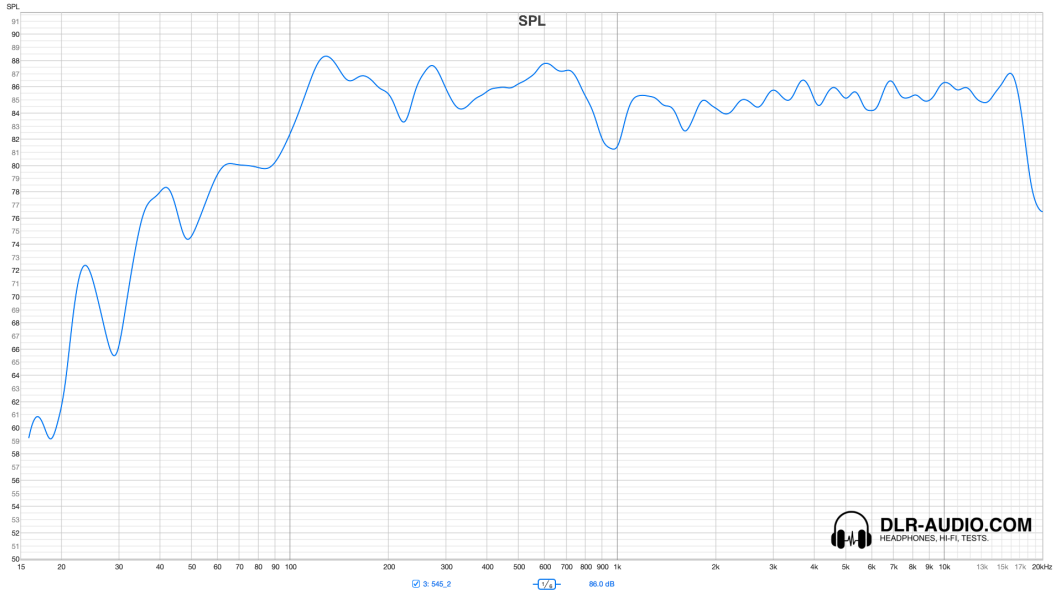


FIGURE 17 – Courbe de réponse globale sur 20Hz / 20 kHz

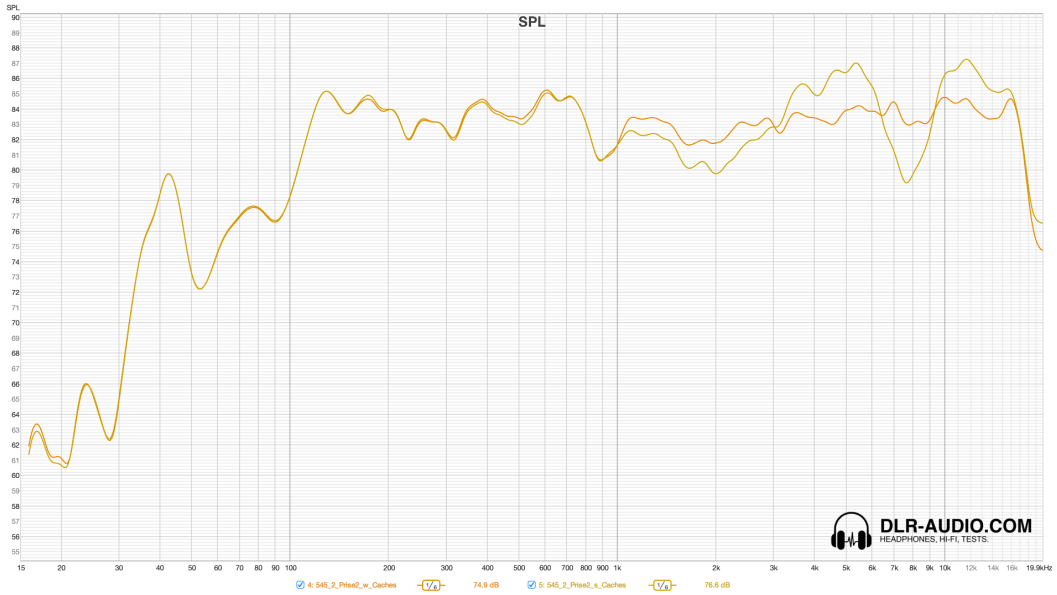


FIGURE 18 – Comparaison de la réponse en fréquence avec (orange) et sans (jaune) caches de protection

Analyse des résultats

- **SPL global** : la courbe présente une excellente linéarité, avec une variation contenue dans ±3 dB sur l'essentiel du spectre audible.
- **Effet des caches** : la présence des caches a tendance à lisser la réponse dans les haut-médiums, mais entraîne une légère décroissance au-dessus de 8 kHz. L'impact est est bien confirmé.
- **Conclusion** : l'enceinte délivre une restitution fidèle. L'impact des caches reste modéré mais perceptible, ce qui est d'ailleurs mentionné par un avertissement sur les caches eux-mêmes.

5.2.2 Distorsion harmonique à 1 mètre

La mesure de la distorsion harmonique vise à évaluer les harmoniques générées par l'enceinte en réponse à un signal sinusoïdal.

Procédure

- Génération d'un signal sinusoïdal balayé entre 20 Hz et 20 kHz.
- Niveau du signal réglé pour atteindre un volume d'environ 80 dB SPL à 1 mètre.

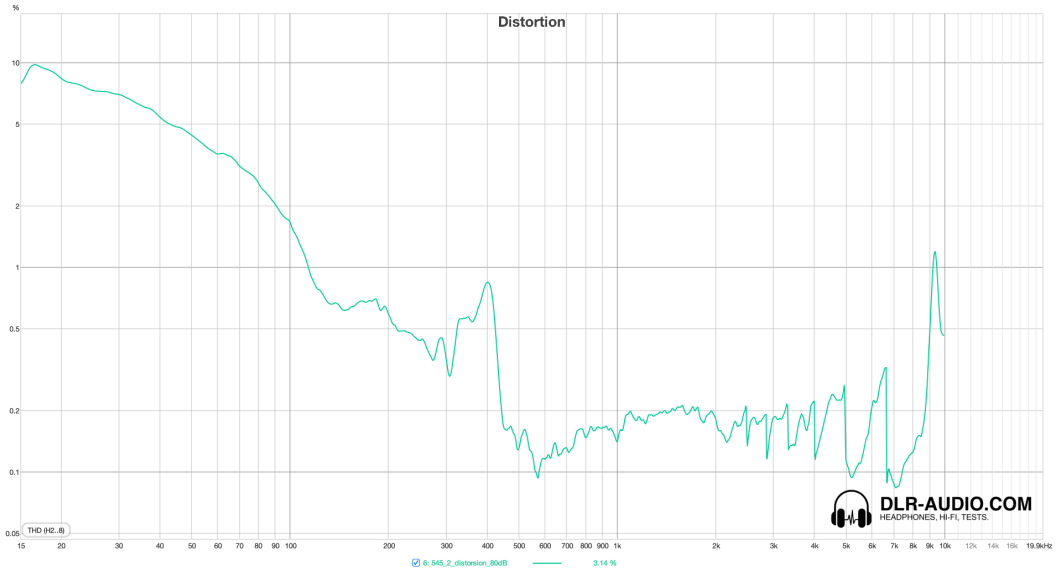


FIGURE 19 – Taux de distorsion harmonique totale (THD) à 80 dB SPL à 1 mètre

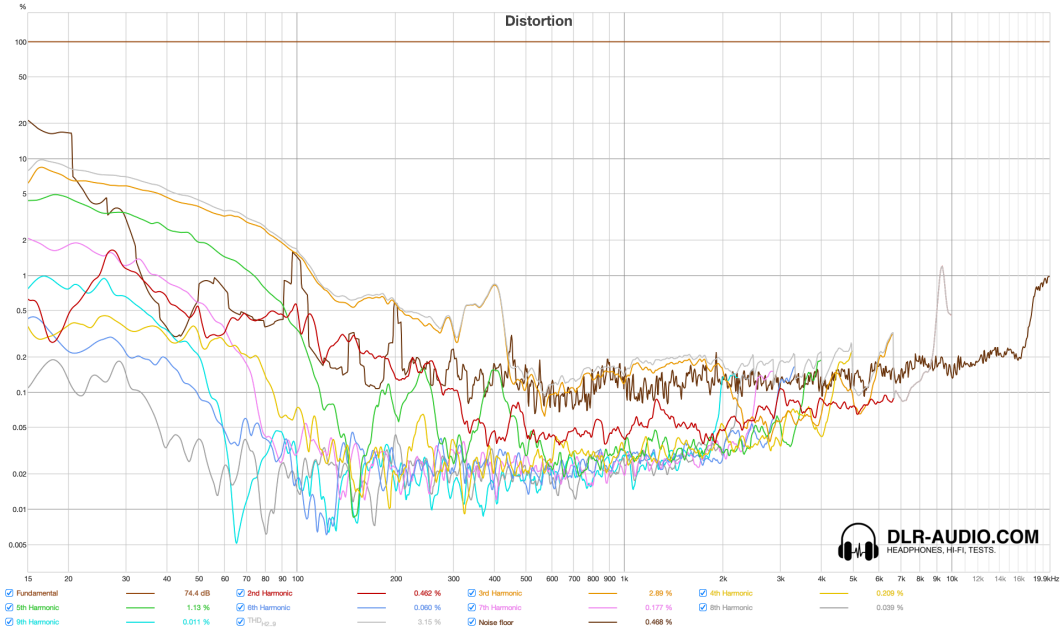


FIGURE 20 – Détail des harmoniques (THD+N)

Analyse des résultats

- **Distorsion globale** : à 80 dB SPL, la THD reste globalement en dessous de 1% entre 100 Hz et 20 kHz, le THD moyen entre 20 Hz et 100 Hz est de : 5,0 %, puis entre 100 Hz et 10 kHz est de 0,34%.
- **Régions critiques** : on note une élévation de la distorsion sous 80 Hz (charge du woofer), la rétro-action limite la distorsion au maximum à 10% à 20 Hz.
- **Analyse harmonique** : le graphique THD+N montre que les harmoniques dominantes sont H2 et H3, avec une H5 parfois marquée sous 300 Hz.

5.2.3 Réponse impulsionnelle

La mesure de la réponse impulsionnelle permet d'évaluer la capacité de l'enceinte à reproduire fidèlement les signaux transitoires, comme des impulsions brèves.

Données mesurées

- **Technique utilisée** : Sweep logarithmique (log sweep).
- **Paramètres observés** :
  - Déviation temporelle.
  - Résidus ou résonances indésirables.

Procédure

- Génération d'un signal sweep logarithmique entre 20 Hz et 20 kHz.
- Capture de la réponse impulsionnelle avec le logiciel ARTA.
- Analyse des données pour identifier les transitoires et les éventuelles résonances.
- Évaluation de la linéarité temporelle en utilisant les outils intégrés d'ARTA.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Visualisation de la réponse impulsionnelle en domaine temporel. IMAGE
  - Identification des résonances ou des anomalies transitoires.
  - Captures d'écran issues d'ARTA pour les analyses effectuées.

5.2.4 Réponse transitoire (Step Response)

La réponse transitoire permet d'évaluer la capacité de l'enceinte à reproduire fidèlement un signal d'échelon (step). Cette analyse est essentielle pour comprendre le comportement dynamique du système et la fidélité des transitoires, notamment dans les fréquences hautes.

Données mesurées

- **Type de signal** : Signal d'échelon (step signal).
- **Paramètres observés** :
  - Temps de montée.
  - Sur-oscillations éventuelles.
  - Réponse dynamique du système.

Procédure

- Configurer le logiciel de mesure pour générer un signal d'échelon (step).
- Appliquer le signal à l'enceinte et enregistrer la réponse transitoire à l'aide du logiciel ARTA.
- Analyser les caractéristiques temporelles telles que le temps de montée, la stabilité, et la présence d'artefacts.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Graphique de la réponse transitoire (step response) dans le domaine temporel. IMAGE
  - Identification des sur-oscillations et des éventuelles instabilités.
  - Captures d'écran du logiciel ARTA pour documenter la réponse.

5.2.5 Diagramme polaire de directivité

Le diagramme polaire de directivité permet de visualiser comment l'enceinte diffuse le son dans différentes directions.

Données mesurées

- **Angles mesurés** :
  - Directivité axiale : 0°, 30°, et 65°.
  - Mesure complète : 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 120°, 150°, et 180°.
- **Distance microphone-enceinte** : 1 mètre.
- **Type de signal** : Sweep sinusoïdal.

Procédure

- **Préparation** :
  - Installer l'enceinte et le microphone sur le plateau rotatif.
- **Mesures pour chaque angle** :
  - À 0° : Orienter l'enceinte directement vers le microphone, lancer le sweep, et enregistrer la réponse en fréquence.
  - À 30° : Faire pivoter l'enceinte de 15°, relancer le sweep, et enregistrer.
  - Répéter le processus jusqu'à 180°.

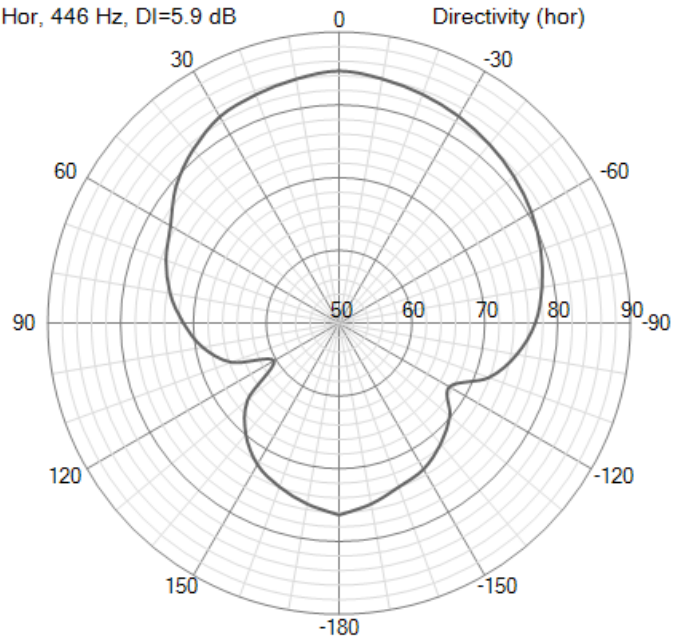


FIGURE 21 – Diagramme polaire de l'enceinte

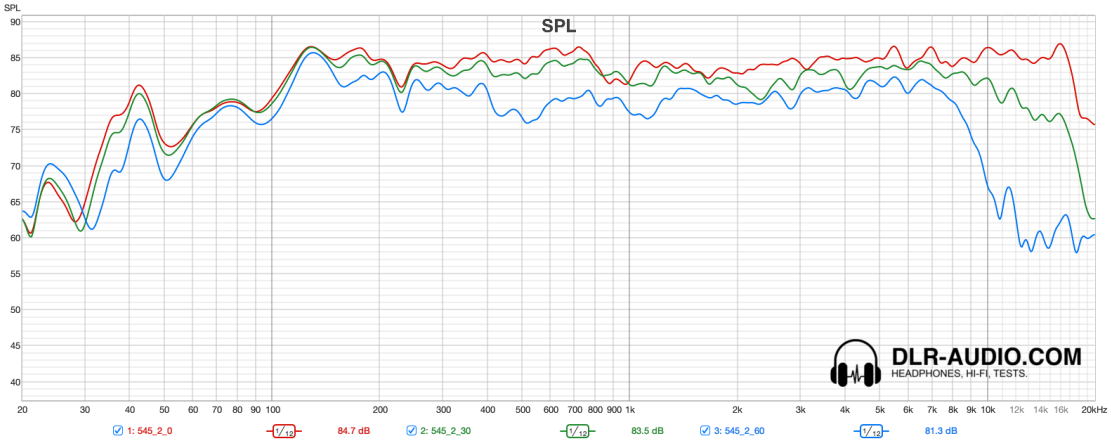


FIGURE 22 – Diagramme polaire de l'enceinte

Analyse des résultats

- Le diagramme de directivité horizontal affiché est une synthèse des réponses en fréquence mesurées entre 20Hz et 20kHz à différents angles, générée via VituixCAD.
- On observe une bonne stabilité de la directivité dans l'axe (0°), avec une dispersion contrôlée jusqu'à environ ±45°, au-delà de laquelle l'atténuation devient significative.
- Des irrégularités sont visibles autour de ±60°, avec un léger pincement du lobe principal. Cela peut être attribué à la géométrie spécifique de la Philips MFB 545, où le médium et le tweeter ne sont pas parfaitement alignés verticalement, ce qui génère une dispersion légèrement asymétrique hors axe.
- L'encoche secondaire entre -90° et -120° suggère des effets de diffraction liés à la structure de l'enceinte (arêtes du coffret).
- Globalement, le comportement de directivité reste homogène pour une enceinte à filtrage analogique, avec un bon compromis entre largeur de scène et focalisation du message sonore.

5.2.6 Réponse en phase

L'analyse de la réponse en phase permet de vérifier la cohérence temporelle du signal et la linéarité en fonction des fréquences.

Données mesurées

- **Paramètre mesuré** : Déviation de la phase en fonction des fréquences.
- **Plage de fréquence analysée** : 20 Hz à 20 kHz.
- **Type de signal** : Sweep sinusoïdal.

Procédure

- Configurer ARTA ou un logiciel équivalent pour effectuer une analyse de phase.
- Générer un sweep sinusoïdal dans la plage 20 Hz - 20 kHz.
- Capturer la courbe de réponse en phase via le logiciel.
- Vérifier les éventuelles anomalies ou déphasages importants aux fréquences de coupure des filtres.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Graphique de réponse en phase montrant la cohérence temporelle sur toute la bande passante. IMAGE
  - Captures d'écran des résultats obtenus avec ARTA.

5.2.7 Réponse transitoire sinusoïdale

La réponse transitoire sinusoïdale permet d'évaluer comment l'enceinte reproduit des signaux continus à des fréquences spécifiques, en se concentrant sur la linéarité et la dynamique.

Données mesurées

- **Type de signal** : Sinusoïdes continues.
- **Plage de fréquences mesurées** :
  - 200 µs (temps de montée équivalent).
  - 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 8150 Hz, 16000 Hz.
- **Niveaux de signal** : Sortie réglée à un niveau moyen pour éviter la saturation.

Procédure

- Configure le logiciel ARTA pour générer des sinusoïdes continues dans le menu "Signal Generator".
- Réglage manuel ou balayage progressif des fréquences souhaitées.
- Pour chaque fréquence :
  - **Génère la fréquence** : Démarrer, par exemple, à 63 Hz.
  - **Capture des données** : ARTA analysera la réponse captée par le microphone.
  - **Analyse du signal** : Enregistre la réponse obtenue et vérifie si le signal est reproduit fidèlement par l'enceinte.
- Compare la sortie à l'entrée pour identifier les déphasages ou résonances éventuelles.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Graphiques de la réponse transitoire pour chaque fréquence.
  - Mise en évidence des éventuelles distorsions, résonances ou anomalies.
  - Captures d'écran des résultats obtenus dans ARTA (à insérer ici).

5.2.8 Bruit de fond (Noise Floor) et Bruit de ronflement (Idle Humming Noise)

La mesure du bruit de fond et du bruit de ronflement permet d'évaluer les défauts potentiels de l'enceinte liés au bruit résiduel et aux parasites.

Données mesurées

- **Type de bruit mesuré** :
  - Bruit de fond (noise floor).
  - Bruit de ronflement (idle humming noise).
- **Conditions de mesure** :
  - Pas de signal en entrée.
  - Niveau de volume réglé à une position normale d'écoute.

Procédure

- Configure ARTA ou un logiciel similaire pour capturer le spectre du bruit résiduel.
- Mesure le bruit sur toute la bande passante, typiquement de 20 Hz à 20 kHz.
- Identifier les fréquences spécifiques des ronflements ou des parasites (par exemple, 50/60 Hz et leurs harmoniques).

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Amplitude du bruit de fond (en dB SPL).
  - Identification des fréquences dominantes liées au ronflement.
  - Captures d'écran des spectres obtenus (à insérer ici).

5.2.9 Niveau de pression sonore (SPL)

La mesure du niveau de pression sonore (SPL) permet de vérifier le rendement de l'enceinte à 1 mètre en utilisant un bruit rose. Cette mesure est essentielle pour évaluer les capacités acoustiques et le niveau maximal atteignable par le système.

Données mesurées

- **Type de signal** : Bruit rose.
- **Distance de mesure** : 1 mètre.
- **Rendement cible** : 108 dB SPL pour 1 Watt (à confirmer).

Procédure

- Vérifier en sortie d'ampli qu'1W de puissance est délivré.
- Configure le générateur de bruit rose dans ARTA.
- Activer le bruit rose et enregistre le niveau SPL mesuré.
- Vérifier si le niveau atteint correspond au rendement annoncé (ici, 108 dB SPL pour 1 Watt).

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Niveau SPL mesuré à 1 mètre.
  - Écart par rapport au rendement attendu (en dB).
  - Captures d'écran des résultats obtenus dans ARTA ou autre logiciel (à insérer ici).

5.2.10 Waterfall plot (CSD)

Le Waterfall Plot, ou diagramme de dissipation spectrale cumulative (CSD), est une mesure essentielle pour visualiser les résonances temporelles d'une enceinte. Il permet d'identifier les fréquences problématiques qui continuent à vibrer après l'arrêt du signal, fournissant ainsi des informations sur le contrôle des transitoires et les performances globales.

Données mesurées

- **Type de mesure** : CSD (Cumulative Spectral Decay).
- **Conditions** : En chambre anéchoïque, microphone placé à 1 mètre de l'enceinte.
- **Fréquence balayée** : 20 Hz - 20 kHz.

Procédure

- Connecter l'enceinte au générateur de signaux via l'amplificateur.
- Configurer le logiciel en mode Waterfall/CSD.
- Lancer un balayage sinusoïdal sur la plage de fréquences définie (20 Hz - 20 kHz).
- Enregistrer les données capturées par le microphone.
- Analyser les résonances et les décroissances dans le diagramme généré.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Fréquences avec des résonances marquées identifiées.
  - Temps de décroissance pour chaque bande de fréquence.
  - Captures d'écran du Waterfall Plot généré (à insérer ici).

5.3 Mesures électroniques

FIGURE 23 – Technicien effectuant les réglages Philips 1975

Les mesures électroniques permettent d'évaluer les performances intrinsèques des amplificateurs intégrés à l'enceinte. Ces tests sont essentiels pour :

- Valider leur **linéarité** sur l'ensemble de la bande passante ;
- Vérifier leur **capacité à reproduire fidèlement le signal** ;
- Tester leur **stabilité** face à des charges complexes.

En complément des mesures acoustiques, elles offrent une vision globale des performances du système, du traitement électronique jusqu'à la reproduction sonore.

Documenter pour préserver l'héritage technique

Ces mesures permettent également de créer une documentation technique précieuse, mettant en lumière les choix d'ingénierie effectués par Philips pour concevoir des amplificateurs de cette génération. Elles offrent une base de comparaison avec les standards modernes.

5.3.1 Réponse en fréquence des amplificateurs

La mesure de la réponse en fréquence des amplificateurs est essentielle pour vérifier leur linéarité et leur capacité à reproduire le signal de manière fidèle sur toute la plage de fréquences.

Données mesurées

- **Type de mesure** : Réponse en fréquence.
- **Bande passante mesurée** : 20 Hz - 20 kHz.
- **Paramètres évalués** :
  - Linéarité de la bande passante.
  - Points de coupure haute et basse fréquence.
  - Performance des filtres actifs intégrés.

Procédure

- Connecter l'amplificateur à une charge résistive simulant une enceinte (dummy load).
- Lancer une mesure avec REW en mode Sine Sweep.
- Capturer le signal de sortie à l'aide de la carte son.
- Identifier les éventuelles irrégularités ou atténuations dans la bande passante.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Bande passante mesurée et visualisée sur un graphe.
  - Analyse des points de coupure haute et basse fréquence.
  - Détection de toute atténuation ou résonance anormale.
  - Captures d'écran des graphiques ARTA ou équivalents (à insérer ici).

5.3.2 Puissance, linéarité et distorsion harmonique (THD)

Cette section regroupe les mesures de puissance, de linéarité et de distorsion harmonique totale (*Total Harmonic Distortion*), permettant une évaluation complète des performances des amplificateurs. Ces tests analysent la capacité de l'amplificateur à fournir une puissance stable et fidèle tout en maintenant un faible niveau de distorsion.

Données mesurées

- **Puissance maximale mesurée** : En watts RMS.
- **Linéarité** : Analyse de la fidélité du signal amplifié par rapport au signal d'entrée.
- **Distorsion harmonique totale (THD)** :
  - Niveaux de puissance évalués : 1 W, 10 W, et puissance maximale.
  - Harmoniques analysées : H2, H3, H5.

Procédure

- Configurer l'amplificateur avec une charge résistive simulant une enceinte (dummy load).
- Utiliser un générateur de signaux pour injecter un signal sinusoïdal.
- Faire varier le niveau d'entrée pour atteindre différentes puissances de sortie.
- Mesurer :
  - La puissance en watts RMS.
  - Le THD à chaque niveau de puissance (à l'aide d'une carte son et d'un logiciel comme ARTA).
- Analyser les harmoniques générées par l'amplificateur.
- Capturer les données pour comparer les niveaux des harmoniques par rapport au signal fondamental.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Puissance maximale atteinte avant distorsion significative (*ex. : 1% THD*).
  - Visualisation des niveaux de distorsion à chaque puissance (graphiques THD).
  - Détection d'éventuelles irrégularités à différents niveaux de puissance.
  - Captures d'écran ou graphiques des mesures obtenues (ARTA ou autre logiciel).
- **Observations** :
  - Déviations observées à forte puissance.
  - Impact potentiel sur la qualité sonore perçue.

5.3.3 Réponse transitoire des amplificateurs

La mesure de la réponse transitoire permet d'évaluer la capacité des amplificateurs à reproduire rapidement et fidèlement des signaux à forte dynamique, garantissant ainsi une reproduction sonore précise et stable.

Données mesurées

- **Paramètres mesurés** :
  - Rapidité de montée (*slew rate*).
  - Stabilité de la réponse pour des signaux transitoires.
- **Type de signaux utilisés** : Signaux carrés et impulsions.

Procédure

- Connecter l'amplificateur à une charge résistive (dummy load).
- Générer un signal carré ou une impulsion à différentes fréquences (par exemple, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz).
- Mesurer la réponse de l'amplificateur avec une carte son ou un oscilloscope.
- Observer les caractéristiques suivantes :
  - La rapidité de montée (*slew rate*).
  - Les oscillations ou instabilités éventuelles.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Courbes de réponse observées pour chaque signal généré.
  - Analyse des caractéristiques transitoires, y compris la rapidité de montée et les éventuelles instabilités.
  - Captures d'écran ou graphiques des résultats obtenus avec ARTA ou un oscilloscope (à insérer ici).

5.3.4 Rapport signal/bruit (SNR)

La mesure du rapport signal/bruit (SNR) permet d'évaluer la capacité des amplificateurs à reproduire un signal propre et fidèle en minimisant les bruits parasites. C'est une mesure essentielle pour garantir une bonne performance sonore, particulièrement dans des environnements exigeants.

Données mesurées

- **Paramètres mesurés** :
  - Niveau du signal utile.
  - Niveau du bruit résiduel.
- **Conditions de mesure** :
  - Entrée sans signal (mesure du bruit de fond).
  - Signal d'entrée calibré pour générer 1 W en sortie.

Procédure

- Connecter l'amplificateur à une charge résistive (dummy load).
- Configurer ARTA pour mesurer le niveau du bruit résiduel avec une entrée sans signal.
- Injecter un signal sinusoïdal calibré (par exemple, 1 kHz) pour générer 1 W en sortie.
- Comparer le niveau du signal utile au niveau du bruit résiduel pour calculer le SNR.

Résultats

- **Résultats préliminaires** :
  - Niveau du bruit mesuré (en dB).
  - Rapport signal/bruit calculé (en dB).
  - Captures d'écran ou graphiques des résultats obtenus avec ARTA (à insérer ici).
- **Observations** :
  - Présence éventuelle de bruits parasites spécifiques (ronflement, bruit blanc, etc.).
  - Impact des composants électroniques sur le SNR.

5.3.5 Bruit résiduel

L'analyse du bruit résiduel permet de détecter les bruits de fond et les bruits parasites générés par les amplificateurs lorsqu'aucun signal n'est appliqué. Cette mesure est essentielle pour évaluer la qualité de l'électronique et identifier d'éventuelles interférences indésirables.

Données mesurées

- **Paramètres mesurés** :
  - Niveau du bruit de fond (en dB).
  - Identification des bruits parasites (ronflement, interférences, etc.).
- **Conditions de mesure** :
  - Amplificateur sans signal d'entrée.
  - Charge résistive connectée à la sortie.

Procédure

- Connecter l'amplificateur à une charge résistive (dummy load).
- Configurer ARTA ou un analyseur de spectre pour mesurer le niveau de bruit résiduel.
- Effectuer une analyse spectrale pour identifier les fréquences dominantes dans le bruit.
- Noter les niveaux mesurés et observer les caractéristiques du bruit (pic à 50 Hz, bruit blanc, etc.).

Résultats

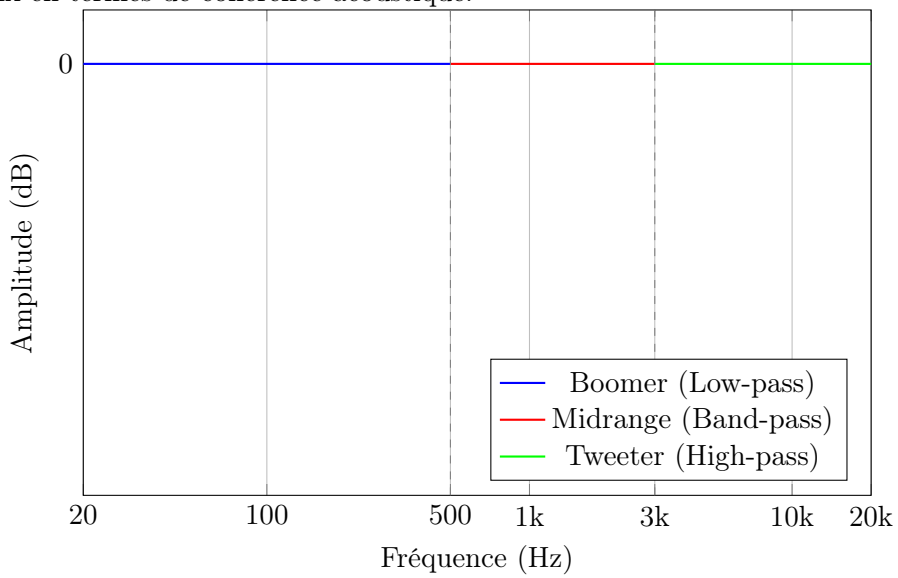
- **Résultats préliminaires** :
  - Niveau global du bruit de fond (en dB).
  - Analyse des fréquences dominantes dans le bruit (ronflement, bruit blanc, etc.).
  - Captures d'écran ou graphiques des résultats obtenus avec ARTA ou un autre outil.
- **Observations** :
  - Identification des bruits parasites (exemple : bruit à 50 Hz dû au secteur).
  - Impact potentiel sur la qualité sonore perçue.

6 Analyse et compréhension technique

6.1 Analyse des filtres

6.1.1 Filtres crossovers

— Décomposition du filtre crossover de l'enceinte, qu'il soit actif ou passif.
— Explication du type de filtre utilisé (ex. : Butterworth, Linkwitz-Riley) et justification de ce choix en termes de cohérence acoustique.



— **Group Delay** : Examiner le retard de groupe introduit par les filtres et son impact sur la cohérence temporelle du signal audio.

6.1.2 Simulation électronique

— Utilisation de logiciels comme LTspice pour modéliser et simuler le filtre crossover.
— Analyse de la réponse en fréquence, de la distorsion harmonique, et de la stabilité des filtres utilisés.

Similutation des amplis et des filtres dans LTspice

Comparaison avec les dernières révisions et les choix appliqués (voir différence au niveua de la contre reaction)

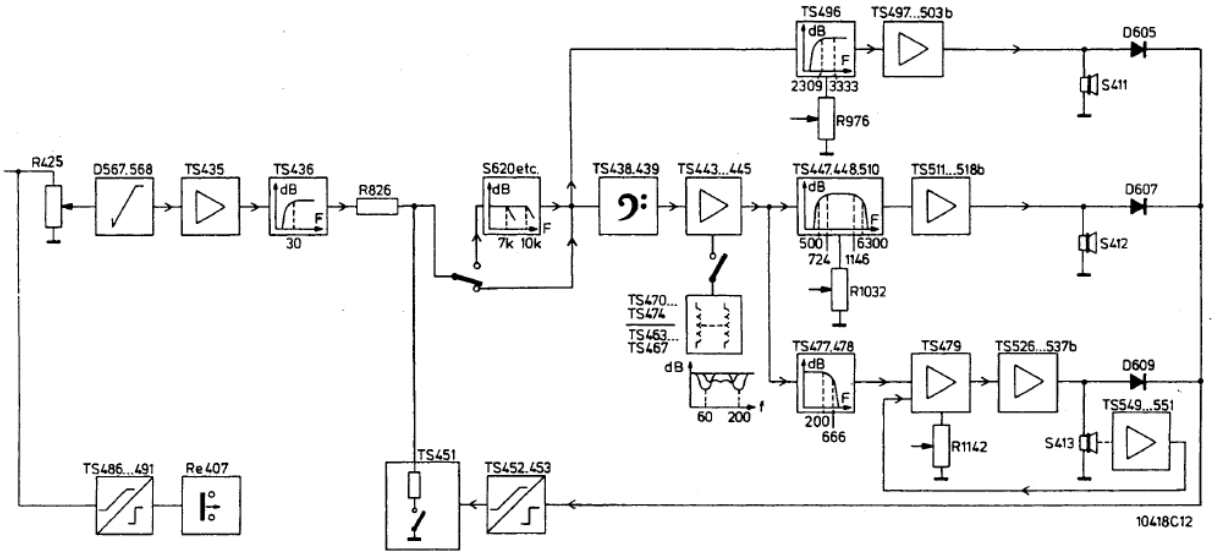


FIGURE 24 – Enter Caption

6.2 Analyse électronique des amplificateurs intégrés

6.2.1 Schéma bloc de l'amplificateur

— Analyse détaillée du schéma électronique de l'amplificateur, incluant les étages de préamplification, l'amplification de puissance, et les circuits de protection.

Points clés de la configuration :

— Utilisation d'un atténuateur à trois positions pour ajuster le niveau du signal entrant dans la carte son (cf. section dédiée à l'atténuateur).
— Vérification de la linéarité de chaque amplificateur en mesurant le THD et la réponse en fréquence.
— Simulation d'une charge réelle avec une résistance de précision et un bon facteur de dissipation thermique.

6.2.2 Classes d'amplification

— Étude des différentes classes d'amplificateurs disponibles (AB, D).
— Analyse des avantages et inconvénients de chaque classe en termes de distorsion harmonique, de rendement énergétique, et de réponse dynamique.

6.2.3 Alimentation

— Comparaison entre alimentation linéaire et à découpage, et analyse de leur impact sur la qualité sonore de l'amplificateur intégré.

6.2.4 Rétroaction de vibration (Motional Feedback)

— Analyse approfondie de la boucle de rétroaction MFB et de ses bénéfices en termes de réduction de la distorsion.
— Étude du fonctionnement du capteur de vibration et des mécanismes de compensation des mouvements du woofer.

6.2.5 Les modifications apportées sur les différentes révisions PL01-PL06

— Analyse des différentes modifications apportées sur les schémas

7 Résultats attendus et représentation des données

7.1 Graphiques et modélisation

7.1.1 Modélisation de la réponse théorique

Réalisation d'une simulation théorique des haut-parleurs pour évaluer la réponse attendue.

7.1.2 Choix des haut-parleurs

— Expliquer le choix des haut-parleurs en fonction des caractéristiques requises.
— Dessiner la réponse théorique avec les fréquences de coupure pour illustrer la performance attendue.
— Explication du choix du placement des HP sur le plan de l'enceinte et correler ça avec le diag polaire (calculs ?)

Comparaison AD0162/T8 et AD0163 et explication des différences de technologies expliquer pourquoi en fin de série ils ont changé

Table 2 – Caractéristiques du haut-parleur AD0162/T8

Caractéristiques AD0162/T8	**T8**
Impédance nominale (Ω)	8
Résistance de la bobine (Ω)	6,3
Fréquence de résonance (Hz)	1000
Capacité de puissance avec filtre (non monté)	
À 2000 Hz	8 μF, 0,5 mH : 20/4 W
À 4000 Hz	3,2 μF, 0,35 mH : 20/4 W
Puissance de fonctionnement (W)	2
Poids (kg)	0,5

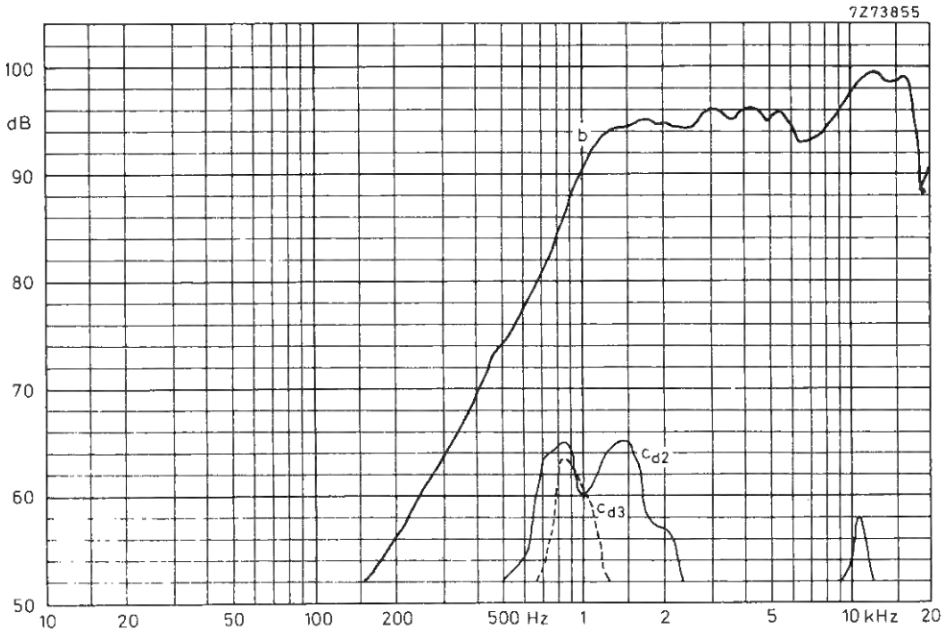


Figure 25 – FFT AD0162/T8 - Philips 1976

On remarque....
—

Table 3 – Caractéristiques techniques du haut-parleur T8

Caractéristiques	**T8**
Impédance nominale (Ω)	8
Résistance de la bobine (Ω)	6,3
Gamme de fréquence nominale (Hz)	2000 - 22000
Fréquence de résonance (Hz)	1300
Capacité de puissance avec filtre (non monté)	
À 2000 Hz	8 μF, 0,5 mH : 20/4 W
À 4000 Hz	3,2 μF, 0,35 mH : 20/4 W
Puissance de fonctionnement (W)	2
Masse du haut-parleur (kg)	0,5

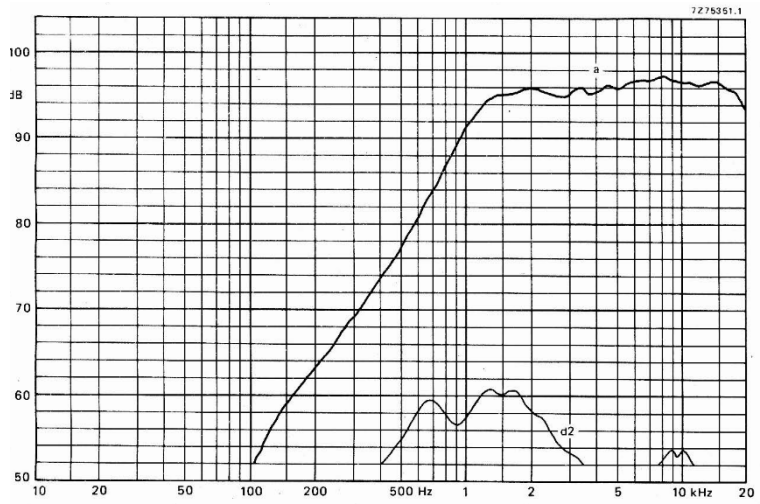


Figure 26 – FFT AD0163/T8 - Philips 1978

Source : building hifi speaker system
Comparaison AD0210 et AD0211

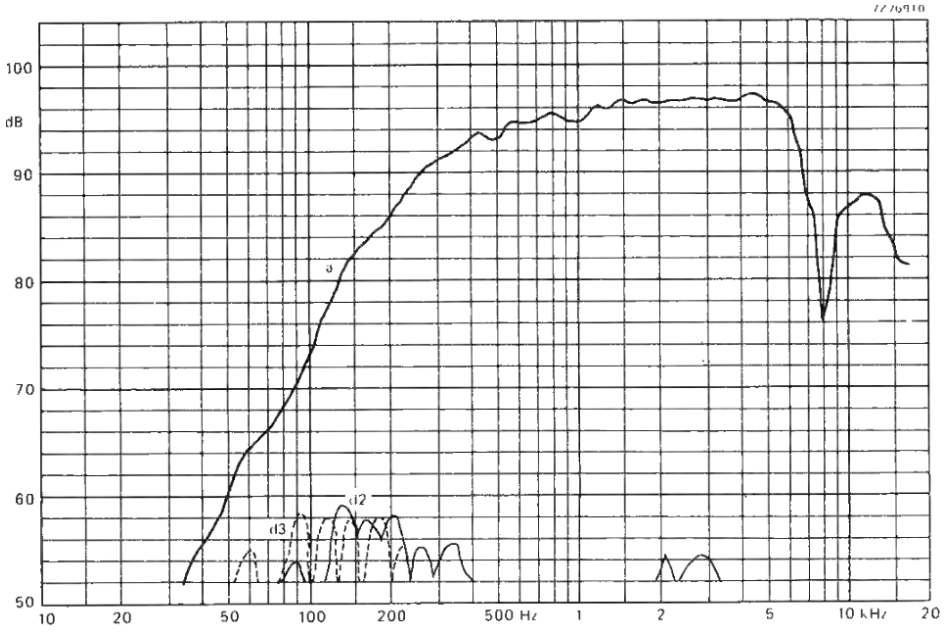


FIGURE 27 – FFT AD0211/SQ8 - Philips 1978

TABLE 4 – Caractéristiques du haut-parleur AD0211/SQ8

Caractéristiques	**Sq8**
Impédance nominale (Ω)	8
Résistance de la bobine (Ω)	6,6
Fréquence de résonance (Hz)	370 et 270 pour AD0210
Capacité de puissance avec filtre (non monté)	
50 μF, 1,6 mH	60 W
24 μF, 3,2 mH	60 W
Puissance de fonctionnement (W)	5
Poids (kg)	1

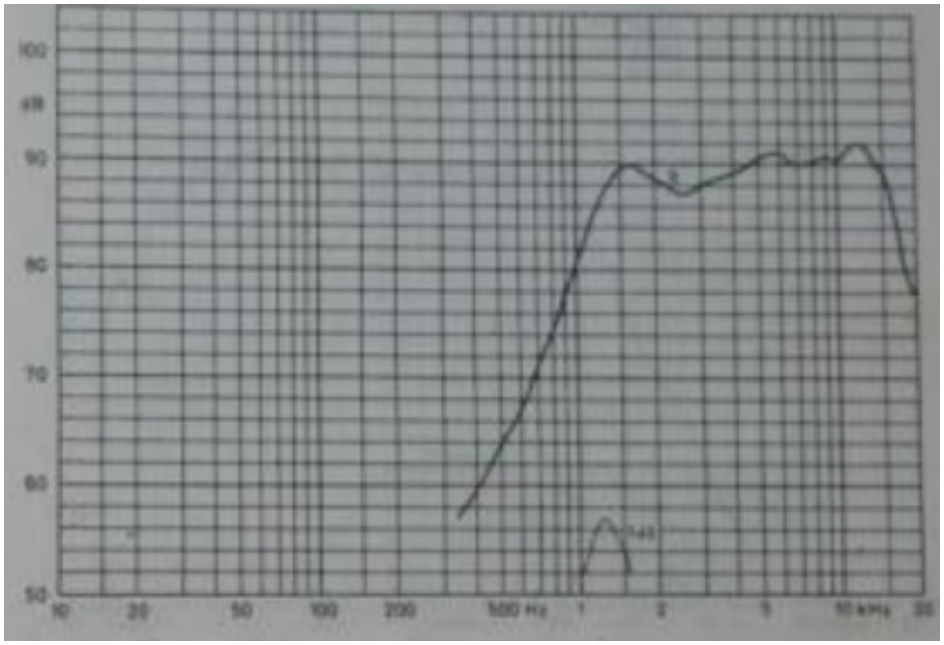


Figure 28 – FFT AD0210/SQ8 - Philips 1976

https ://audiokarma.org/forums/index.php ?attachments/c-jpg.275897/ Source : building hifi speaker system

7.1.3 Présentation des graphiques

— Afficher les résultats obtenus sous forme de graphiques.
— Normaliser les résultats selon les normes en vigueur pour garantir une comparaison objective.

7.1.4 Comparaison historique

— Comparer les résultats obtenus avec les spécifications et les publicités de l'époque pour évaluer la cohérence entre les annonces marketing et les performances réelles.

7.1.5 Comparaison avec des concurrents

— Comparer les performances mesurées avec des enceintes de référence de l'époque, telles que la **Cabasse VTA Galion 3**, pour situer l'enceinte Philips MFB 545 dans le contexte du marché concurrentiel.

7.2 Paramètres de qualité

7.2.1 Tolérance sur la réponse en fréquence

— Définir des critères de qualité tels que la tolérance de ±3 dB sur la courbe de réponse afin de garantir une restitution fidèle des différentes fréquences.

7.2.2 Qualité des transitoires

— Évaluer la capacité de l'enceinte à restituer des signaux impulsionnels, indicateurs importants de la qualité de la réponse transitoire.

7.3 Sources d'erreur et limitations

7.3.1 Sources potentielles de biais

— Identifier les sources potentielles de biais telles que les réflexions parasites, les erreurs de calibration des appareils de mesure, et les interférences électromagnétiques.

7.3.2 Procédures de minimisation des biais

— Décrire les techniques mises en œuvre pour minimiser l'impact des erreurs potentielles, comme l'utilisation de chambres anéchoïques, la calibration régulière des instruments, et le filtrage des interférences.

8 Conclusion et critique

8.1 Critique des résultats

— Analyse critique des résultats obtenus par rapport aux attentes modernes.
— Identifier les limitations observées lors des mesures. Quelles améliorations seraient possibles avec l'utilisation des technologies actuelles (ex. : composants électroniques plus performants, algorithmes de correction numérique) ?

8.2 Comparaison avec les objectifs modernes

— Évaluation de la performance de l'enceinte Philips MFB 545 par rapport aux standards actuels des enceintes Hi-Fi.
— Comparaison en termes de qualité sonore, fidélité, réponse dynamique : En quoi l'enceinte se distingue-t-elle ou reste-t-elle en deçà des enceintes modernes ?

8.3 Perspectives

— Optimisations possibles du circuit électronique ou des composants de l'enceinte pour améliorer les performances.
— Analyse des améliorations potentielles en matière de matériaux des haut-parleurs (membranes, bobines, suspensions) ou de traitement acoustique du boîtier (meilleure isolation, contrôle des résonances).

9 Annexe Technique

Indiquer toutes les données techniques de l'enceinte et des haut-parleurs, y compris :

— Réponse en fréquence, distorsion maximale, puissance nominale, et caractéristiques des amplificateurs intégrés.

Références

1. HARDEN, Ingo ; BREH, Karl. *HiFi-Stereophonie : Vergleichstest der Spitzenlautsprecher, inklusive Philips RH 545 MFB* [https://mfbfreaks.com/22rh545-hifi-stereophonie-1978/]. 1978. [Accessed : 20-11-2024].
2. MAGAZINES, Inner. *Philips RH 545 Studio* [https://www.inner-magazines.com/audiophilia/philips-rh-545-studio/]. [s. d.]. [Accessed 15-11-2024].
3. ARCHIV, HiFi. *Philips 545 MFB Prospekt* [https://www.hifi-archiv.info/Philips/545-MFB-Prospekt-1/]. [s. d.]. [Accessed 15-11-2024].
4. JACOBSE, Bram. *Philips Technical Review* [https://www.bramjacobse.nl/wordpress/wp-content/uploads/2023/01/PTechReview-29-1968-148.pdf]. [s. d.]. [Accessed 15-11-2024].
5. THOMANN. *Behringer ECM8000* [https://www.thomann.de/fr/behringer_ecm_8000.htm]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
6. THOMANN. *Focusrite Scarlett 2i2 3rd Gen* [https://www.thomann.de/fr/focusrite_scarlett_2i2_3rd_gen.htm]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
7. MATELJAN, Ivo. *ARTA Software Website* [https://artalabs.hr/]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
8. MULCAHY, John. *Room EQ Wizard (REW) Website* [https://www.roomeqwizard.com/]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
9. ANALOG DEVICES, Inc. *LTspice Software Website* [https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
10. THOMANN. *Digital Sound 8930B Calibrator* [https://www.thomann.de/fr/digital_sound_8930b.htm]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
11. PÉTOIN, Dominique. *Matériel de Mesure pour l'Acoustique* [https://www.petoindominique.fr/php/mesurematos.php]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
12. PÉTOIN, Dominique. *Méthodologie de Mesure Acoustique* [https://www.petoindominique.fr/php/mesurer.php]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].
13. ALKASAR. *ARTA Guide Calibration* [http://alkasar.online.fr/docs/ARTA%20Guide%20Calibration.pdf]. 2024. [Accessed : 20-11-2024].