PROJET AMPLIFIL MKII

Amplificateur audio stéréo de haute qualité.

Réalisation et qualification d'une maquette.

Rapport d'expérience.

V1.06 – 2021-05

SOMMAIRE

Avertissement :
Pour se rendre directement au chapitre (ou sous-chapitre) souhaité, il suffit de cliquer (touche CTRL + Clic droit) sur la ligne du sommaire concernant le sujet sélectionné.

I – AVANT-PROPOS 4

II – OBJECTIFS ET PRINCIPES ADOPTÉS 4

III – MONTAGE MECANIQUE 5

III.1 – FABRICATION DU CHÂSSIS 5
III.2 – FABRICATION DES PIEDS 6

IV – CÂBLAGE 7

IV.1 – ORGANISATION GÉNÉRALE 7
IV.2 – CÂBLAGE DU CHÂSSIS 7
IV.3 – CÂBLAGE DES MODULES D'ALIMENTATION 9
IV.3.1 – Alimentation Haute Tension 9
IV.3.2 – Alimentation Basse Tension 10
IV.4 – CÂBLAGE DES MODULES DE L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE 10
IV.4.1 – Amplificateur de puissance, canal droit 10
IV.4.2 – Amplificateur de puissance, canal gauche 11
IV.5 – CONTRÔLE GÉNÉRAL DU CÂBLAGE 12

V – CONTRÔLE FONCTIONNEL 13

VI – MESURES ET QUALIFICATION ÉLECTRONIQUES 15

VI.1 – ÉQUIPEMENTS DE MESURE 15
VI.2 – CONDITIONS DE MESURE 15
VI.3 – CONTRÔLE DES TENSIONS 15
VI.4 – MESURES AF 16
VI.4.1 – Puissance de sortie 17
VI.4.2 – Gain 17
VI.4.3 – Sensibilité 17
VI.4.4 – Courbe de réponse sinusoïdale 17
VI.4.5 – Courbe de réponse bruit coloré 18
VI.4.6 – Comportement en mode transitoire 19
VI.4.7 – Distorsions par harmoniques (THD) 20
VI.4.8 – Distorsions par intermodulation dynamique (DIM ou IMD) 24
VI.4.9 – Retard de groupe 25
VI.4.10 – Phase 25
VI.4.11 – Rapport signal/bruit 26

VII – QUALIFICATION DES OPTIONS 28

VII.1 – CONDITIONS DE MESURE 28
VII.2 – MODULE PRÉAMPLIFICATEUR STÉRÉOPHONIQUE PHONO RIAA 28
VII.2.1 – Gain 29
VII.2.2 – Sensibilité d'entrée / niveau de sortie 29
VII.2.3 – Rapport Signal / Bruit 29
VII.2.4 – Courbe de réponse 30
VII.2.5 – Distorsions par harmoniques (THD) 30
VII.2.6 – Diaphonie 31

VII.3 – MODULE CORRECTEUR DE TONALITÉ STÉRÉOPHONIQUE 31
VII.3.1 – Présentation *32*
VII.3.2 – Gain *32*
VII.3.3 – Niveau de sortie / sensibilité totale *32*
VII.3.4 – Caractéristiques du réglage de la balance *33*
VII.3.5 – Rapport Signal / Bruit *34*
VII.3.6 – Courbe de réponse sinusoïdale *34*
VII.3.7 – Efficacité des corrections *35*
VII.3.8 – Phase *36*
VII.3.9 – Diaphonie *36*
VII.3.10 – Distorsion par harmoniques (THD) *37*
VII.3.11 – Distorsions par intermodulation dynamique (DIM ou IMD) *37*
VII.4 – MODULE RECEPTEUR BLUETOOTH 38

ANNEXE 1 – ÉTUDE D'UN RÉSEAU OPTIMISÉ DU CÂBLAGE DES MASSES 39

ANNEXE 2 – AUTRES DOCUMENTATIONS ET INFORMATIONS 42

I – AVANT-PROPOS

Le projet Amplifil MKII est une initiative du club Radiofil, au sein duquel une équipe de quatre personnes a décidé d'étudier un amplificateur hifi de haute qualité, à tubes, en réfléchissant autour de concepts modernes que permettent certains composants solides et de faibles coûts.
L'utilisation de technologies récentes permet un contrôle total du fonctionnement des tubes en garantissant un très grand respect de la qualité sonore et une durée allongée de la vie de ces tubes.
Cet amplificateur original donnera toute satisfaction à l'amateur qui suivra méthodiquement les conseils qui ne manqueront pas d'être énoncés dans les futures notices de câblage et de mise en service.
Les quatre membres de l'équipe se sont donné aussi un objectif clair : tout amateur, même peu ou pas électronicien, doit pouvoir mener ce projet à terme avec succès, à l'aide d'outils de base, dont un bon fer à souder et un simple multimètre.
Ensuite, chacun pourra profiter fièrement de la réalisation personnelle de cet amplificateur qui n'a rien a envier à certains de ses ainés aux noms prestigieux…

ATTENTION : ce document n'est pas une notice de fabrication !
Nous éditerons une notice de câblage une fois les divers prototypes validés et lorsque nous aurons réalisé un équipement exactement représentatif de la série.
Pour prendre connaissance des principes de fonctionnement de chaque sous-ensemble de ce projet ainsi que des schémas électroniques et nomenclatures des composants des modules conçus par l'équipe, le lecteur se reportera aux différentes éditions de *Radiofil magazine*, à partir des numéros 100 (septembre/octobre 2020) et suivants.

Vous ne connaissez pas encore l'association **Radiofil** ? Cliquez **ICI** pour en savoir plus.

II – OBJECTIFS ET PRINCIPES ADOPTÉS

Ce document est consacré à la réalisation d'une plateforme matérielle permettant de qualifier l'amplificateur sur les trois aspects suivants :

- Caractéristiques électriques : sensibilité des entrées, puissance de sortie nominale, puissance consommée, etc.
- Performances mesurées : puissance, distorsions, courbe de réponse, rapport signal/bruit, réponse en transitoire, etc.
- Caractéristiques sonores : écoute en auditorium, par comparaison avec des systèmes connus et/ou de référence (ce dernier point sera traité au sein d'une annexe à ce document, lorsque les tests seront terminés et validés).

Cette qualification s'effectue avec les composants de base suivants :

- Un transformateur d'alimentation de série Radiofil type TA-150VA.
- Un module d'alimentation HT *Radiofil* prototype.
- Un module d'alimentation BT Radiofil prototype.
- Un module d'amplification de puissance *Radiofil* prototype câblé sur circuit imprimé, pour la voie gauche.
- Un module d'amplification de puissance *Radiofil* prototype câblé sur barrettes relais, pour la voie droite.
- Deux transformateurs de sortie de série *Radiofil* R-TU101.
- Un module *Audiophonics* « Préampli phono RIAA » pour cellule MM, à base du CI NE5532.
- Un module *Mr Chon* « Préampli correcteur de tonalité » à base du CI OPA2604.

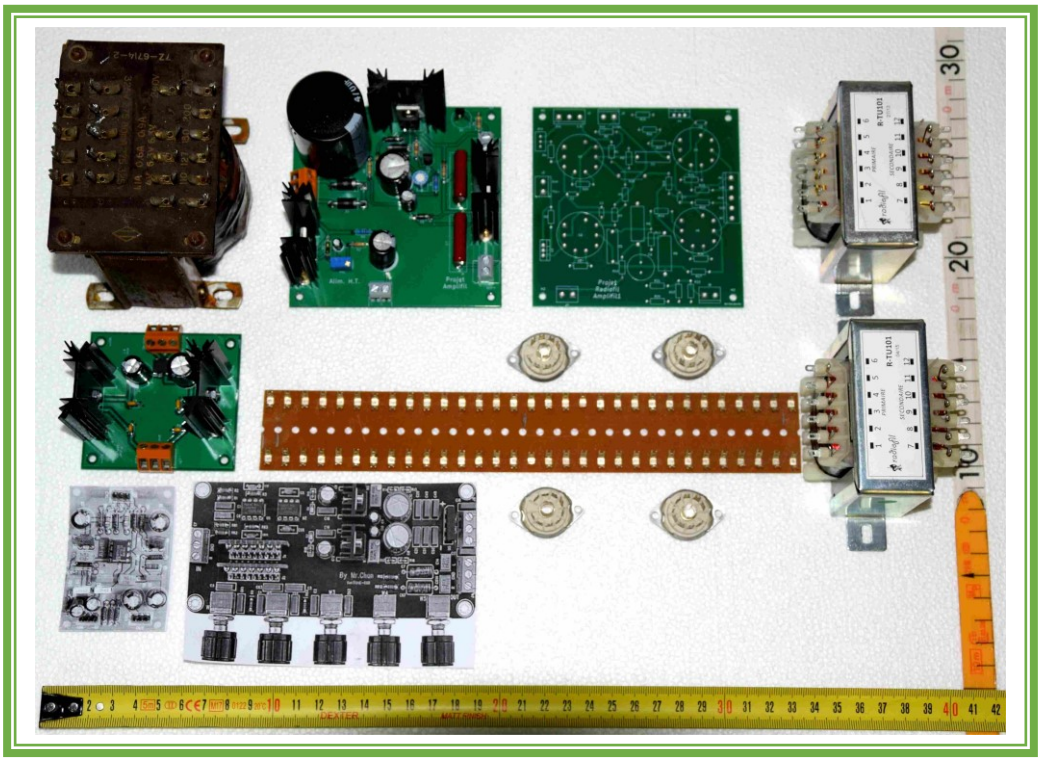
Nota : nous étudions la possibilité d'implémenter un module Bluetooth permettant de diffuser des fichiers audio à partir d'un Smartphone. Lorsque nous l'aurons identifié cette documentation sera mise à jour en conséquence.

Un filtre secteur est monté en amont de l'alimentation afin d'éviter les perturbations des signaux CPL.

III – MONTAGE MECANIQUE

Les modules et composants sont montés sur une plaque cuivrée simple face de 2 mm, face cuivrée vers l'intérieur. La rigidité de l'ensemble (le poids des transformateurs est très significatif !) est assurée par dix pieds répartis de manière égale sur le périmètre du châssis en empêchant toute déformation de ce dernier.

Diverses approches ont été réalisées afin d'équilibrer les masses, tout en adoptant une disposition des principaux modules et composants pour faciliter l'organisation du câblage et éviter les couplages électromagnétiques. Finalement la configuration générale adoptée est présentée sur la figure ci-après.



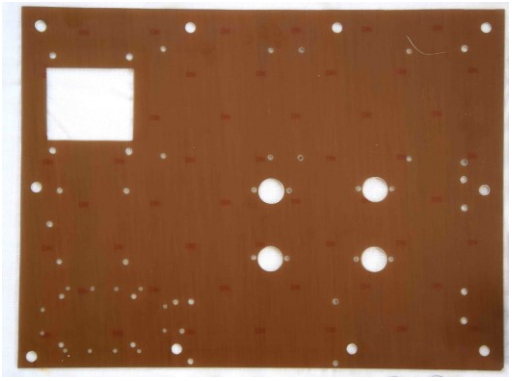
Sur cette image le TA n'est pas le bon modèle (non encore livré au moment du cliché) mais dispose du même encombrement L x l.

III.1 – FABRICATION DU CHÂSSIS

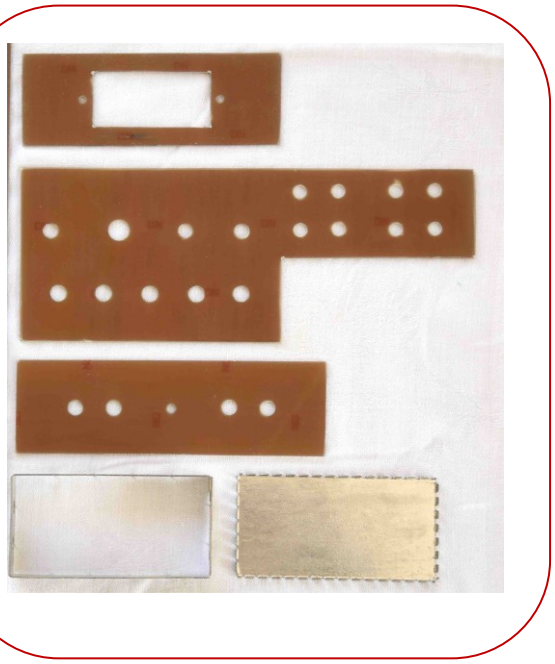
La présentation suivante ne constitue pas l'exact reflet de ce que sera le châssis définitif.
D'abord, parce que les deux canaux sont câblés ici avec des technologies différentes (pour comparer les performances entre un câblage type « barrettes relais » et un câblage de type « Circuit imprimé »).
Ensuite, parce que nous essaierons d'optimiser les volumes et surfaces et tenterons de ne présenter qu'un seul type de châssis, quel que soit le niveau des options retenues par chaque amateur :

- ☞ Amplificateur de puissance seul,
- ☞ Amplificateur de puissance + préamplificateur correcteur de tonalité,
- ☞ Amplificateur de puissance + préamplificateur correcteur de tonalité + préamplificateur phono RIAA.
- ☞ Option récepteur Bluetooth.

À partir de la plaque cuivrée simple face, usinage des principaux éléments du châssis :



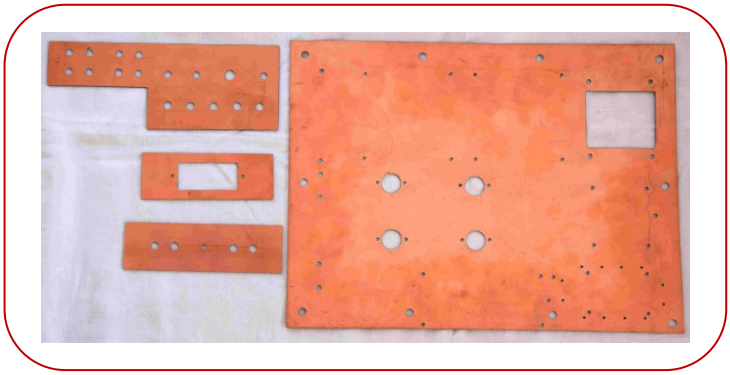
Le châssis principal de 40 cm de longueur sur 30 cm de largeur, usiné avec l'ensemble des découpes et trous des fixations des différents modules et composants.



Cliché à gauche, les éléments complémentaires latéraux :

- Support du filtre /prise secteur.
- Face avant supportant les commandes et connecteurs d'entrées / sorties AF.
- Support des sorties HP.
- Le boîtier de blindage destiné à intégrer le module préamplificateur RIAA.

Cliché du bas : l'ensemble des pièces du châssis, vu côté cuivre.



III.2 – FABRICATION DES PIEDS

Dix pieds sont répartis sur la périphérie du châssis.

Ils sont constitués de tiges filetées de Ø 8 mm maintenant un tube d'aluminium de Ø extérieur 16 mm. Le tout est fixé via des rondelles et écrous.

Un passe-fil de caoutchouc est inséré à force sur l'écrou inférieur de chacun des pieds, afin d'éviter de rayer l'établi…

On le voit, les différents composants du châssis sont issus ou réalisés à partir de pièces « fonds de tiroir », l'objectif ici étant seulement de qualifier les performances de l'amplificateur et non de fabriquer un prototype représentatif de la série.

IV – CÂBLAGE

IV.1 – ORGANISATION GÉNÉRALE

Dans cette maquette de qualification, le câblage est conçu pour permettre la réalisation d'un test individuel de chaque module, grâce à un jeu de commutateurs autorisant l'isolement des entrées concernées, puis une série de connecteurs AF pour les sorties directes de chacun des modules optionnels.

Page suivante, le schéma synoptique montre le câblage adopté entre les modules de l'amplificateur.

IV.2 – CÂBLAGE DU CHÂSSIS

Après avoir installé et fixé l'ensemble des composants, connecteurs des entrées/sorties et des modules, le câblage a été effectué dans l'ordre suivant :

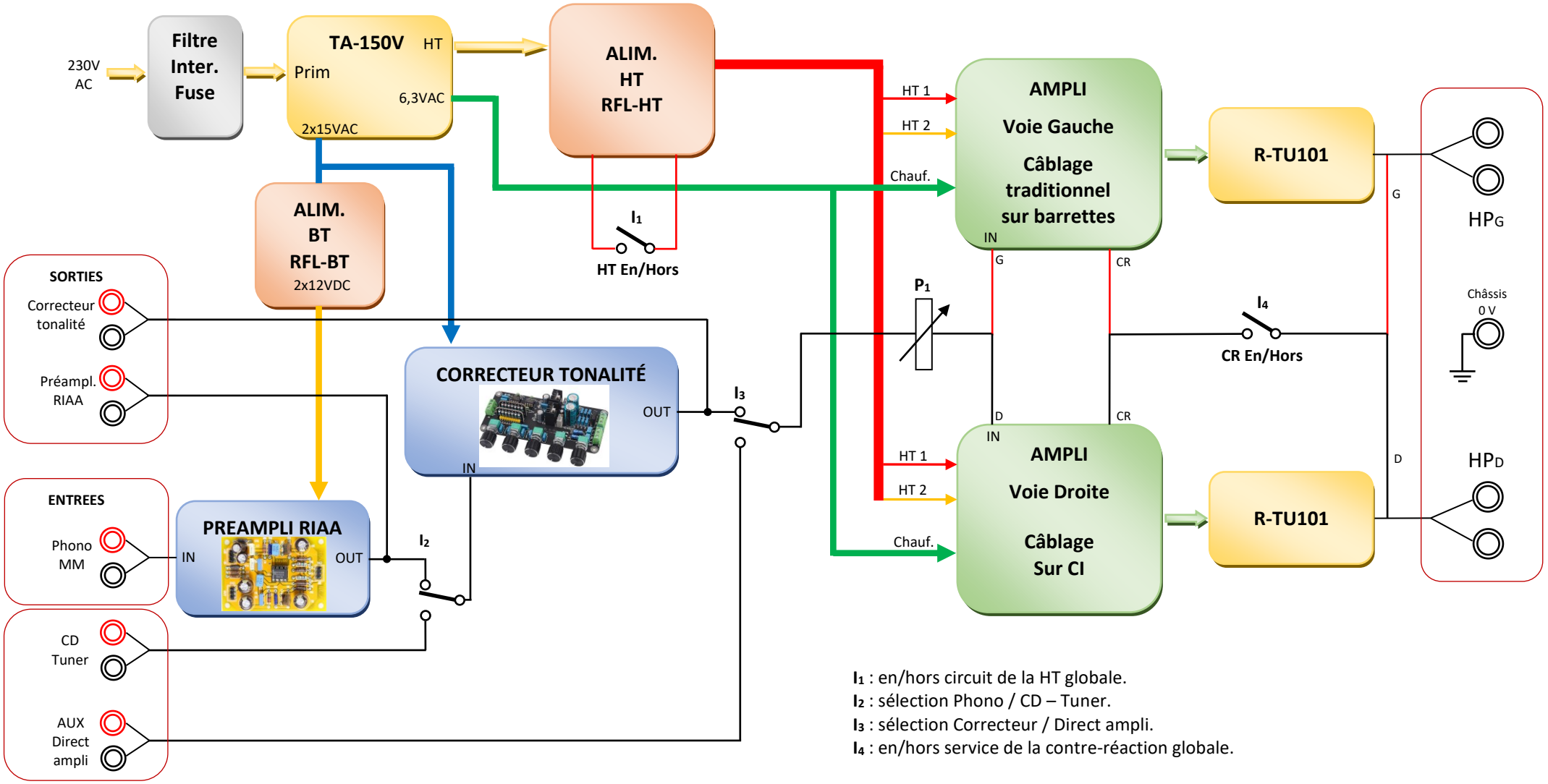
- Primaire du TA vers le filtre secteur.
- Secondaire basse tension 2 x 15 VAC du TA vers le module d'alimentation BT sur circuit imprimé.
- Alimentation du module préamplificateur RIAA (± 12 VDC) vers la sortie du module d'alimentation BT.
- Alimentation du correcteur de tonalité (2 x 15 VAC) vers le secondaire du TA 2 x 15 VAC.
- Raccordement des entrées et des sorties AF aux modules préamplificateurs RIAA et correcteur de tonalité, via les commutateurs de sélection. La totalité du câblage AF est réalisée à l'aide de câbles blindés.
  Nota : les connecteurs RCA des entrées et sorties sont totalement isolés du châssis et les tresses de blindage des câbles sont reliées seulement du côté « Entrée » de la destination du signal, afin d'éviter tout bouclage de masse avec le châssis.

Une première étape de contrôle a été effectuée à ce stade :

- Mise sous tension du module d'alimentation BT et des sous-ensembles préamplificateur RIAA et correcteur de tonalité.
- Contrôle fonctionnel au générateur AF et validation de l'ensemble des entrées et sorties AF ainsi que des différentes combinaisons des commutations des sources.
- Évaluation rapide des niveaux de bruit afin de valider les différents parcours des masses.

Poursuite du câblage :

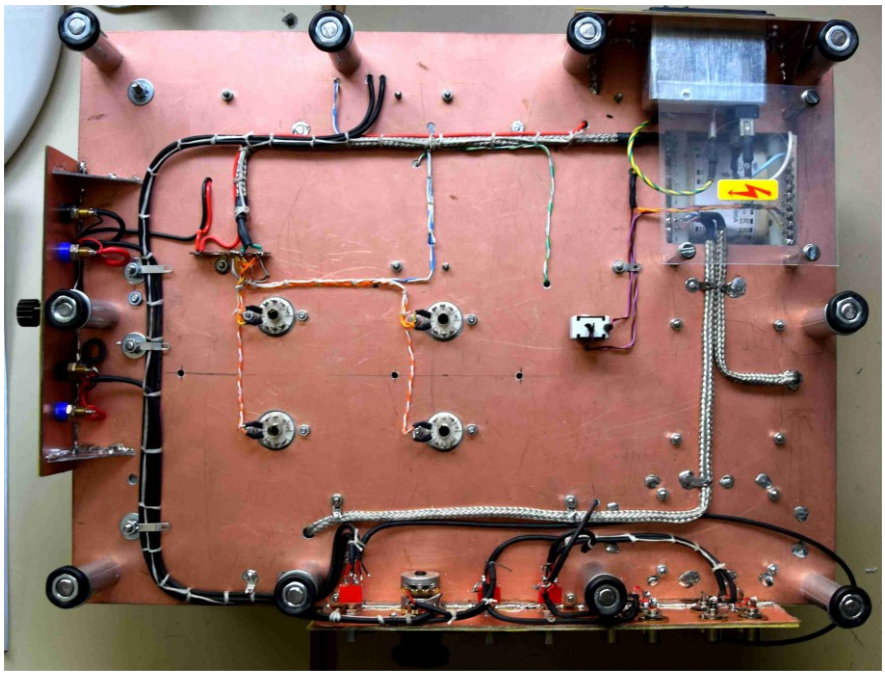
- Module CI de l'alimentation HT.
  Nota : par sécurité, des isolants mica ont été insérés entre les dissipateurs et les transistors de puissance pour réduire le risque d'électrocution. Dans le même esprit, tous les dissipateurs ont été reliés électriquement au 0 V, via le plan de masse du CI.
- Pose et câblage d'un interrupteur de sectionnement de la HT (placé entre le point milieu de l'enroulement HT 2 x 250 VAC du TA et l'entrée AC du module d'alimentation HT).
- Module amplificateur sur CI (canal droit) vers le module d'alimentation HT et le TS R-TU101.
- Câblage du réseau d'alimentation des filaments pour les 2 canaux.



I₁ : en/hors circuit de la HT globale.
I₂ : sélection Phono / CD – Tuner.
I₃ : sélection Correcteur / Direct ampli.
I₄ : en/hors service de la contre-réaction globale.

P₁ : gain ampli (adaptation correcteur/ampli).

Vue du châssis à cette étape du câblage.



Les tresses métalliques véhiculent les principaux faisceaux de distribution des tensions alternatives : haute tension, basse tension et filaments, dans le but d'éviter tout rayonnement intempestif du 50 Hz.

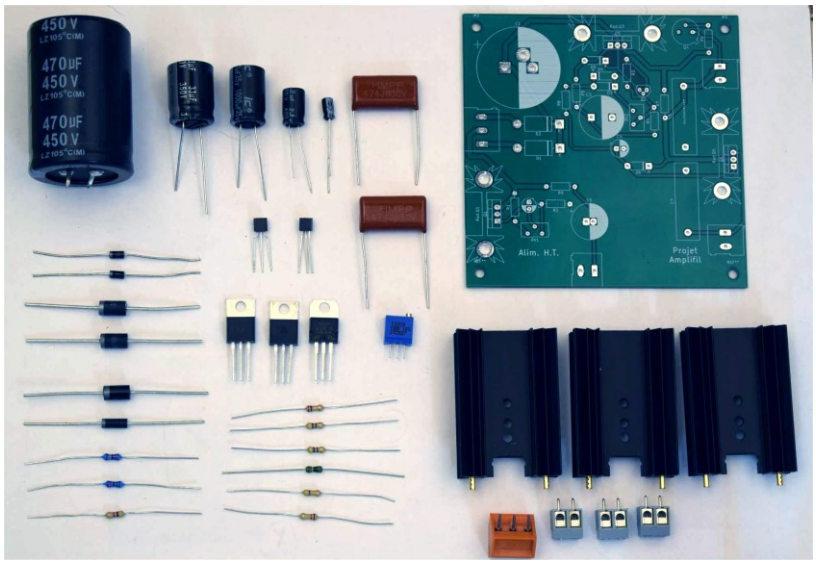
Une protection, via une feuille rigide de plastique transparent, a été fixée au-dessus des broches des enroulements du TA.

IV.3 – CÂBLAGE DES MODULES D'ALIMENTATION

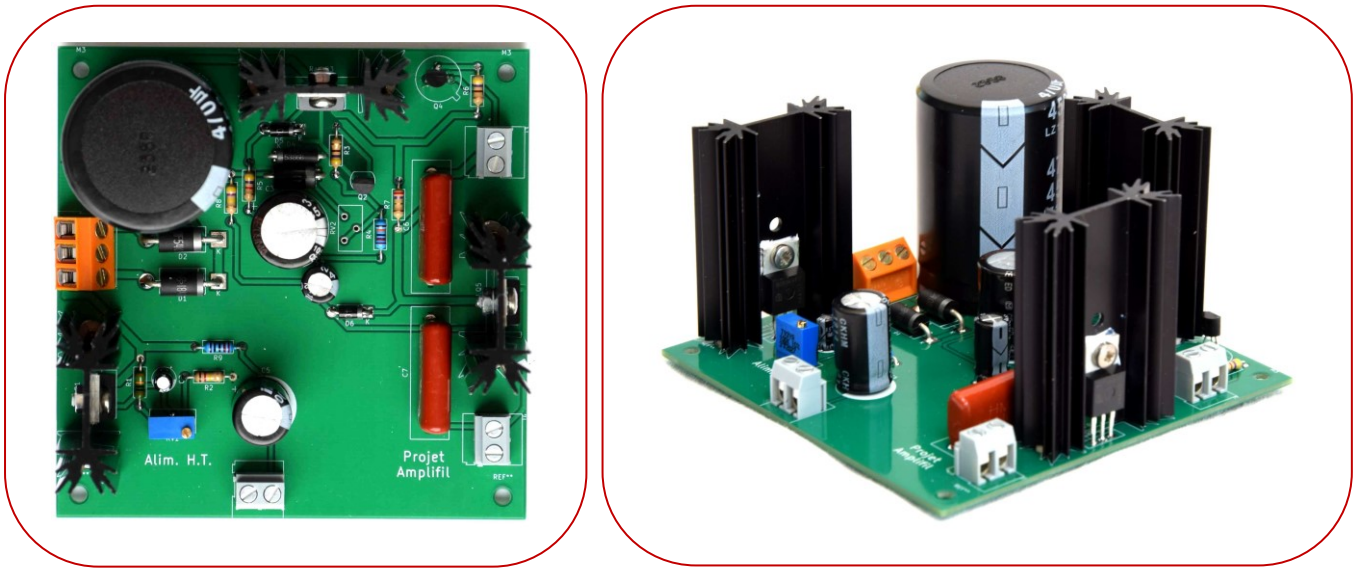
IV.3.1 – Alimentation Haute Tension

Ce module fait appel à des composants modernes et autorise une gestion particulièrement fine des différentes hautes tensions nécessaires au module d'amplification de puissance.

Ci-après, quelques étapes du montage sur le circuit imprimé, dans sa version prototype.



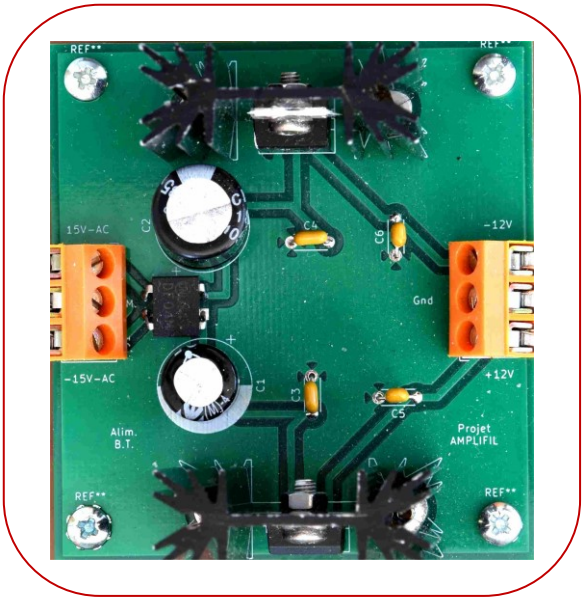
Le circuit imprimé et tous les composants nécessaires à la réalisation de ce module « Alimentation HT ».



Le module de l'alimentation HT après câblage des composants et des connecteurs de raccordement.

IV.3.2 – Alimentation Basse Tension

De conception classique, organisé autour de circuits intégrés de régulation, standards et économiques, ce module est destiné à l'alimentation de circuits optionnels comme le préamplificateur RIAA.



Circuit imprimé prototype câblé.
Le module délivre une tension continue filtrée et régulée symétrique de ±12V.

IV.4 – CÂBLAGE DES MODULES DE L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

Afin d'effectuer des mesures comparatives, les deux canaux de l'amplificateur de puissance ont été câblés suivant deux technologies différentes.

- Canal droit : câblage sur un circuit imprimé.
- Canal gauche : câblage « traditionnel » sur barrettes relais à cosses.

IV.4.1 – Amplificateur de puissance, canal droit

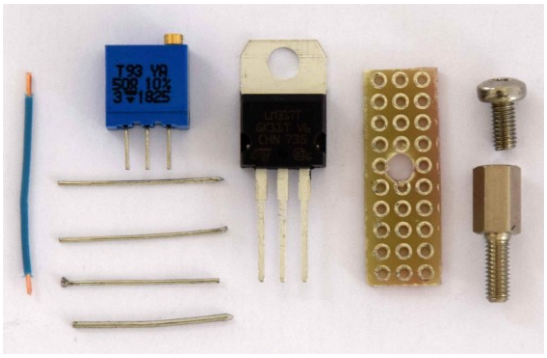
La totalité des composants actifs et passifs de la section de ce canal de l'amplificateur de puissance a été câblée sur un circuit imprimé double face avec trous métallisés.

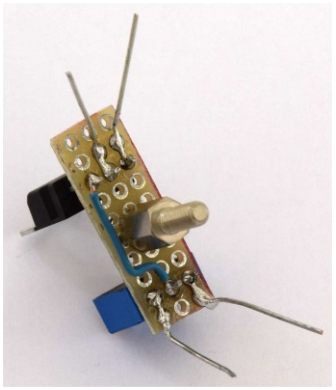
Le circuit imprimé câblé du module prototype de la section du canal droit de l'amplificateur de puissance.

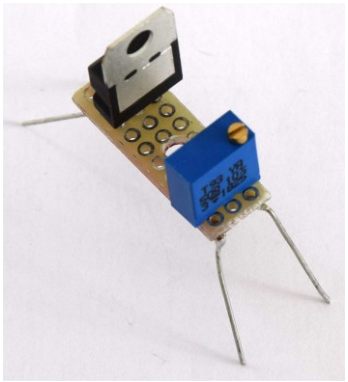
IV.4.2 – Amplificateur de puissance, canal gauche

Tous les composants passifs de la section de ce canal de l'amplificateur de puissance ont été câblés sur une barrette relais.

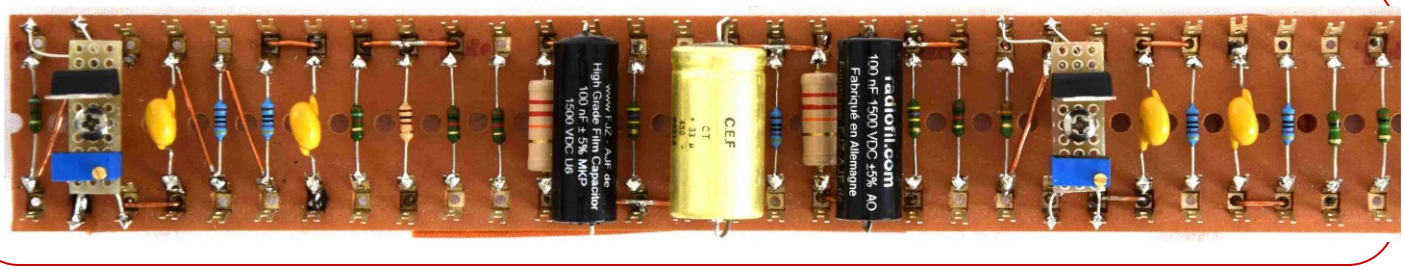
Étape 1 : préparation de deux petites cartes « fille » supportant le régulateur et le potentiomètre ajustable d'équilibrage des cathodes des couples des tubes électroniques EF184 et EL84.

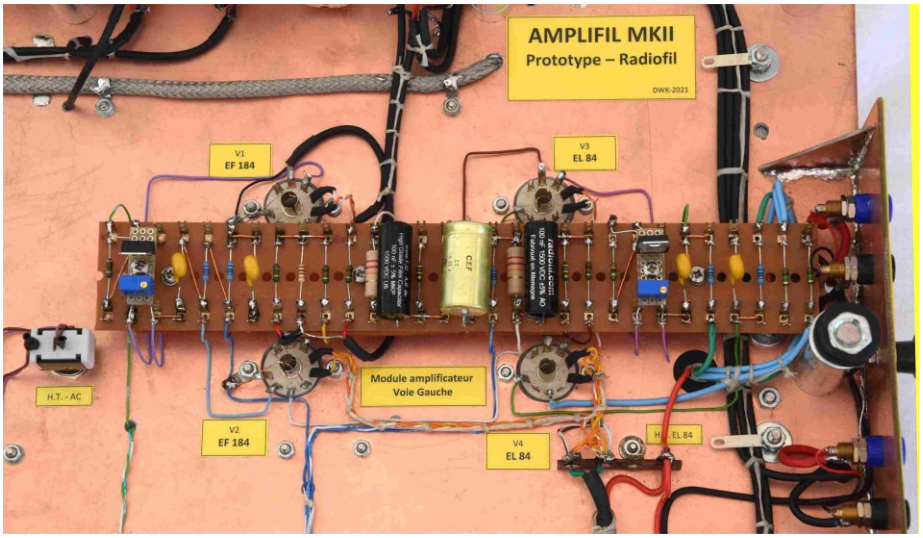






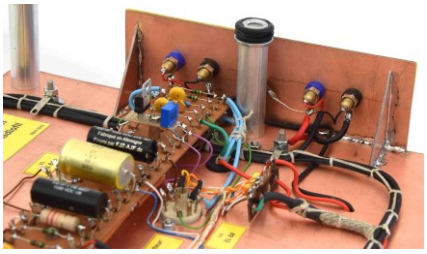
Étape 2 : câblage de la barrette relais avec l'ensemble des composants.





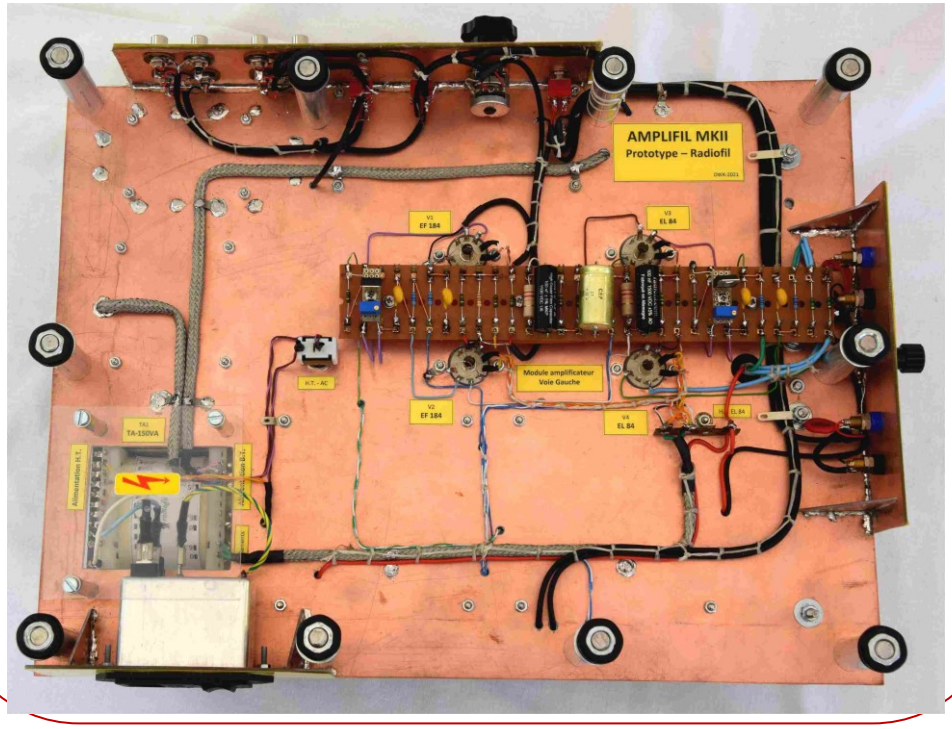
Étape 3 : implantation de la barrette câblée dans le châssis et raccordement aux supports des tubes, au module d'alimentation HT et au transformateur de sortie.

Raccordement du transformateur de sortie R-TU101 et des différentes broches des supports des quatre tubes.



IV.5 – CONTRÔLE GÉNÉRAL DU CÂBLAGE

- Contrôle visuel de tous les câbles et fils de liaison par rapport au schéma électronique.
- Contrôle de la continuité des masses et de l'absence de bouclage avec les signaux AF.



Vue de la face interne du châssis, une fois le câblage terminé.

V – CONTRÔLE FONCTIONNEL

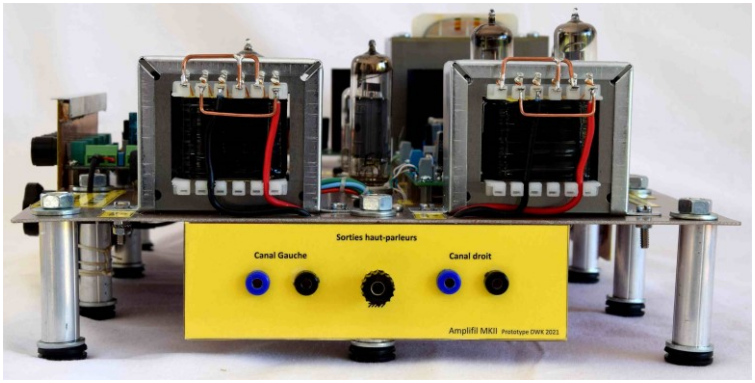
- Vérification de la cohérence des tensions de sortie du module alimentation, sans les tubes électroniques, via une mise sous tension progressive au travers d'un autotransformateur variable *Variac*.
- Idem avec les tubes électroniques en place, sur le canal droit (module CI).
- Contrôle du fonctionnement du canal droit (générateur + millivoltmètre AF / oscilloscope).
- Mise en place des tubes électroniques sur le canal gauche (câblage traditionnel).
- Contrôle des tensions du module d'alimentation avec les deux canaux.
- Contrôle du fonctionnement du canal gauche (générateur + millivoltmètre AF / oscilloscope).

Tout étant OK, quelques clichés de la maquette, avant la section « Mesures et qualification ».

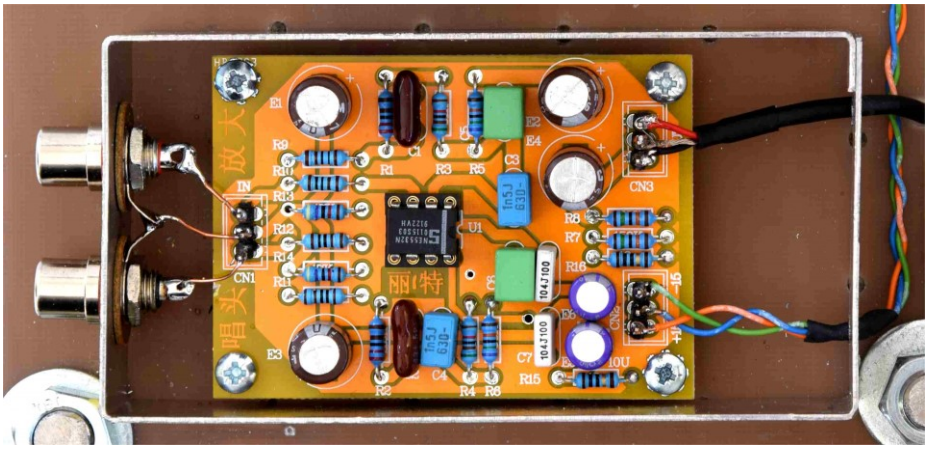
La maquette terminée, sous tension.

Détail de la face avant supportant les commandes, ainsi que les entrées et sorties AF haut niveau.

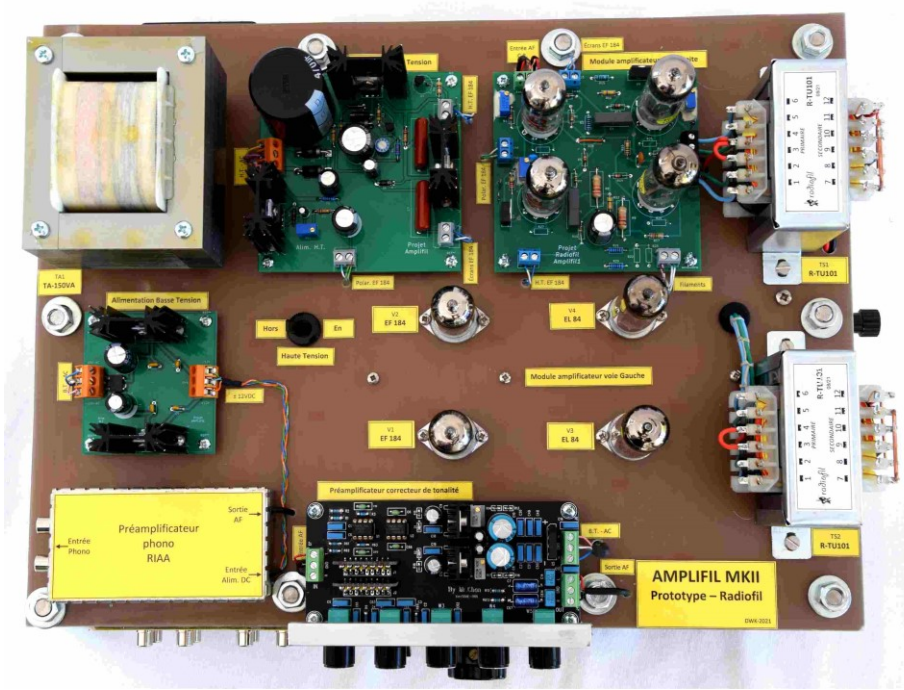
Détail de l'entrée Phono



Sorties HP et point de masse unique.



Détail du préampli RIAA dans son boîtier blindé (capot ôté).
Les 2 fiches RCA d'entrée sont isolées du blindage.



Vue de dessus du prototype, capot du blindage du préamplificateur RIAA en place.

VI – MESURES ET QUALIFICATION ÉLECTRONIQUES

VI.1 – ÉQUIPEMENTS DE MESURE

A / Les mesures courantes de contrôle ont été effectuées via l'instrumentation analogique suivante :

- ✓ Générateur AF *Rohde & Schwarz* type APN04.
- ✓ Analyseur AF *Hewlett-Pacquard* type 8903B.
- ✓ Oscilloscope *Fluke* type PM3370B.
- ✓ Charges fictives 8 Ω / 16 Ω 150 W fabrication DW.

B / Les mesures de qualification ont été effectuées à l'aide de l'instrumentation digitale suivante :

- ✓ Générateur / Analyseur AF *Audio Précision* type 525.
- ✓ PC de gestion et de pilotage avec OS *Windows* 10.
- ✓ Charges fictives 8 Ω / 16 Ω 150 W fabrication DW.

VI.2 – CONDITIONS DE MESURE

L'équipement prototype est raccordé comme suit :

- Entrée secteur sur un autotransformateur variable *Variac* afin de fixer une valeur de référence de la HT principale (relevé sur le point milieu des TS R-TU101), qui soit aisément reproductible.
- Signal AF de mesure raccordé simultanément aux entrées AF directes de l'amplificateur (Aux. Direct) des canaux gauche et droit.
- Sorties HP des canaux G et D reliées chacune sur une charge fictive de valeur 8 Ω.
- Relevé des mesures de puissance et des différentes caractéristiques AF, simultanément sur les bornes de chaque charge fictive.
- Fréquence de référence des mesures : 1 kHz sinus.
- Niveaux AF exprimés en dBu avec la référence 0 dBu = 0,775 V sur 600 Ω.

VI.3 – CONTRÔLE DES TENSIONS

Les tableaux suivants indiquent les principales tensions relevées sur les tubes.

Conditions :

- ✓ Relevés après 10 mn de chauffe.
- ✓ Sorties HP chargées sur 8 Ω.
- ✓ Pas de signal AF à l'entrée.
- ✓ Potentiomètre de réglage du niveau général de l'entrée AF, au minimum.
- ✓ Tension secteur à l'entrée du TA : 220 VAC.

H.T. TS point milieu R-TU101	250 VDC
H.T. anodes EF184	250 VDC
H.T. écrans EF184	173 VDC
Polarisation EF184	-8,94 VDC

Canal gauche

V1 – EF184	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	2,30 VDC
A (Br.7)	121 VDC
G_2 (Br.8)	166 VDC

Canal droit

V1 – EF184	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	2,27 VDC
A (Br.7)	130 VDC
G_2 (Br.8)	170 VDC

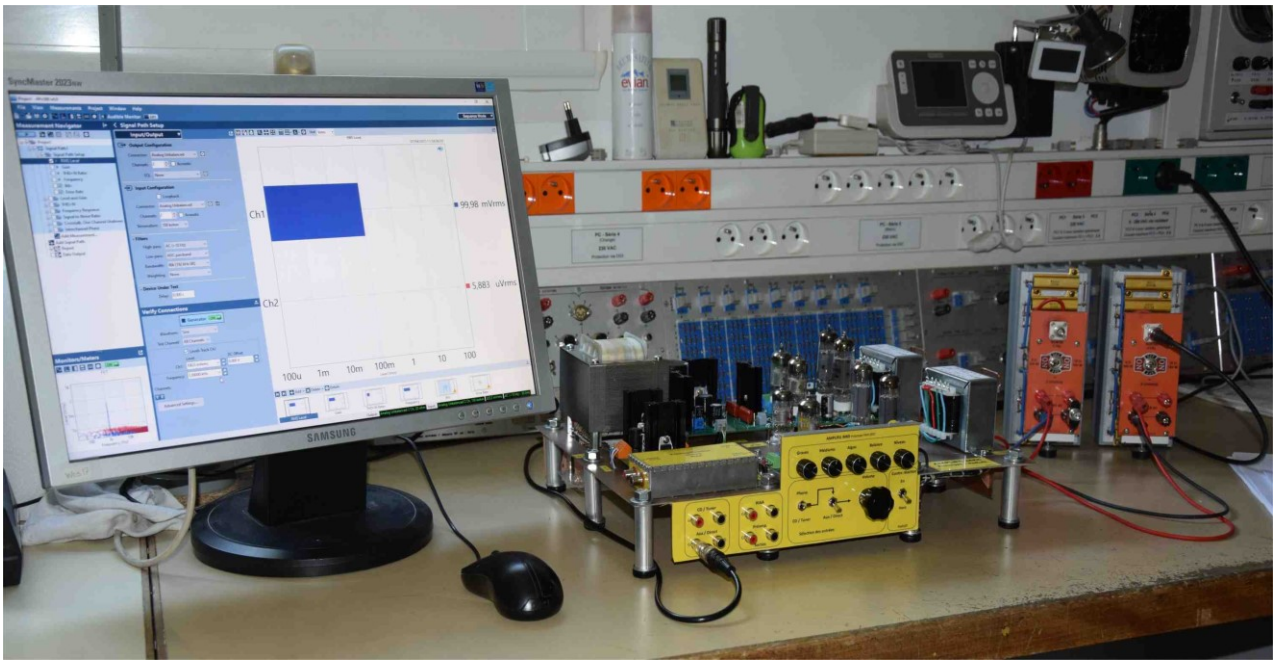
V2 – EF184	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	1,95 VDC
A (Br.7)	121 VDC
G_2 (Br.8)	166 VDC
V3 – EL84	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	6,28 VDC
A (Br.7)	238 VDC
G_2 (Br.9)	242 VDC
V3 – EL84	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	6,34 VDC
A (Br.7)	239 VDC
G_2 (Br.9)	242 VDC

V2 – EF184	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	2,31 VDC
A (Br.7)	130 VDC
G_2 (Br.8)	170 VDC
V3 – EL84	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	6,28 VDC
A (Br.7)	238 VDC
G_2 (Br.9)	242 VDC
V3 – EL84	Relevés
G_1 (Br.2)	0,00 VDC
K (Br.3)	6,34 VDC
A (Br.7)	239 VDC
G_2 (Br.9)	242 VDC

VI.4 – MESURES AF

Conditions :

- ✓ Sorties HP chargées sur 8 Ω.
- ✓ Signal AF = 1 kHz, sauf indication contraire.
- ✓ Potentiomètre de réglage du niveau général placé au maximum.
- ✓ Contre-réaction globale en service, sauf indication contraire.
- ✓ Conditions de tension à l'identique du chapitre VI.3.



Le prototype lors de la session de mesures.

VI.4.1 – Puissance de sortie

Mesure de la tension de sortie, puis calcul de la puissance de sortie sur une charge de 8 Ω, pour les taux de distorsions par harmoniques (THD) suivants :

THD	Canal G		Canal D	
	Tension	Puissance	Tension	Puissance
1 %	7,43 V	6,90 W	7,44 V	6,92 W
2 %	7,49 V	7,01 W	7,50 V	7,03 W
3 %	8,06 V	8,12 W	8,10 V	8,20 W

VI.4.2 – Gain

Le gain est mesuré pour un signal de sortie fixé à 1 % de THD avec contre-réaction globale et 2 % sans la contre-réaction (sans CR globale, c'est le taux minimum possible).
Le chiffre indiqué entre parenthèses, après la valeur en dB, correspond au rapport décimal du gain.

Gain D (G idem)	
Sans CR	**Avec CR**
34,22 dB (51,43)	11,83 dB (21,43)

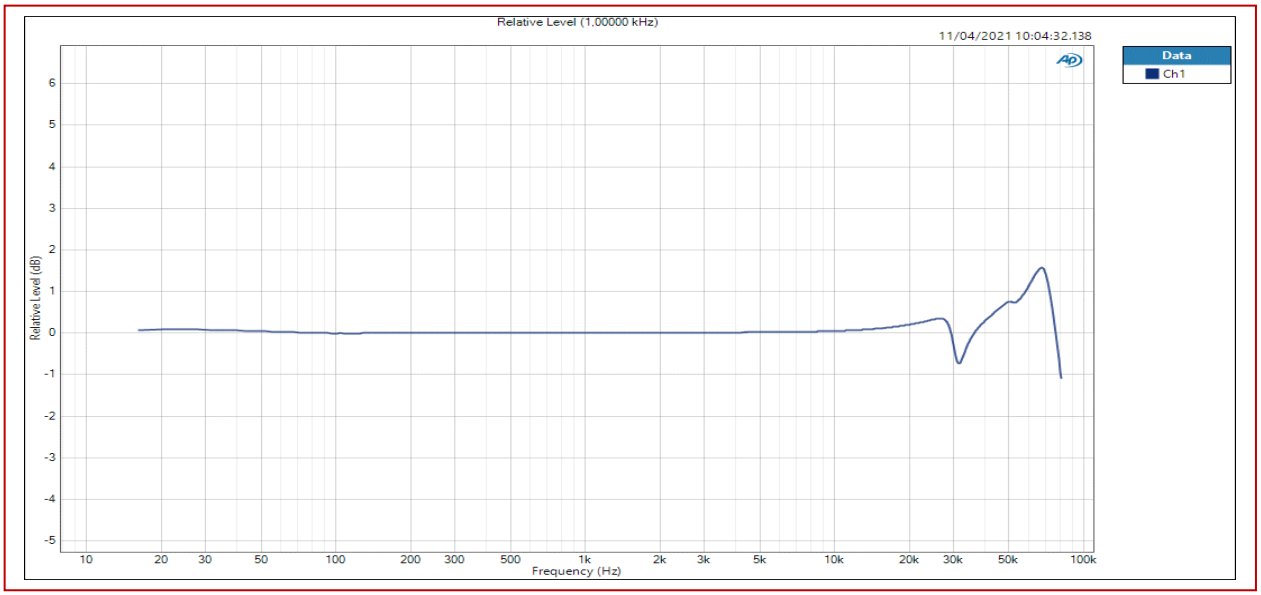
VI.4.3 – Sensibilité

La sensibilité d'entrée est mesurée pour un signal de sortie fixé à 1 % de THD avec contre-réaction globale et 2 % sans la contre-réaction (sans CR globale, c'est le taux minimum possible).

Sensibilité d'entrée D (G idem)	
Sans CR	**Avec CR**
-17,7 dBu (100,9 mV)	-1,8 dBu (628 mV)

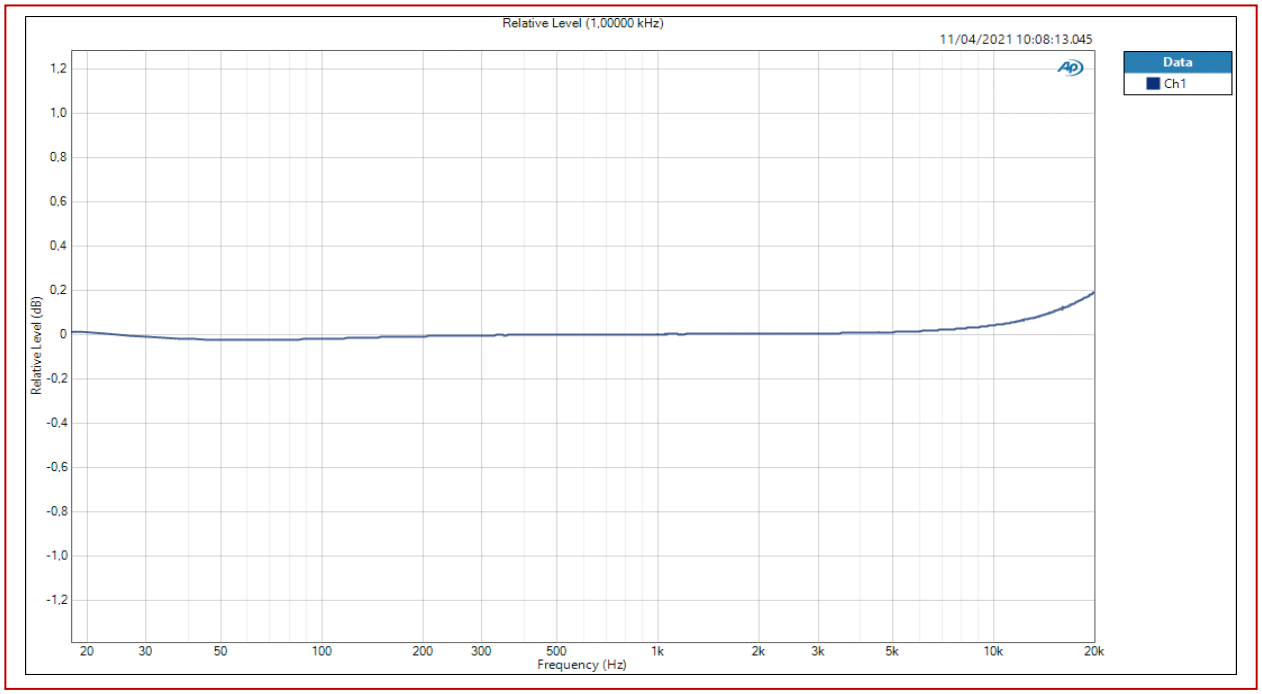
VI.4.4 – Courbe de réponse sinusoïdale

Les caractéristiques étant similaires sur les deux canaux, seul le canal droit a été rapporté.
Conditions des mesures :
Niveau de référence : puissance max @ 1 KHz pour 1 % de THD diminuée de 3 dB, soit P = 3,45 W.
Les différentes courbes de réponse sont réalisées en mode automatique.



Graphe 1 : courbe de réponse sans filtre ni limitation, relevée de 15 Hz à 80 kHz. Réf : 0 dB pour F = 1 kHz.

Très bonne linéarité générale. Légère surtension (+1,7 dB) vers 70 kHz, imputable à une résonnance du transformateur de sortie, sans incidence sur la stabilité et les performances sonores de l'amplificateur.

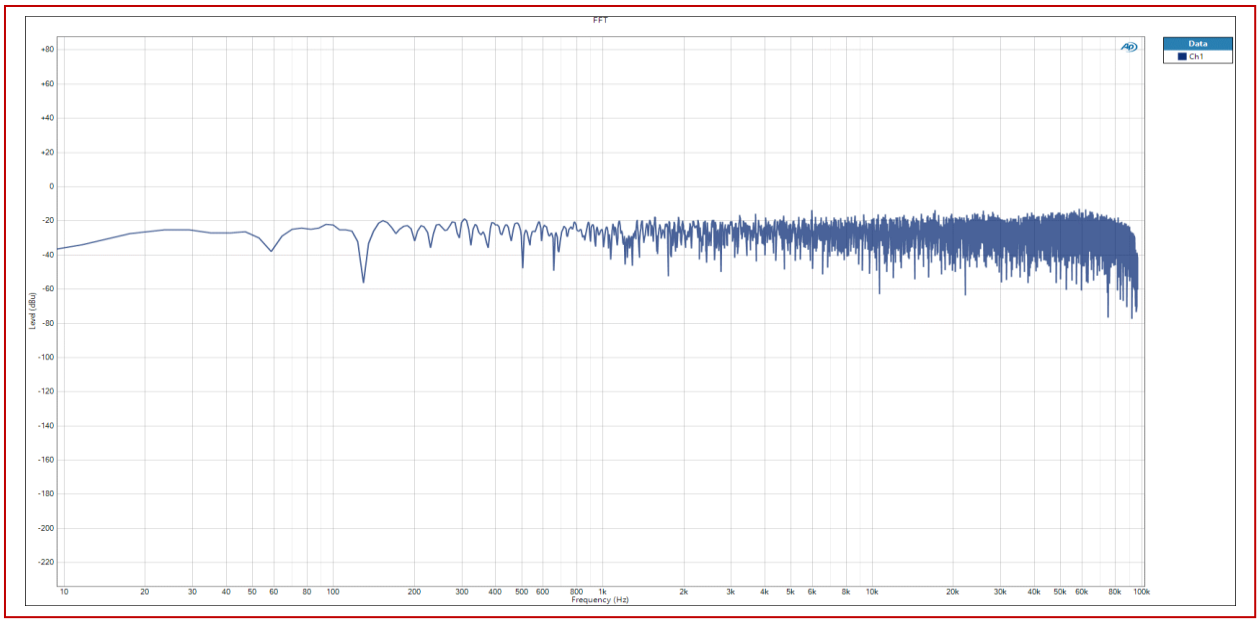


Graphe 2 : courbe de réponse sans filtre ni limitation, détaillée de 15 Hz à 20 kHz.
Réf : 0 dB pour F = 1 kHz.

La linéarité dans la bande audio est excellente : la totalité du spectre AF 20 Hz – 20 kHz tient dans 0,2 dB.

VI.4.5 – Courbe de réponse bruit coloré

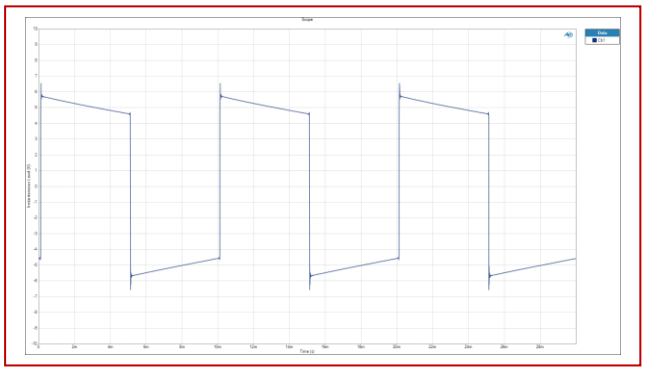
Cette mesure sollicite l'amplificateur sur toutes les fréquences du spectre, simultanément.
La linéarité comme la tenue en puissance peuvent ainsi être contrôlées efficacement.

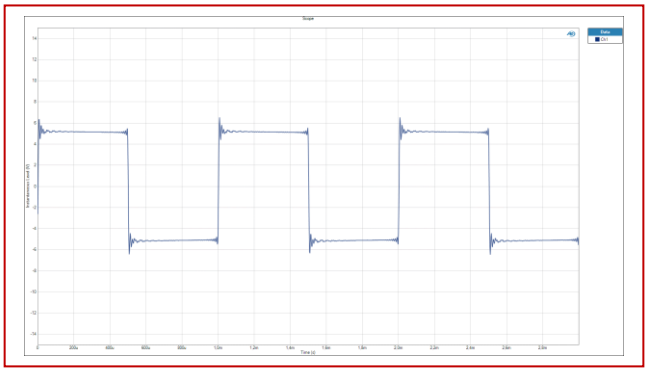


Graphe 3 : courbe de réponse sans filtre ni limitation, avec générateur de bruit blanc de 10 Hz à 100 kHz.
Réf : niveau moyen fixé à P_{MAX} -3 dB.
C'est quasi parfait sans instabilité ou prédominance fréquentielle.

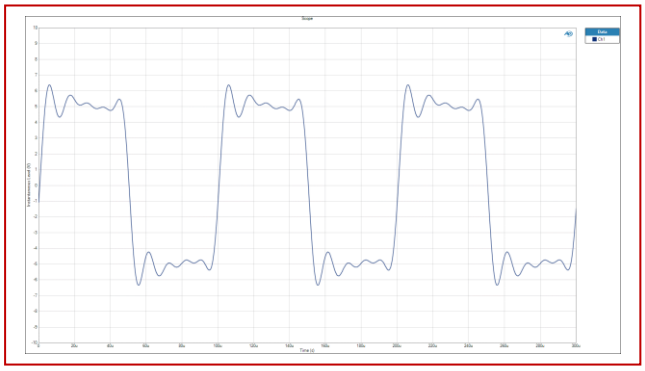
VI.4.6 – Comportement en mode transitoire

A / Réponse aux signaux carrés





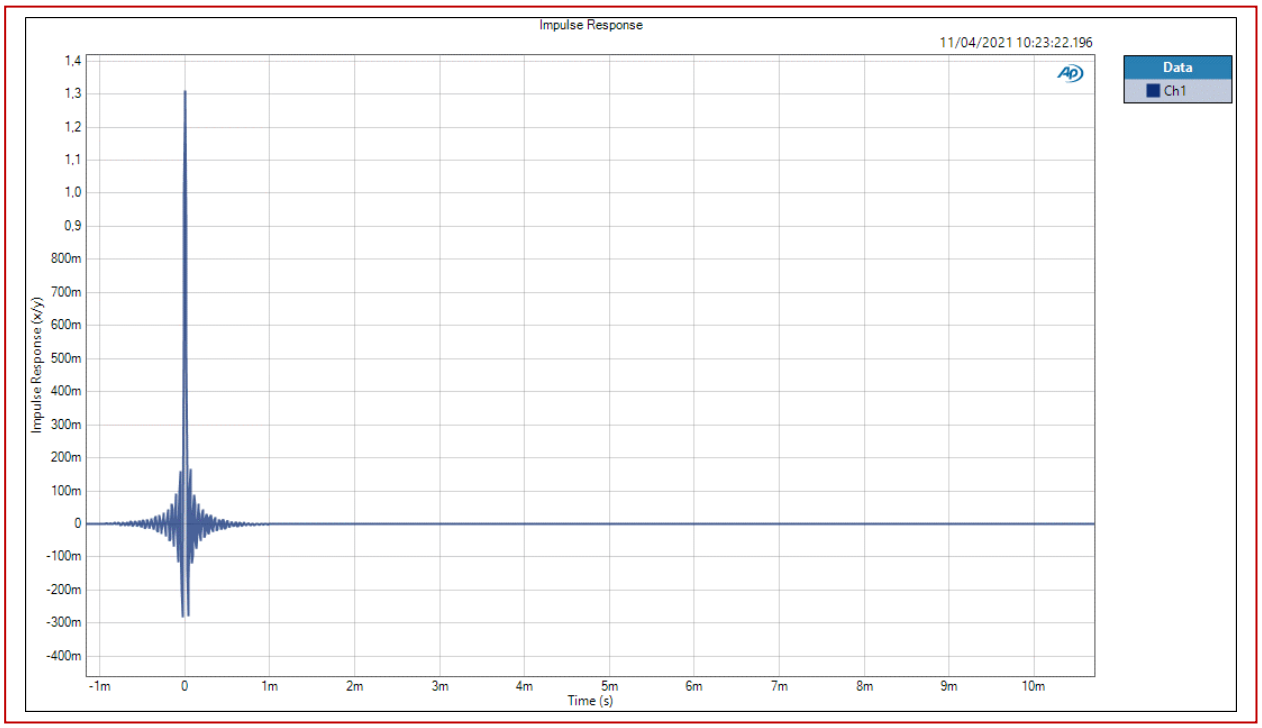
Graphes 4 et 5 : réponse aux signaux carrés. À gauche F = 100 Hz, à droite F = 1 kHz.



Graphe 6 : réponse aux signaux carrés. F = 10 kHz.

Le comportement est très bon : les fronts sont propres et les surtensions sont amorties rapidement et régulièrement.

B / Réponse en mode impulsionnel



Graphe 7 : réponse en régime impulsionnel. Axe des abscisses : temps en ms.

La réponse impulsionnelle est une propriété de l'appareil, donc elle est exprimée sans unité, ce qui est représenté ici par « x / y ». La réponse impulsionnelle est signifiée comme la relation entre la sortie et l'entrée.

L'analyseur utilise un signal de balayage continu (bip sinusoïdal log-balayé) comme stimulus, puis récupère la réponse impulsionnelle de l'amplificateur, à partir des données acquises.
Ici, la réponse est excellente, avec un amortissement rapide de stabilisation du signal.

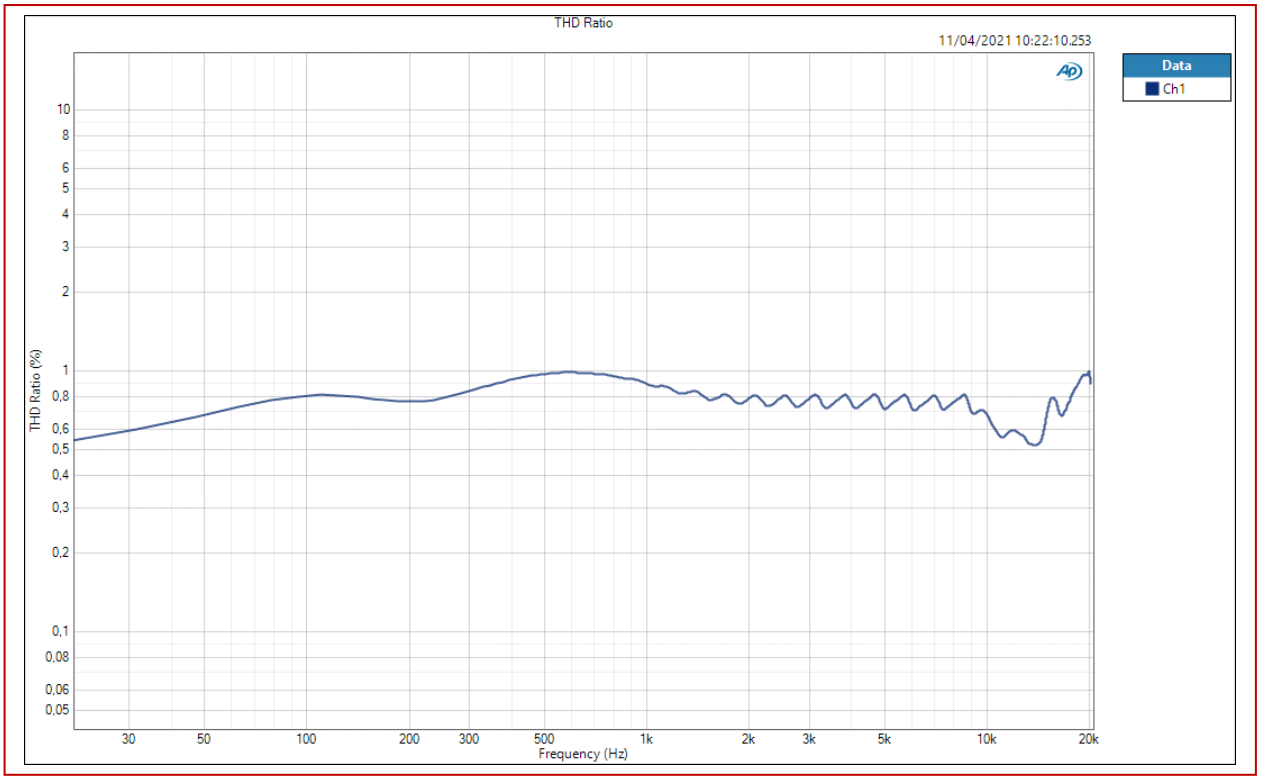
VI.4.7 – Distorsions par harmoniques (THD)

A / En fonction de la puissance de sortie :

Fréquence : 1 kHz.

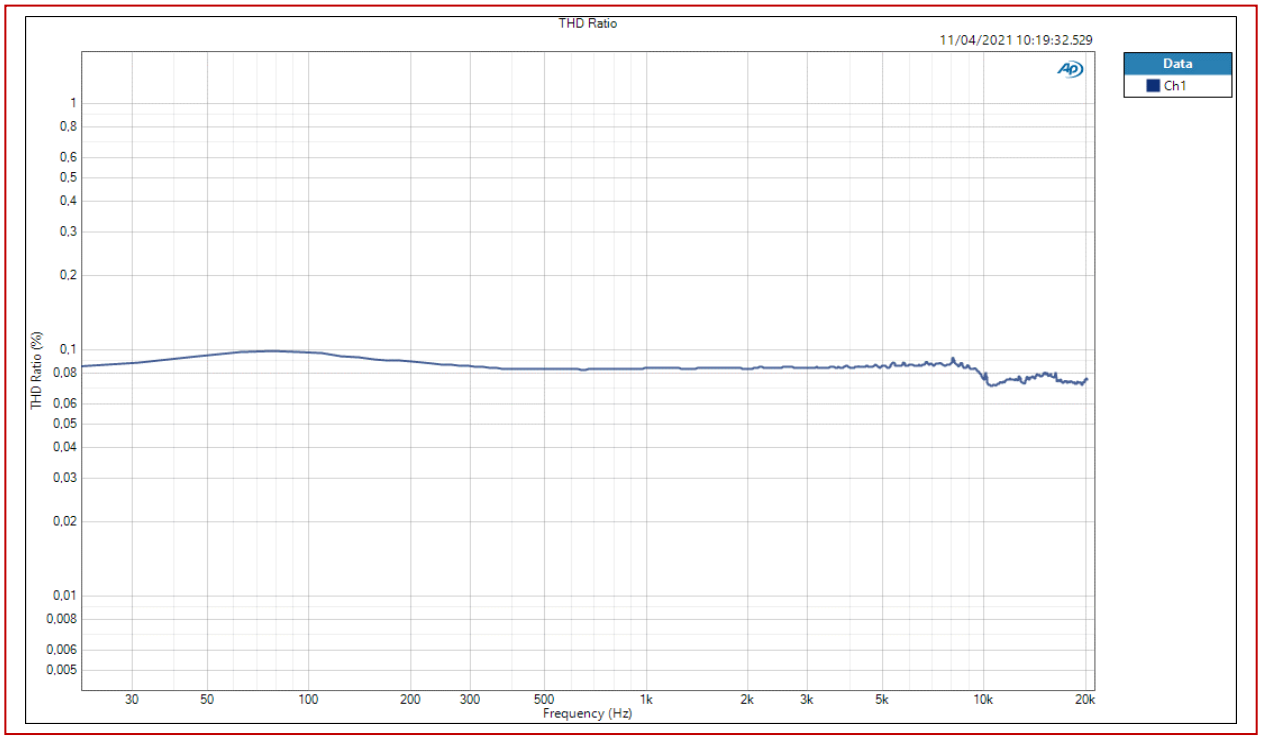
Puissance	THD Canal D (G idem)
6,9 W (Réf 100 %)	1,00 %
5,2 W (75 %)	0,16 %
3,45 W (50 %)	0,09 %

B / En fonction de la fréquence :



Graphe 8 : distorsion totale par harmoniques (THD) en fonction de la fréquence avec P_{MAX}.
Réf : THD @ 1 kHz = 1%

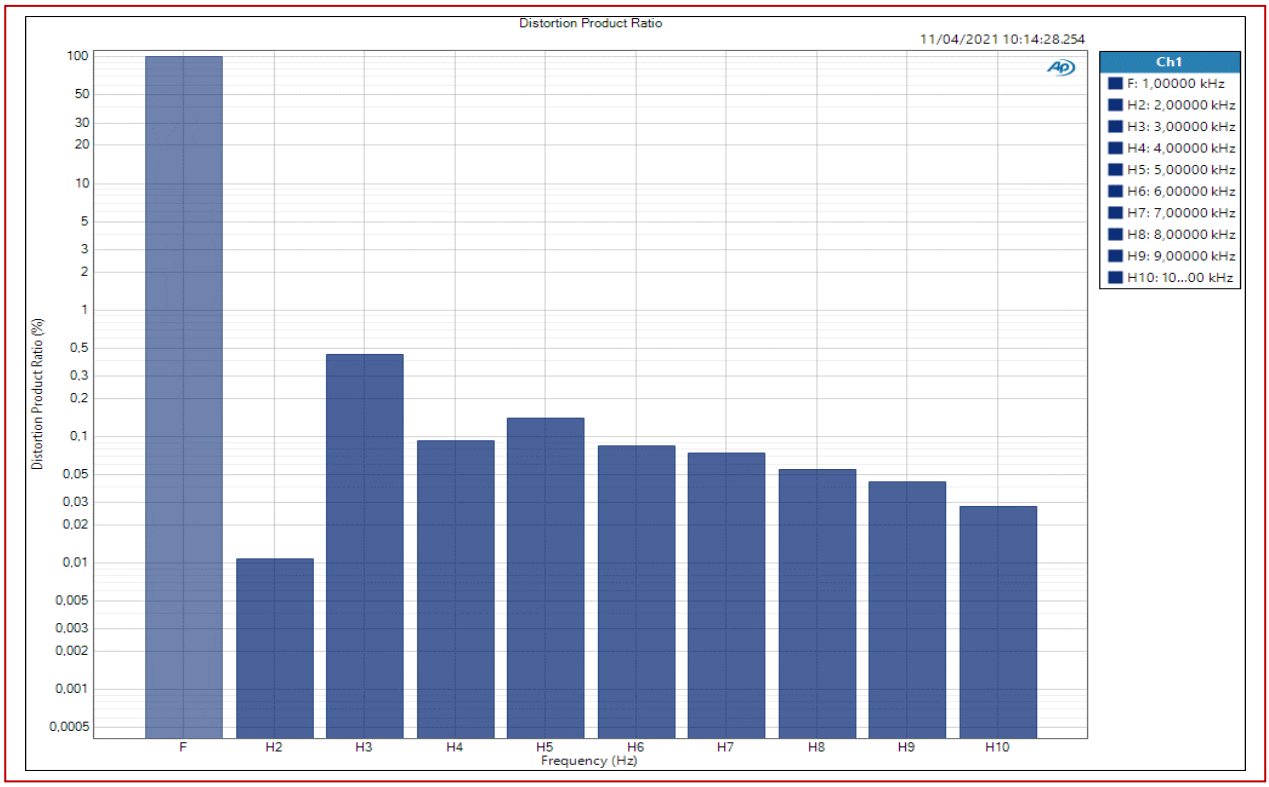
La THD est extrêmement régulière de 20 Hz à 20 kHz.
Le montage électronique comme la qualité du transformateur de sortie sont ici largement créditeurs de ces bons résultats.



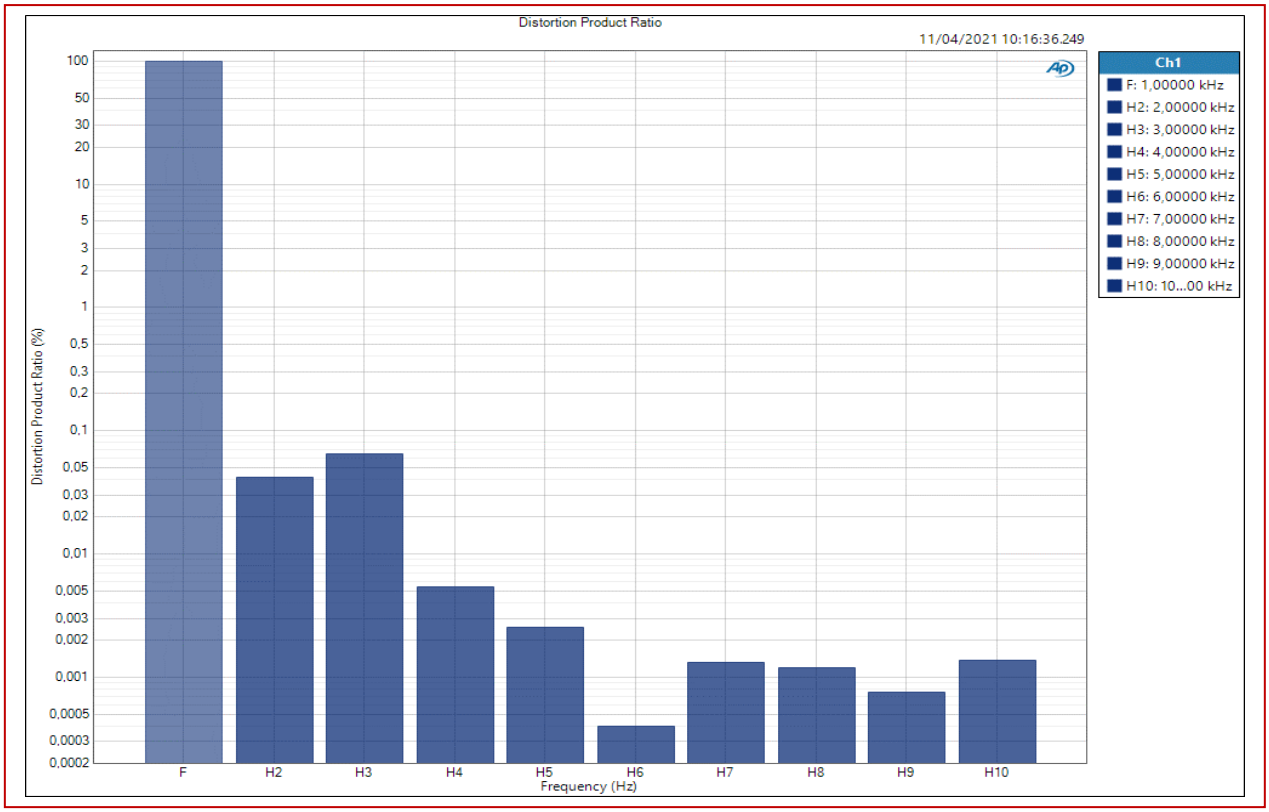
Graphe 9 : distorsion totale par harmoniques (THD) en fonction de la fréquence avec P_{MAX} -3 dB.
Réf : P_{MAX} = THD @ 1 kHz = 1%

À l'intérieur de la zone de travail de l'amplificateur (mi-puissance), le taux de THD reste inférieur ou égal à 0,1% sur la totalité du spectre audio.

C / Distribution de la distorsion par rang des harmoniques :
Puissance max pour THD = 1 % @ 1kHz.



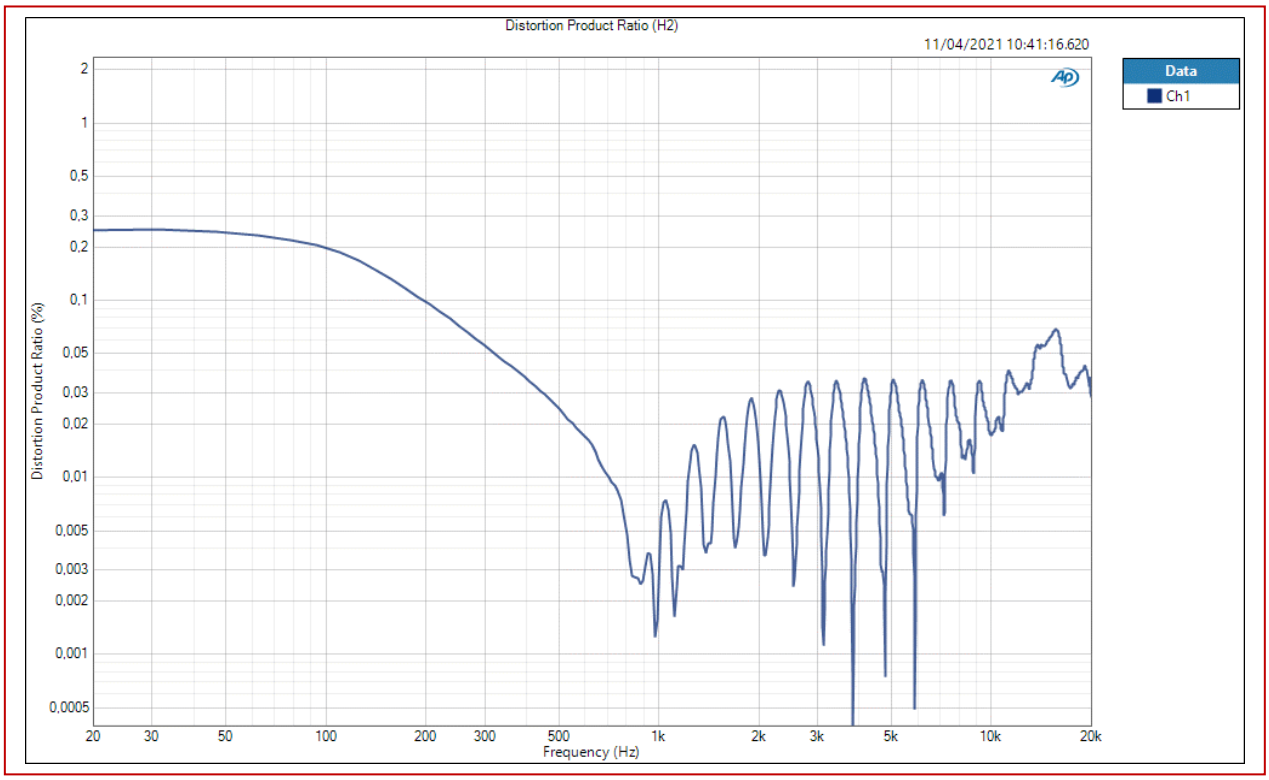
Graphe 10 : distribution de la distorsion par rang harmonique à P_{MAX} (Réf. THD @ 1 kHz = 1%).



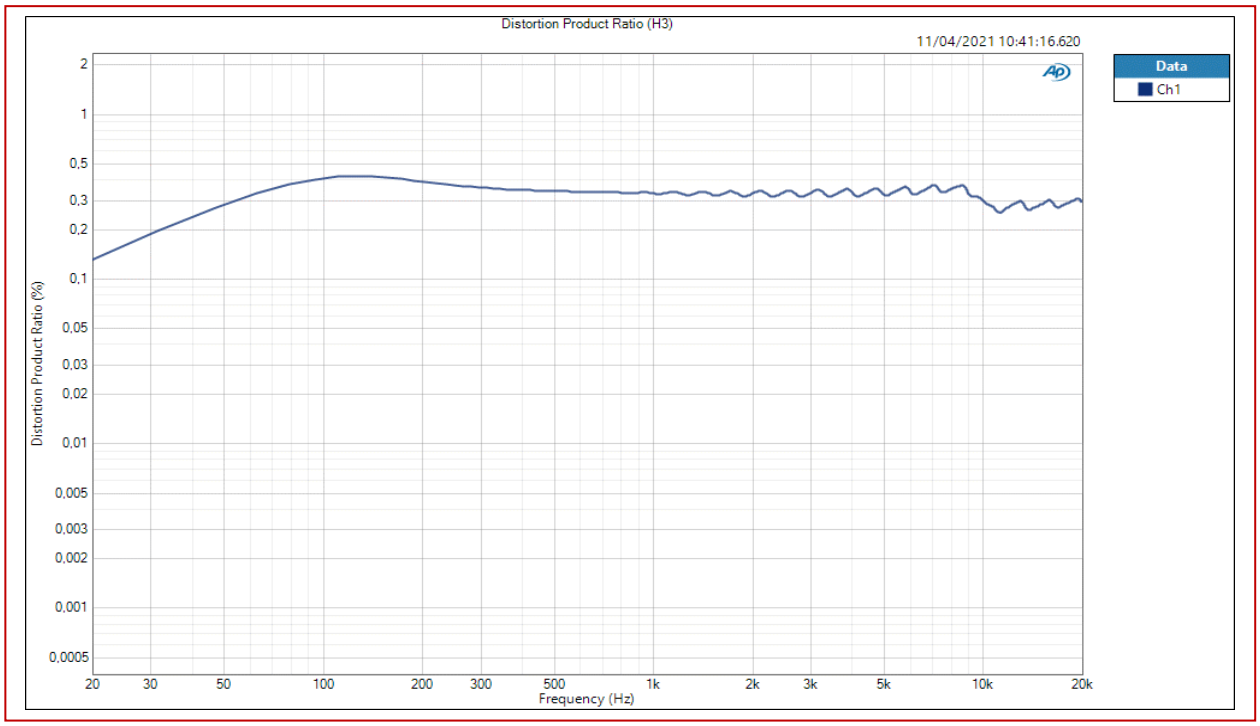
Graphe 11 : distribution de la distorsion par rang harmonique avec P_{MAX} – 3 dB (Réf = THD @ 1 kHz = 1%).

Très bon comportement de la distribution des distorsions par rang harmonique.

D / Distribution harmonique de rang 2, en fonction de la fréquence :



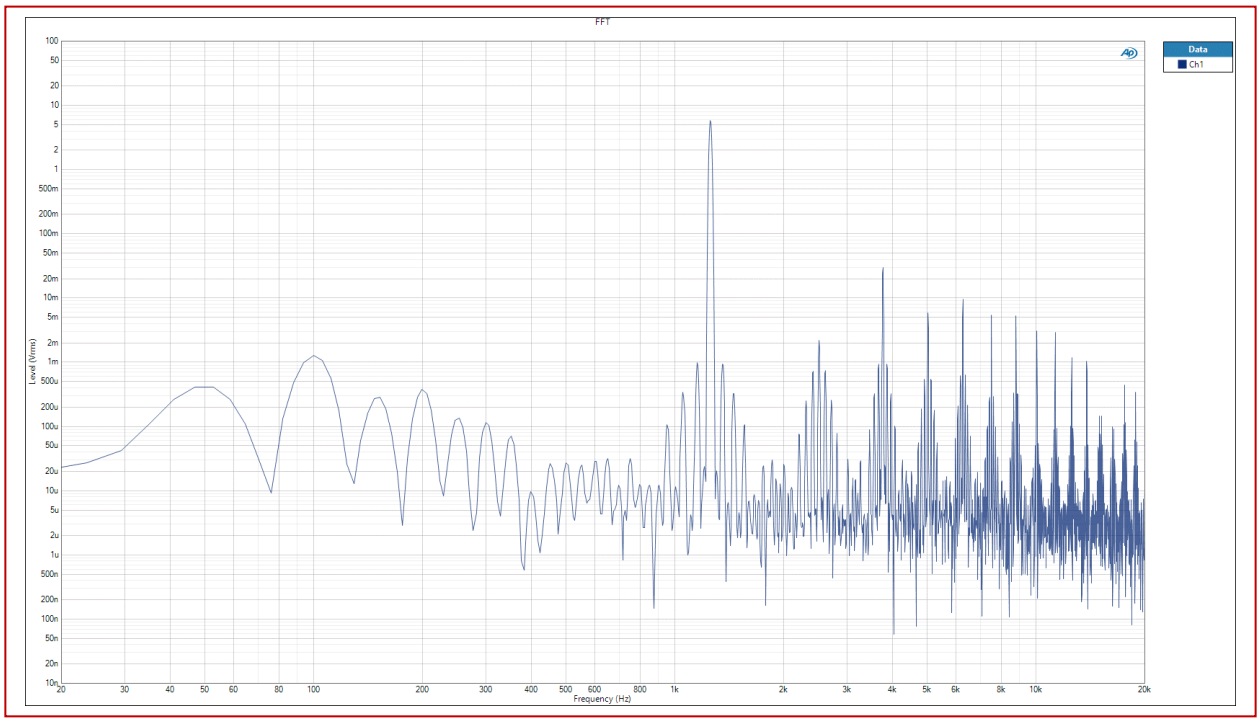
Graphe 12 : distorsion de rang harmonique pair d'ordre 2, en fonction de la fréquence, à P_{MAX}.
(Réf. THD @ 1 kHz = 1%).



Graphe 13 : distorsion de rang harmonique impair d'ordre 3, en fonction de la fréquence, à P_{MAX}. (Réf. THD @ 1 kHz = 1%).

Les échelles des graphes 12 et 13 sont identiques et montrent les caractéristiques du montage adopté.

E / Distribution spectrale des distorsions par harmoniques :



Graphe 14 : distribution de la distorsion par harmoniques à P_{MAX} (Réf. THD @ 1 kHz = 1%).

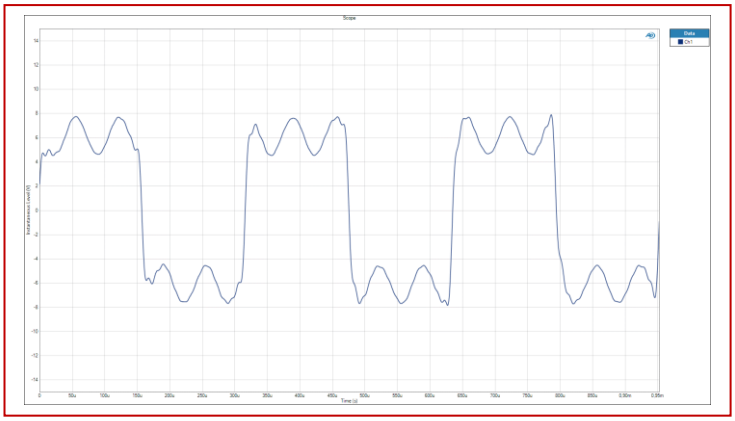
On retrouve la distribution du rang des harmoniques, mais pas de défauts ou de fréquences indésirables entre les raies obéissant aux règles de la THD.

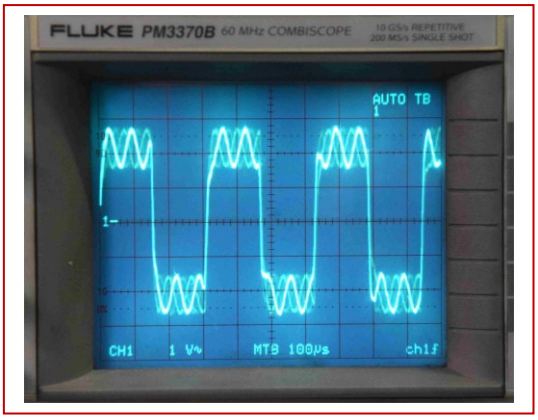
VI.4.8 – Distorsions par intermodulation dynamique (DIM ou IMD)

Méthode employée :

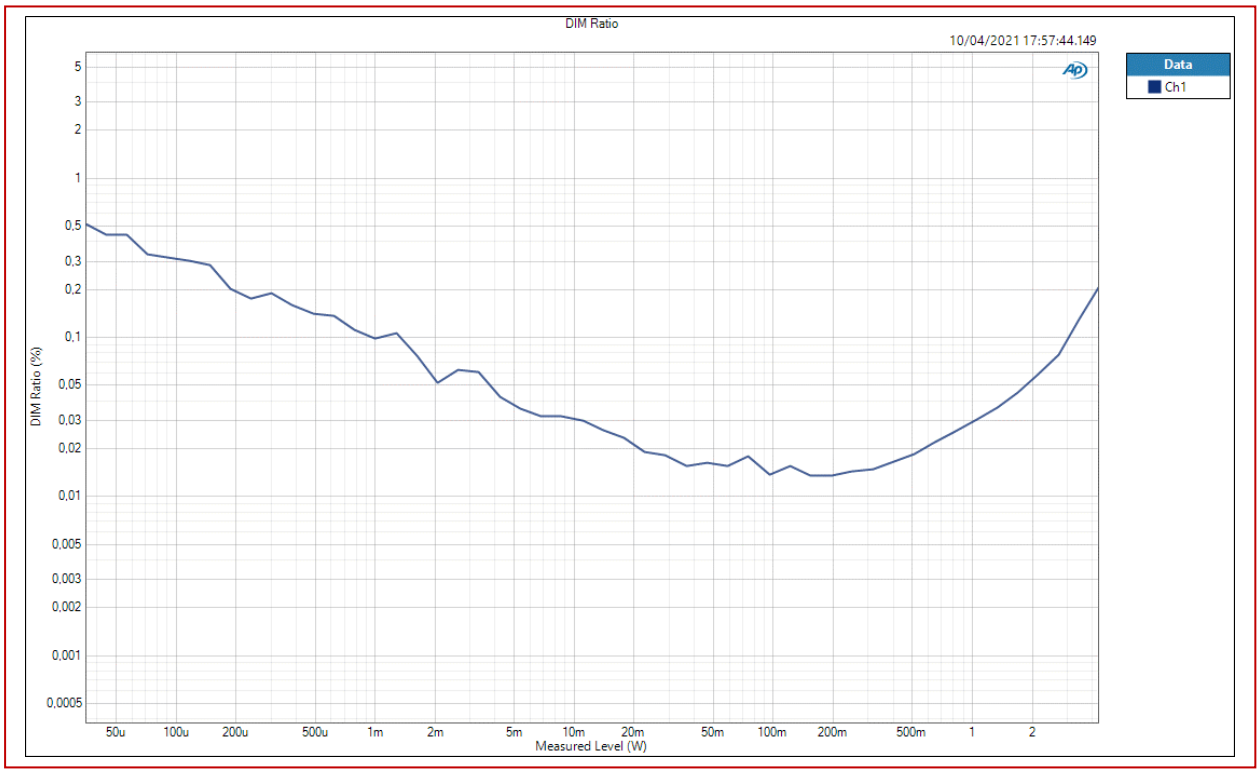
DIM signifie *distorsion d'intermodulation dynamique* (Dynamic Intermodulation Distorsion). Il s'agit d'une technique utilisée pour mesurer la non-linéarité d'un équipement et elle est conçue pour être particulièrement sensible aux distorsions produites pendant des conditions transitoires, typique des amplificateurs audio.

Dans les mesures DIM, une onde carrée de fréquence 3,15 kHz est filtrée en mode passe-bas puis combinée linéairement avec une onde sinusoïdale de fréquence 15 kHz. La norme DIM 30 mise en œuvre ici utilise un filtre passe-bas unipolaire avec une fréquence de coupure de 30 kHz.





Graphes 15 et 16 : signal de mesure en sortie de l'amplificateur avec P_{MAX} – 3 dB (Réf = THD @ 1 kHz = 1%).
DIM = 0,09 %.
Très bon résultat.

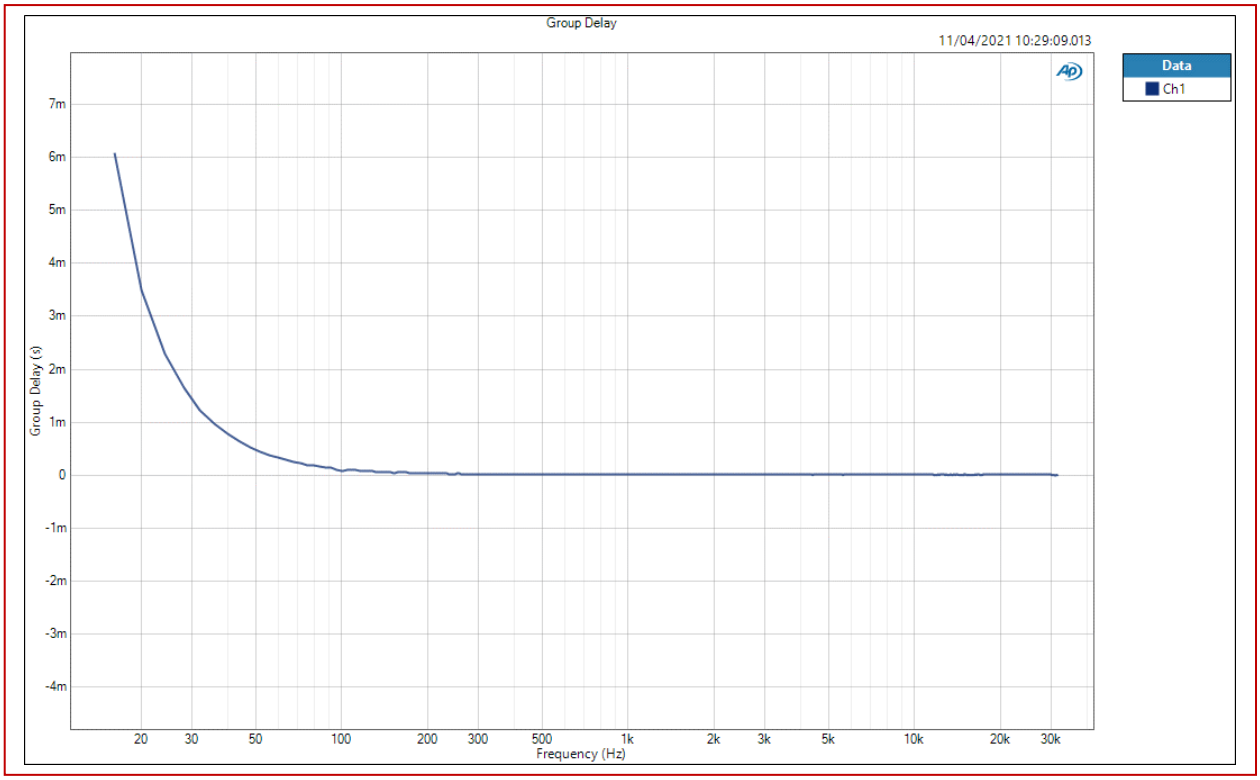


Graphe 17 : DIM en fonction de la puissance de sortie.

VI.4.9 – Retard de groupe

Méthode employée :

Le retard de groupe est la caractéristique de changement de phase de la réponse en fonction de la fréquence. C'est la dérivée négative (pente) de la caractéristique phase-fréquence d'un appareil. Un retard de groupe constant sur la bande de fréquences signifie que toutes les parties d'un signal large bande arrivent simultanément. Un retard de temps égal sur toutes les fréquences donne un tracé linéaire de niveau de phase en fonction de la fréquence. Dans un composant audio, ce tracé peut varier avec la fréquence, et le composant est censé produire une distorsion de retard de groupe.



Graphe 18 : retard de groupe à P_{MAX} (Réf = THD @ 1 kHz = 1%).

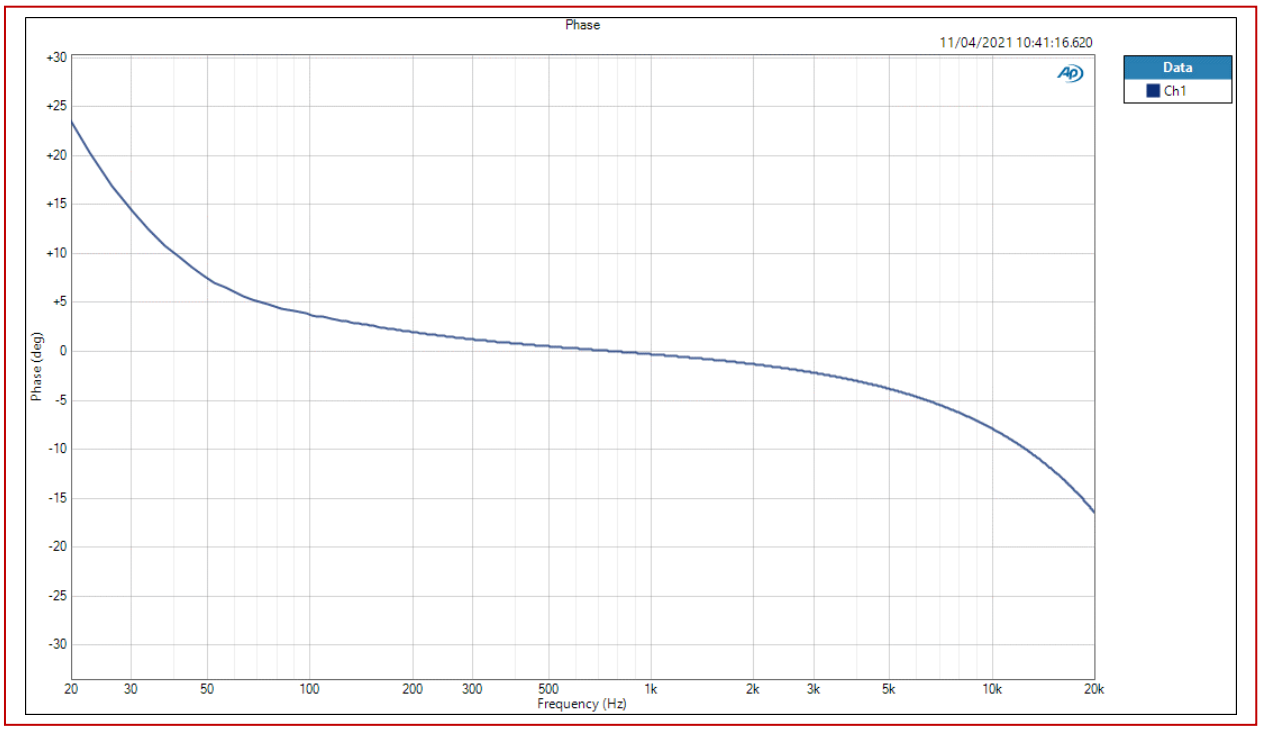
Aucun retard dans les fréquences hautes, donc pas de déformation des transitoires.

VI.4.10 – Phase

Méthode employée :

On utilise le générateur comme référence et on mesure le décalage de la phase du signal de sortie par rapport au signal de référence du générateur.

Graphe 19 page suivante.

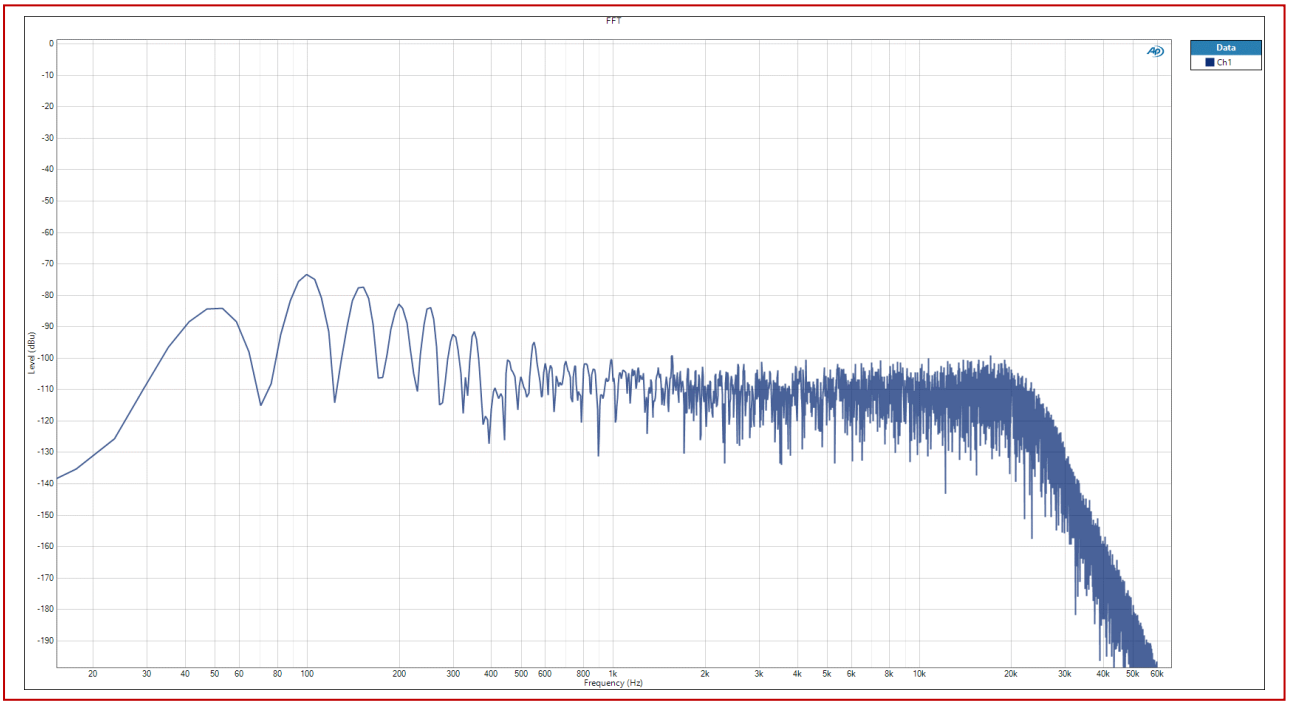


Graphe 19 : rotation de la phase en fonction de la fréquence, entre le signal d'entrée et le signal de sortie, à P_{MAX} (Réf = THD @ 1 kHz = 1%).

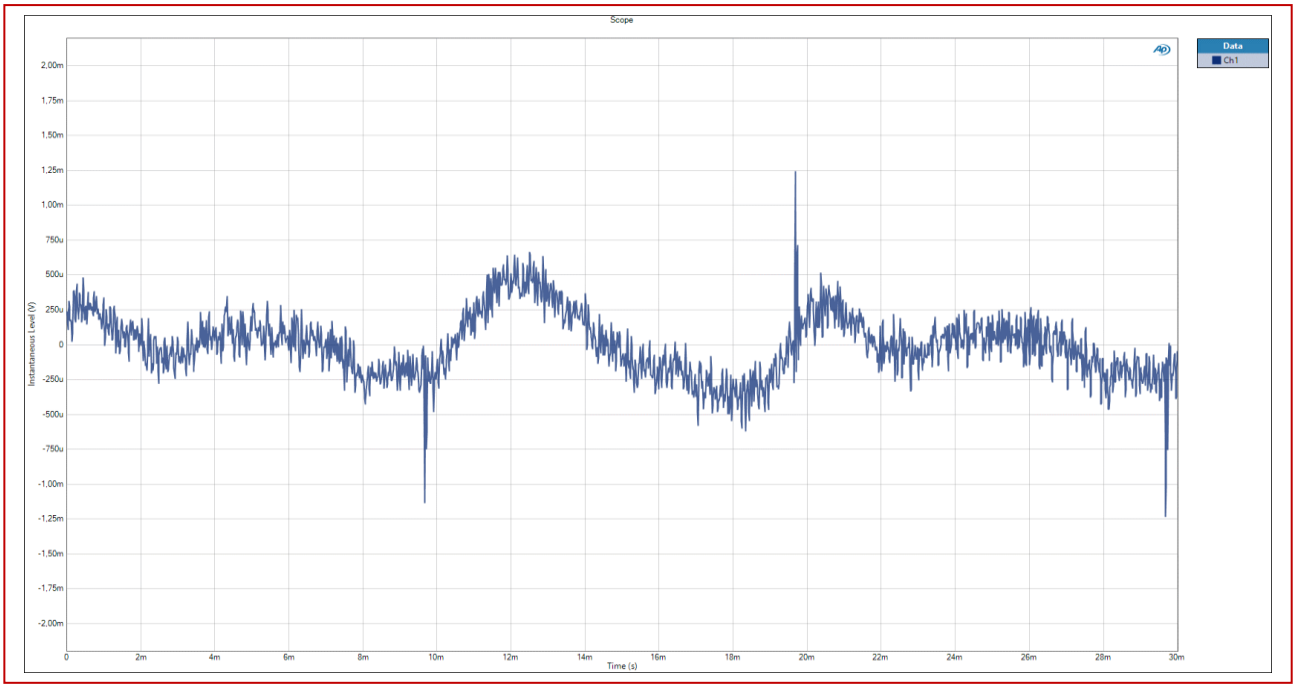
VI.4.11 – Rapport signal/bruit

Référence 0 dB = P_{MAX} pour THD = 1 % @ 1 kHz.
Entrée chargée sur R = 600 Ω.

Méthode	S/B Canal D
RMS 10 Hz / No Filter	82,7 dB
RMS 10 Hz / 90 kHz	82,7 dB
RMS 10 Hz / 20 kHz	87,0 dB
RMS 20 Hz / 20 kHz	87,1 dB
CCIR Whgt A	96,9 dB



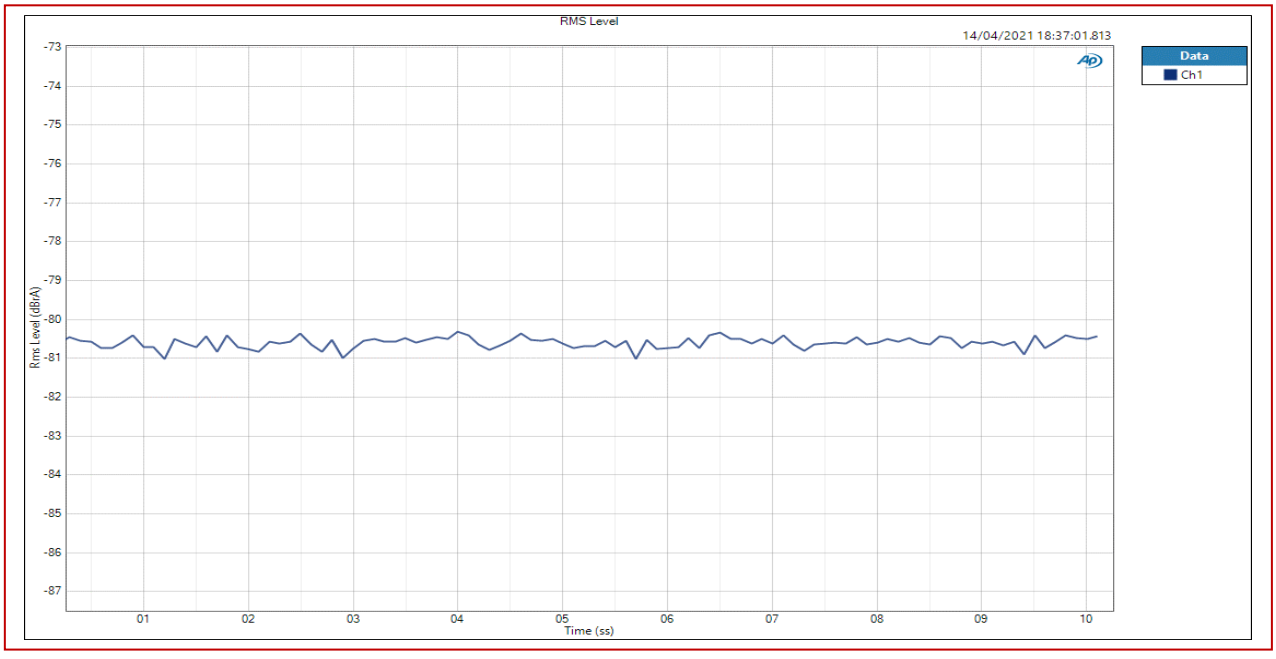
Graphe 20 : distribution spectrale du bruit.



Graphe 21 : forme temporelle du bruit.

L'ondulation très basse fréquence correspond à une agitation thermique des tubes.
Un travail sur le cheminement du réseau de masse a été effectué, ce qui a permis d'éliminer toute redondance de résiduelle notable de signal non essentiel de fréquence 50 Hz.

Les bruits transitoires n'ont pas été identifiés mais sont sans incidence sur le comportement de l'amplificateur, lorsqu'on regarde le niveau intrinsèque du bruit.
Sur le prototype représentatif de la série, avec les modules définitifs, une attention particulière sera portée sur le design des circuits de masse et sur la position des modules, afin de tenter de faire disparaître ces signaux transitoires (quelques centaines de µV…).



Graphe 22 : enregistrement du bruit sur 10 secondes.

Cet enregistrement montre la stabilité du bruit sur la durée : pas de comportement erratique du bruit ou de constats de phénomènes thermiques des tubes qui soient gênants pour les performances sonores de l'amplificateur.

Voir en **ANNEXE 1** (page 39 de ce document) le schéma de principe adopté pour le réseau de masse, ayant permis d'obtenir les résultats mesurés et rapportés dans ce présent rapport.

VII – Qualification des options

Deux options fonctionnelles sont proposées au sein de ce projet :

- ☞ Un module Audiophonics « Préampli phono RIAA » pour cellule MM, à base du CI NE5532.
- ☞ Un module AliExpress « Préampli correcteur de tonalité » à base du CI OPA2604.

Nota :
En complément, nous étudions la possibilité d'implémenter un module Bluetooth permettant de diffuser des fichiers audio stockés sur un Smartphone.
Ce type de module nécessite une validation technique, notamment en ce qui concerne la compatibilité des niveaux des tensions de sortie avec les sensibilités d'entrée de l'amplificateur.
Lorsque nous aurons identifié une solution fiable, nous mettrons à jour ce document avec le module choisi.

En ce qui concerne les options « Préamplificateur phono RIAA » et « Correcteur de tonalité », nous avons approvisionné plusieurs modules de différentes factures et origines. Nous les avons testés et mesurés, puis nous avons sélectionné ceux dont les performances et le prix nous semblaient en phase avec le projet Amplifil MKII.

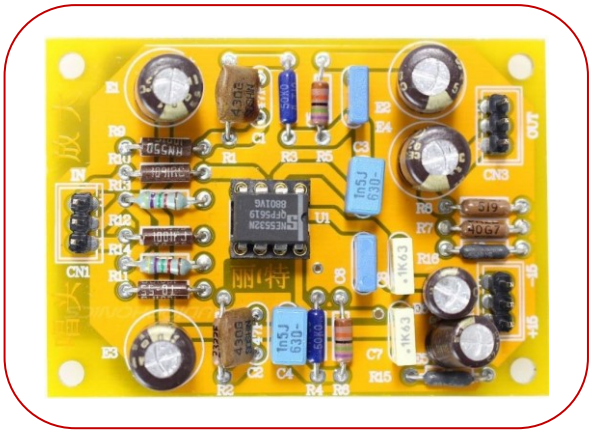
VII.1 – CONDITIONS DE MESURE

Les équipements, les conditions de mesure et les procédures de mise en œuvre sont identiques au descriptif présenté aux chapitres VI.1 et VI.2 de ce document.

VII.2 – MODULE PRÉAMPLIFICATEUR STÉRÉOPHONIQUE PHONO RIAA

Nous avons rencontré quelques déconvenues avec les modules phono identifiés çà et là sur l'internet, surtout en provenance de Chine.
Pour la totalité de ceux concernés par nos essais, mais non retenus, aucune notice de branchement, aucune donnée technique sérieuse. Pour la plupart, les caractéristiques de correction sont très éloignées de la courbe RIA, parfois de plus de 12 dB, ce qui est énorme !
Pourtant tous bénéficiaient d'une fabrication exemplaire…
Ce constat surprenant nous a obligés à choisir un modèle au coût un peu plus élevé, de fabrication chinoise, mais qui répond exactement aux caractéristiques de correction imposées par la courbe RIAA.

C'est ce modèle dont nous vous présentons ci-après les performances réellement mesurées.



Préamplificateur stéréophonique phono RIAA.

VII.2.1 – Gain

Le gain est mesuré pour un signal de sortie fixé à -3 dB de la saturation du signal, pour la fréquence la plus basse à amplifier (20 Hz).
Ensuite le gain est mesuré à la fréquence d'inflexion de la courbe RIAA : 500 Hz.

Canal Gauche		**Canal Droit**	
Gain en dB	Gain en ratio	Gain en dB	Gain en ratio
38,28	82	38,27	82

VII.2.2 – Sensibilité d'entrée / niveau de sortie

La sensibilité d'entrée et le niveau de sortie sont mesurés pour un signal de sortie fixé à -3 dB de la saturation du signal, pour la fréquence la plus basse à amplifier (20 Hz).
Ensuite le gain est mesuré à la fréquence d'inflexion de la courbe RIAA : 500 Hz.

Canal Gauche		**Canal Droit**	
Sensibilité en dBu	Sensibilité en mV	Sensibilité en dBu	Sensibilité en mV
-40	7,75	-40	7,75
Niveau de sortie en dBu	Niveau de sortie en mV	Niveau de sortie en dBu	Niveau de sortie en mV
-1,72	640	-1,73	640

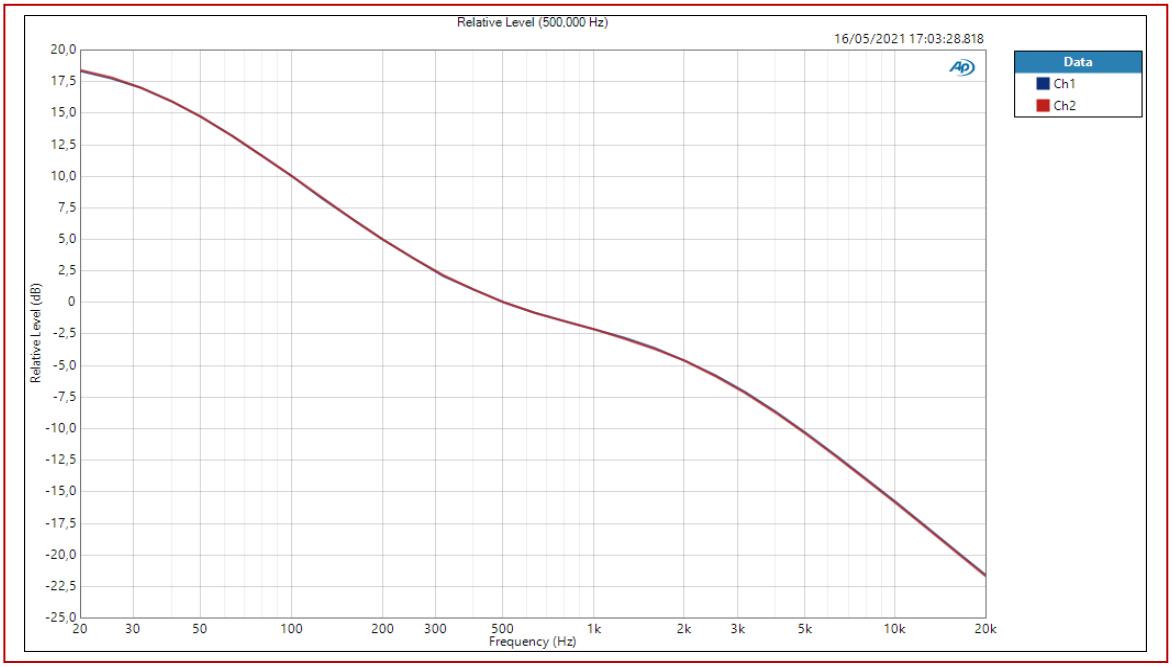
VII.2.3 – Rapport Signal / Bruit

Conditions de mesure :
Niveau d'entrée pour un gain moyen sur l'ensemble de la courbe RIAA : - 20dBu (77,5 mV).
Fréquence de référence : 500 Hz.

Canal Gauche		**Canal Droit**	
Filtre : 20 Hz / 20 kHz Détection : RMS	Norme CCIR Whgt A	Filtre : 20 Hz / 20 kHz Détection : RMS	Norme CCIR Whgt A
62 dB	85,4 dB	61,9 dB	85,2 dB

VII.2.4 – Courbe de réponse

Conditions de mesure : fréquence de référence : 500 Hz / Niveau d'entrée : -40 dBu (7,75 mV) @ 500 Hz.

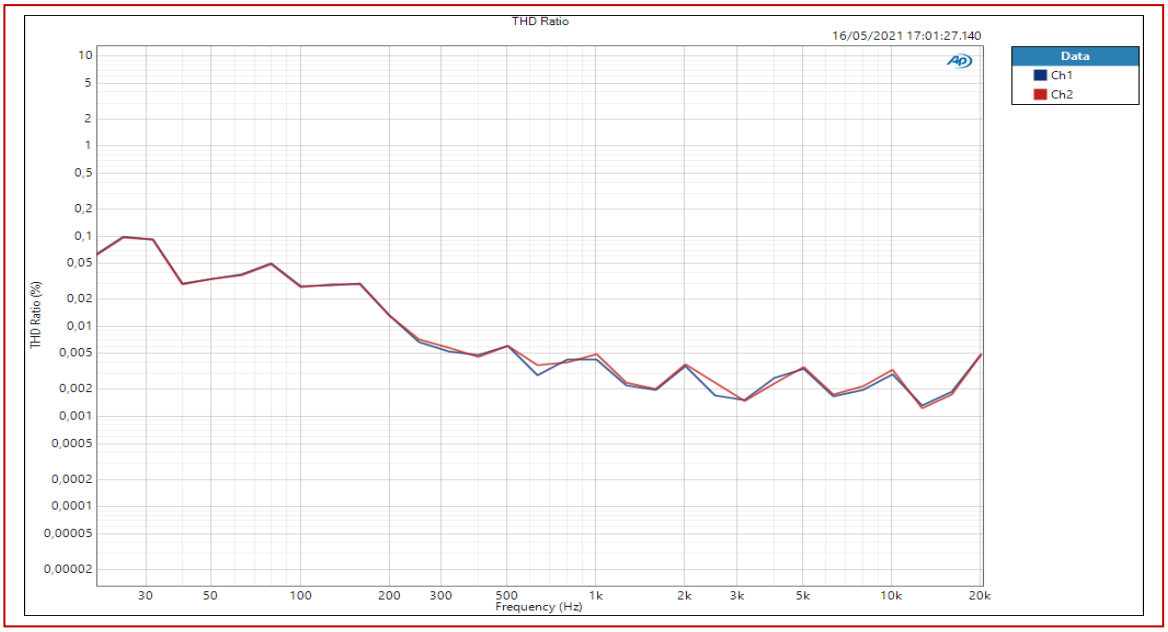


Graphe 23 : les deux canaux sont parfaitement identiques.

Le profil de la courbe RIAA est quasiment respecté. Avec une légère sur-désaccentuation dans le haut du spectre.

VII.2.5 – Distorsions par harmoniques (THD)

Conditions de mesure : fréquence de référence : 500 Hz / Niveau d'entrée : -40 dBu (7,75 mV) @ 500 Hz.

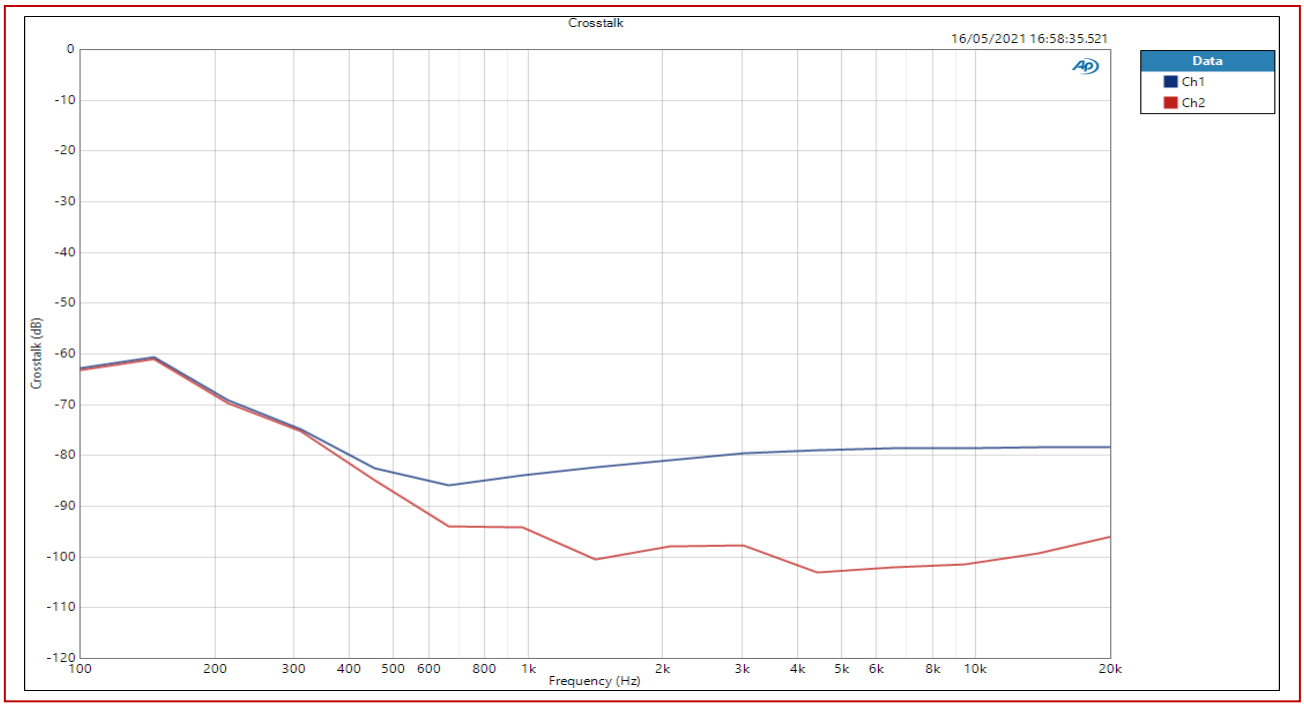


Graphe 24 : Les deux canaux sont quasiment identiques.

Le taux de distorsion (toutes les harmoniques ajoutées) ne dépasse pas 0,1 % pour passer à moins de 0,01 % au-delà de 250 Hz. Très bons résultats.

VII.2.6 – Diaphonie

Conditions de mesure : fréquence de référence : 500 Hz / Niveau d'entrée : -30 dBu (7,75 mV) @ 500 Hz.



Graphe 25 : les deux canaux présentent quelques différences sans doute imputables au design du circuit imprimé.
Courbe bleu : seul le canal droit est alimenté en audio et c'est le canal gauche qui est mesuré.
Courbe rouge : seul le canal gauche est alimenté en audio et c'est le droit qui est mesuré.

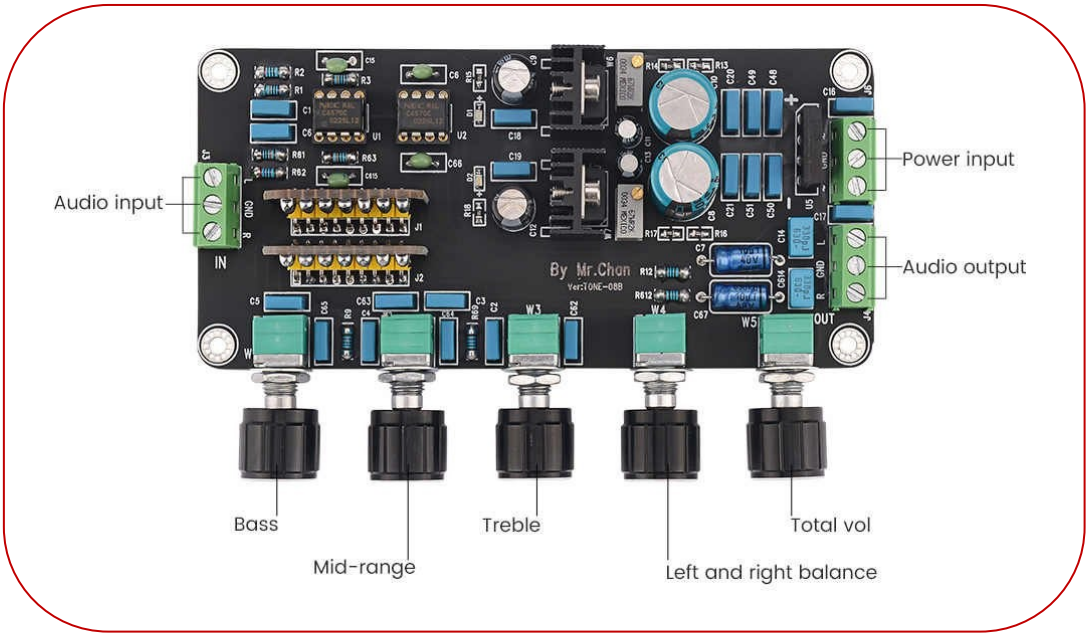
Malgré une différence observée entre les deux canaux, on constate un niveau mesuré dans les fréquences situées au-delà de 1 kHz (c'est dans cette portion haute du spectre que les performances de diaphonies sont importantes) d'environ -80 dB, dans le plus mauvais des cas (-100 dB sur le canal droit).
C'est 10 à 20 fois mieux que le meilleur enregistrement possible sur disque vinyle !
Et c'est 100 fois mieux que la séparation des canaux des bonnes cellules de lecture (exemple de diaphonie d'une cellule Shure V15-V : environ 25 dB).

VII.3 – MODULE CORRECTEUR DE TONALITÉ STÉRÉOPHONIQUE

Nous avons sélectionné un modèle proposant une correction classique de tonalité « grave / aigu », genre Baxandall et une correction « médium » permettant de jouer sur la « présence » du signal ou au contraire de creuser le spectre pour obtenir une courbe plus adaptée pour nos oreilles, lors de l'écoute à bas niveau sonore.

La fabrication est irréprochable et le module est livré avec deux jeux différents de circuits intégrés qui raviront les puristes soucieux de tester les différentes technologies :
Les deux types de circuits proposent de très hautes performances audio en matière de distorsion, de temps de montée ultra rapide et de bruit de fond très bas.
Le circuit OPA2604 est organisé autour d'une entrée sur transistors FET.
Le circuit C4570C dispose d'une entrée sur transistors bipolaires.
Toutes les mesures que nous avons effectuées sont similaires pour les deux circuits, sauf pour le rapport signal à bruit, légèrement à l'avantage du C4570C (voir plus loin, chapitre VII.3.5).

VII.3.1 – Présentation



La figure ci-dessus montre les différents points de réglage de cet ensemble stéréophonique complet.

Le fait que le module intègre un réglage de « balance » et de « volume » pourrait permettre de se passer de ces commandes sur la partie de l'amplificateur de puissance, si l'option « Correcteur de tonalité » est retenue.

Un des avantages de ce circuit est qu'il intègre la section redressement/filtrage/régulation de l'alimentation ±DC. Il suffit donc de l'alimenter en 2 x 15 VAC directement à partir de l'enroulement du transformateur d'alimentation.
C'est cette configuration que nous avons adoptée pour nos mesures de qualification.

VII.3.2 – Gain

Ce module n'est pas un préamplificateur mais un correcteur de tonalité. Pour tenir ce rôle il suffit seulement que le niveau de sortie pour chacun des deux canaux soit au moins égal au niveau d'entrée (gain de 1).

Ce module respecte tout à fait cette condition minimale et permet même une légère amplification du signal, en fonction de la position du potentiomètre de volume.

Conditions : le gain est mesuré pour un signal de sortie fixé à -3 dB de la saturation du signal, fréquence 1 kHz, potentiomètre de volume à la position maximale, potentiomètre « balance » au centre.

Canal Gauche		**Canal Droit**	
Gain en dB	Gain en ratio	Gain en dB	Gain en ratio
10,9	3,51	10,9	3,51

VII.3.3 – Niveau de sortie / sensibilité totale

Le niveau de sortie maximum exploitable est mesuré en augmentant le niveau du signal d'entrée pour obtenir un signal de sortie avec un taux de distorsion (THD) de 0,1 %, à la fréquence de 1 kHz.

Tableau des résultats, page suivante.

Canal Gauche		Canal Droit	
Niveau sortie max en dBu	Niveau sortie max en V	Niveau sortie max en dBu	Niveau sortie max en V
+19,5	7,32	+19,8	7,57

Pour 1 % de THD, le niveau de sortie est de +19,8 dBu (G) et +20dBu (D) @ 1kHZ.

On le constate, la réserve est grande !

Nos mesures ont démontré que l'amplificateur de puissance nécessitait un signal AF d'entrée de -1,8 dBu (628 mV) pour atteindre sa puissance de sortie maximale avec 1 % de THD (voir chapitre VI.4.3).

Si l'on raccorde directement les sorties de ce correcteur aux entrées de l'amplificateur de puissance, on peut déterminer quelle sera la sensibilité réelle de l'ensemble, avec le potentiomètre de volume du module correcteur au maximum et la puissance de sortie de l'amplificateur au maximum (pour 1 % de THD).
Sensibilité : U_{in} Ampli - Gain du correcteur = -1,8 dBu - 10,9 dB = -12,7 dBu soit 180 mV.
Cela laisse une grande marge de manœuvre pour y raccorder à peu près tout équipement disposant d'une sortie haut niveau, même les plus anciens appareils hifi dont les niveaux des sorties étaient parfois plus bas que ceux des équipements plus modernes.

VII.3.4 – Caractéristiques du réglage de la balance

Conditions de mesure :
Potentiomètre « volume » au maximum.
Potentiomètres de réglage des tonalités, au centre.
Fréquence de référence : 1 kHz.
Niveau d'entrée fixé pour obtenir 0 dBu sur la sortie de chaque canal, potentiomètre « balance » réglé au centre.

Position du potentiomètre de balance	Niveau de la sortie relevé sur le Canal Gauche	Niveau de la sortie relevé sur le Canal Droit
Au centre	0 dBu (775 mV)	0 dBu (775 mV)
À fond, à droite	-51,2 dBu (2,13 mV)	+0,09 dBu (776 mV)
À fond, à gauche	+0,09 dBu (776 mV)	-49,8 dBu (2,5 mV)

Le fonctionnement du réglage de la balance est donc de type à « atténuation totale ».
Lorsque la commande est placée au maximum à gauche, le niveau de sortie sur le canal droit est quasiment coupé (reste 2,5 mV), et vice-versa lorsque le bouton de commande est placé à fond à droite.

VII.3.5 – Rapport Signal / Bruit

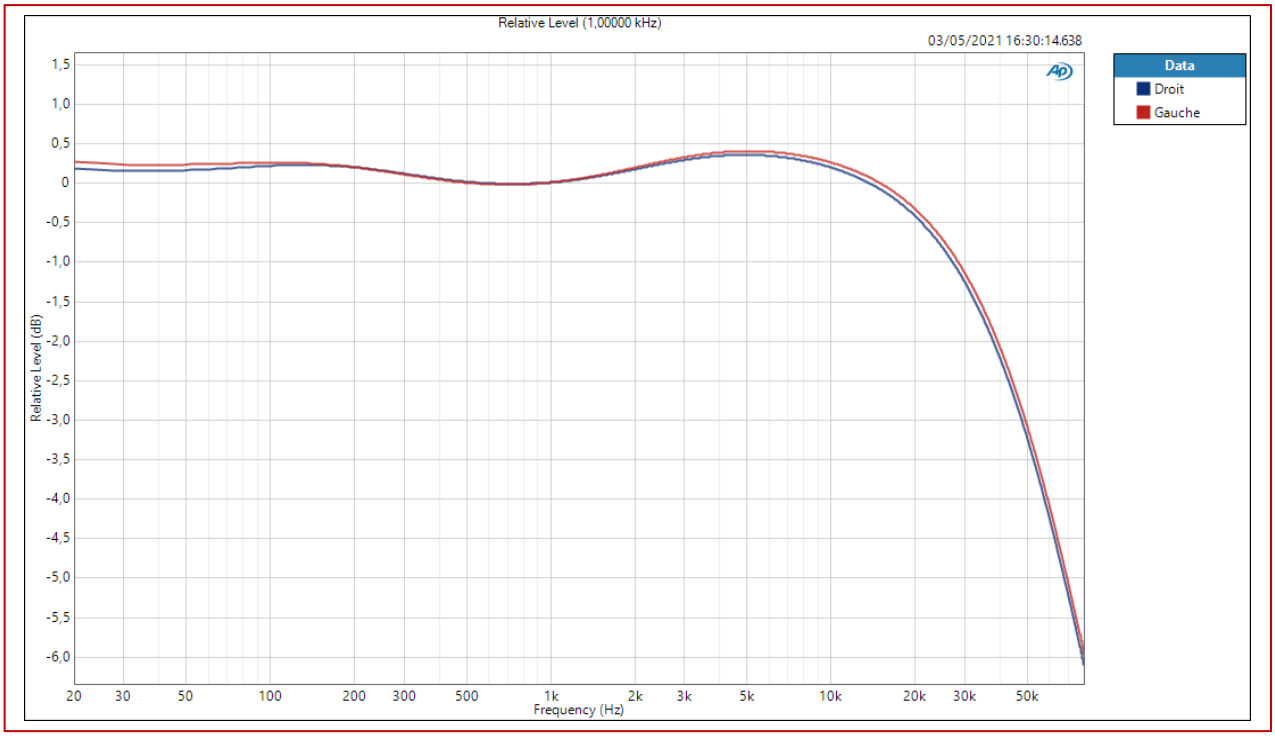
Conditions de mesure :
Potentiomètre « volume » au maximum.
Potentiomètre « balance » au centre.
Potentiomètres de réglage des tonalités, au centre.
Niveau d'entrée de référence : 0 dBu (0,775 V).
Fréquence de référence : 1 kHz.

	Canal Gauche		Canal Gauche	
Méthode	CI C4570C	CI OPA2604	CI C4570C	CI OPA2604
20 Hz / 20 kHz - RMS	87,7 dB	85 dB	90,7 dB	88,2 dB
CCIR – Wght A	99,2 dB	99 dB	102 dB	101 dB

Ces niveaux sont en phase avec les performances de l'amplificateur de puissance.
Ce préamplificateur est donc parfaitement compatible avec les contraintes fixées dans ce projet.

VII.3.6 – Courbe de réponse sinusoïdale

Conditions de mesure :
Niveau de référence : niveau d'entrée fixé à 0 dBu (775 mV) @ 1 KHz.
Courbe de réponse réalisée en mode automatique.



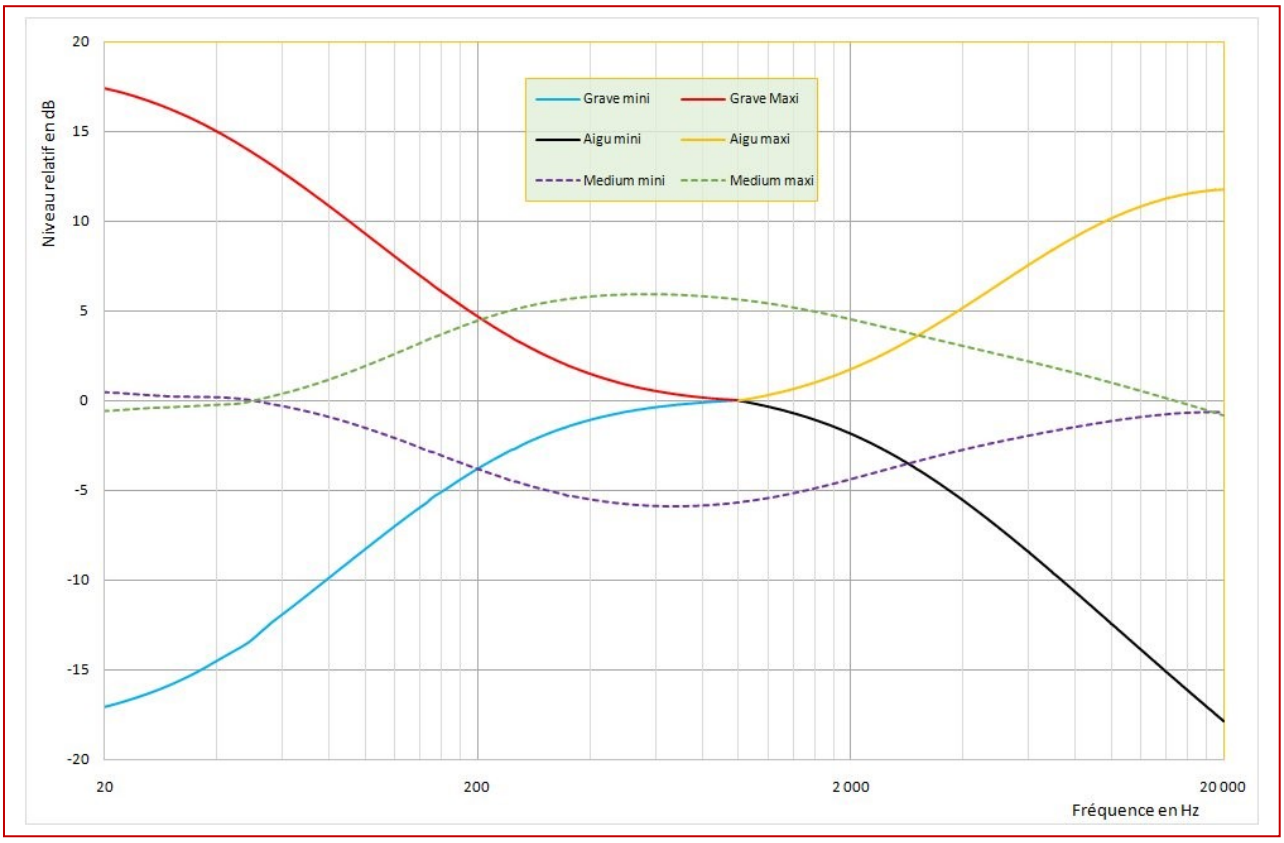
Graphe 26 : courbe de réponse sans filtre ni limitation, relevée de 15 Hz à 80 kHz.
Réf : 0 dB pour F = 1 kHz.

Bonne linéarité générale.

Il est délicat d'obtenir une réponse totalement plane car il faut placer les trois potentiomètres de correction (grave, médium, aigu) parfaitement centrés ; mais compte tenu des tolérances des potentiomètres, la meilleure linéarité est obtenue lorsque les repères des boutons ne sont pas nécessairement exactement à la verticale.
Si l'incidence est faible, les puristes préféreront monter un interrupteur « bypass » pour attaquer directement l'amplificateur de puissance en évitant le module correcteur, s'ils souhaitent une courbe de réponse rigoureusement linéaire.
Au niveau des performances, la fréquence haute à -3 dB est située aux alentours de 50 kHz.
Les deux canaux sont parfaitement symétriques, ce qui est un point important.

VII.3.7 – Efficacité des corrections

Conditions de mesure :
Niveau de référence : niveau d'entrée fixé à -10 dBu (245 mV) @ 1 KHz
Courbe de réponse réalisée en mode automatique à séquences multiples.



Graphe 27 : courbes de réponse avec différentes positions des potentiomètres de tonalité.
Il s'agit de mesures relatives avec une référence des fréquences centrales des correcteurs ramenée à 0 dB.
Afin de ne pas surcharger le graphique, seul le canal gauche est représenté, mais les mesures effectuées montrent une parfaite similitude entre les deux canaux.

Courbe rouge : commande du correcteur de grave au maximum = +17 dB à 20 Hz.
Courbe bleu : commande du correcteur de grave au minimum = -16,5 dB à 20 Hz.

Courbe jaune : commande du correcteur d'aigu au maximum = +12 dB à 20 kHz.
Courbe noire : commande du correcteur d'aigu au minimum = -17,7 dB à 20 kHz.

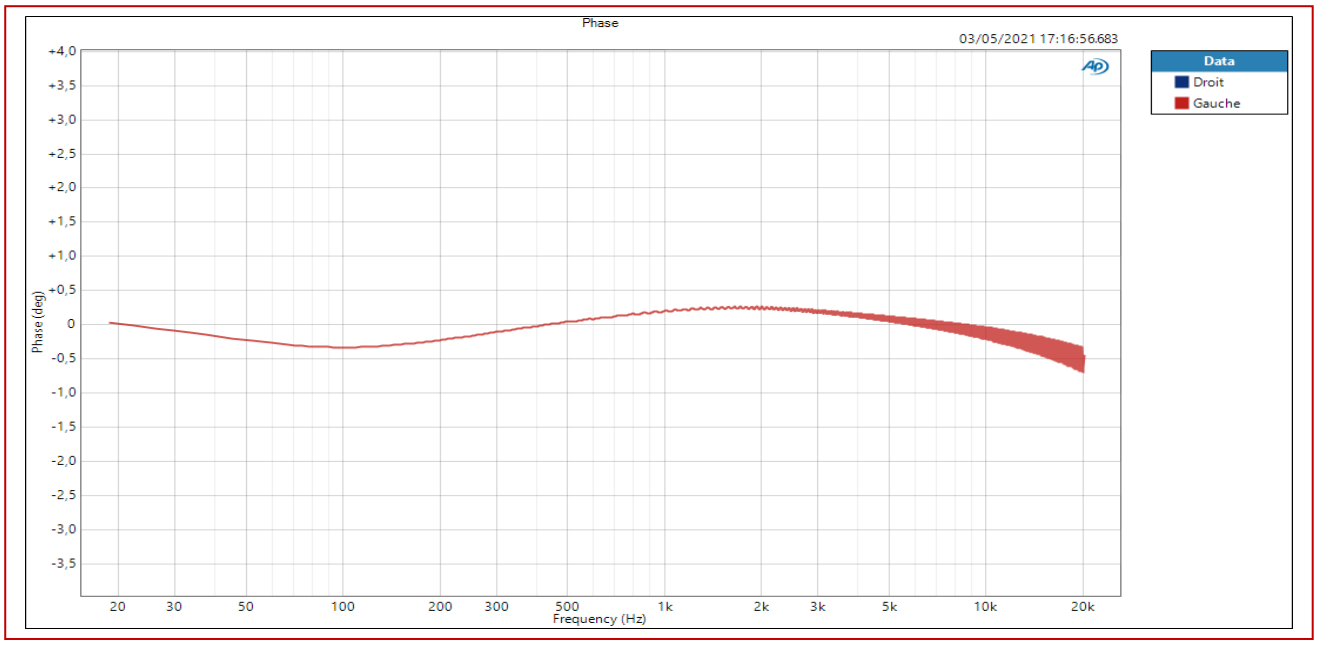
Courbe pointillée verte : commande du correcteur médium au maximum = +6 dB à 600 Hz.
Courbe pointillée violette : commande du correcteur médium au minimum = -5,8 dB à 600 Hz.

Ces performances sont classiques, mais on appréciera le comportement du correcteur de médium lors de l'écoute de certains vinyles parfois agressifs dans cette gamme de fréquences.

VII.3.8 – Phase

Méthode employée :

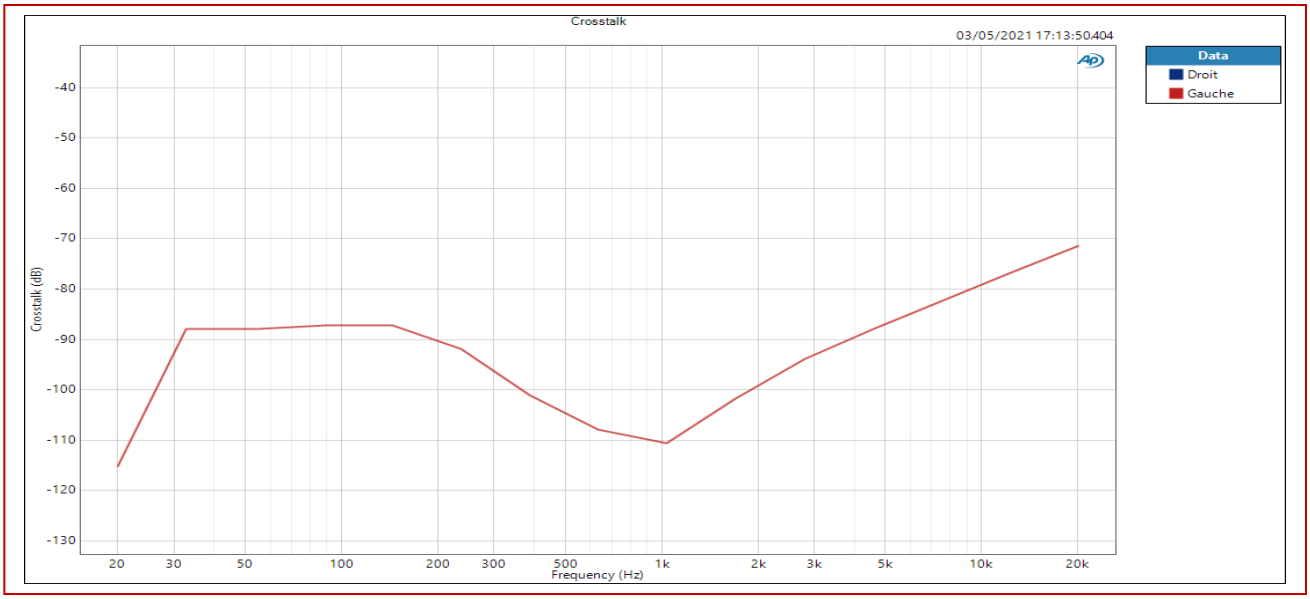
On utilise le générateur comme référence et on mesure le décalage de la phase du signal de sortie par rapport au signal de référence du générateur.



Graphe 28 : rotation de la phase en fonction de la fréquence, entre le signal d'entrée et le signal de sortie, avec un signal sinusoïdal de niveau 0 dBu (775 mV) en entrée. RAS, tout est correct.

VII.3.9 – Diaphonie

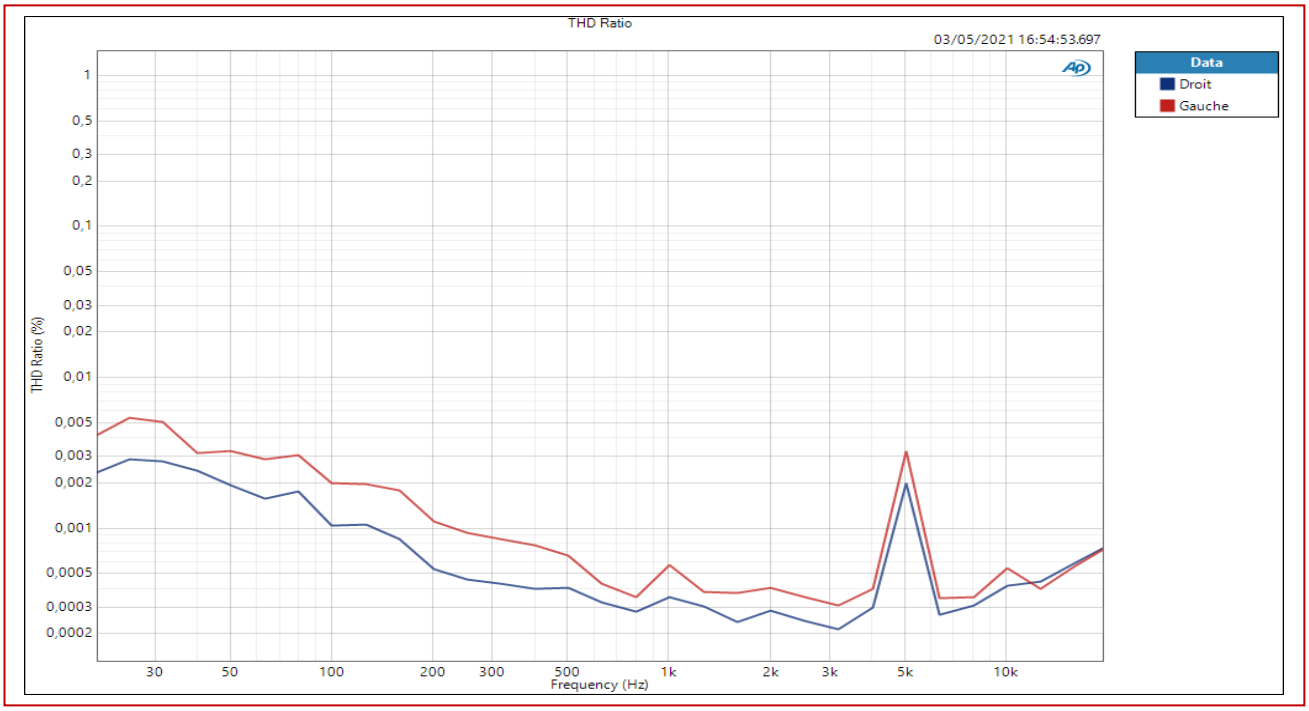
Conditions de mesure : fréquence de référence : 1 kHz / Niveau d'entrée : 0 dBu (775 mV).



Graphe 29 : la diaphonie est excellente (-80 dB à 10 kHz) c'est-à-dire très proche du bruit de fond.
Le canal droit est doté de performances similaires.

VII.3.10 – Distorsion par harmoniques (THD)

Conditions de mesure : fréquence de référence : 1 kHz / Niveau d'entrée : 0 dBu (775 mV).

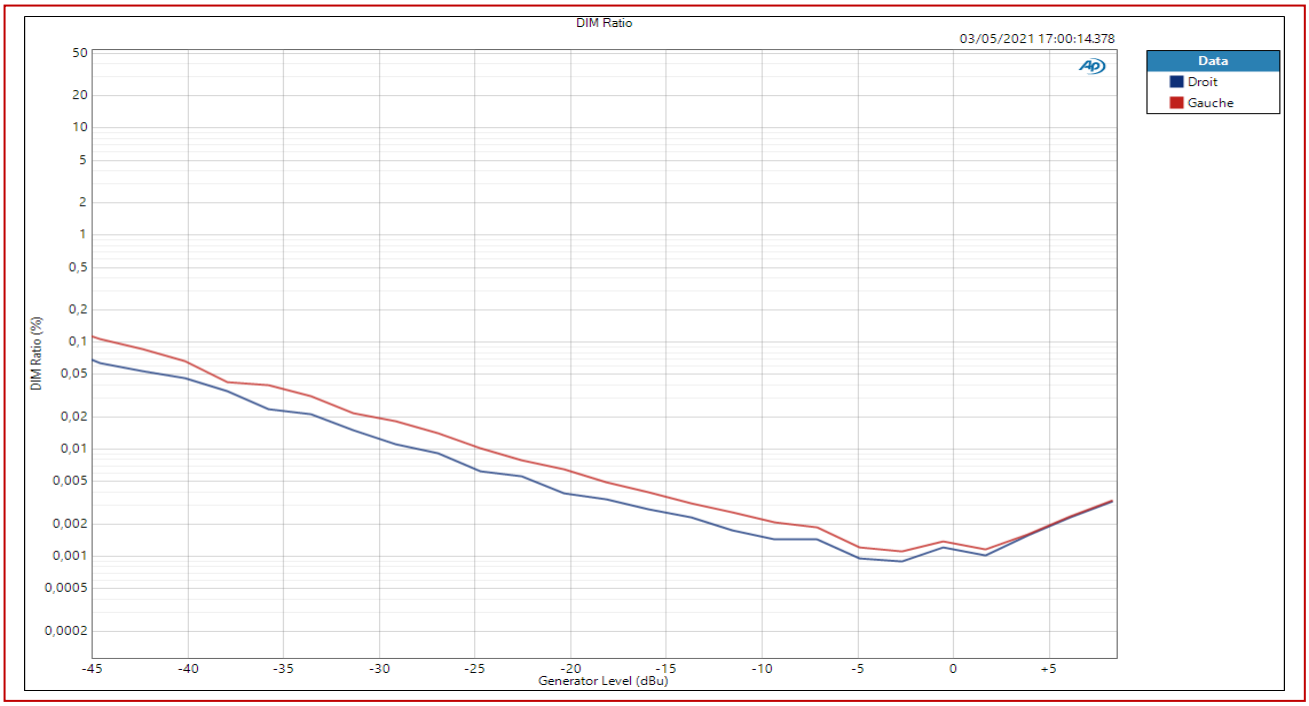


Graphe 30 : représentation de la somme des harmoniques relevée en fonction de la fréquence fondamentale, entre 20 Hz et 20 kHz.

Résultats excellents. Le taux reste, pour la plupart des fréquences, très inférieur à 0,005 %.

VII.3.11 – Distorsions par intermodulation dynamique (DIM ou IMD)

Méthode employée : voir chapitre VI.4.8.



Graphe 31 : dans la zone de travail (-20 dBu à 0 dBu) la distorsion par intermodulation dynamique reste inférieure à 0,01 %.

VII.4 – MODULE RECEPTEUR BLUETOOTH

Ce chapitre sera développé dans une édition ultérieure du document, lorsque nous aurons identifié, puis qualifié un module standard du marché.

Pages suivantes : annexes au rapport.

ANNEXES

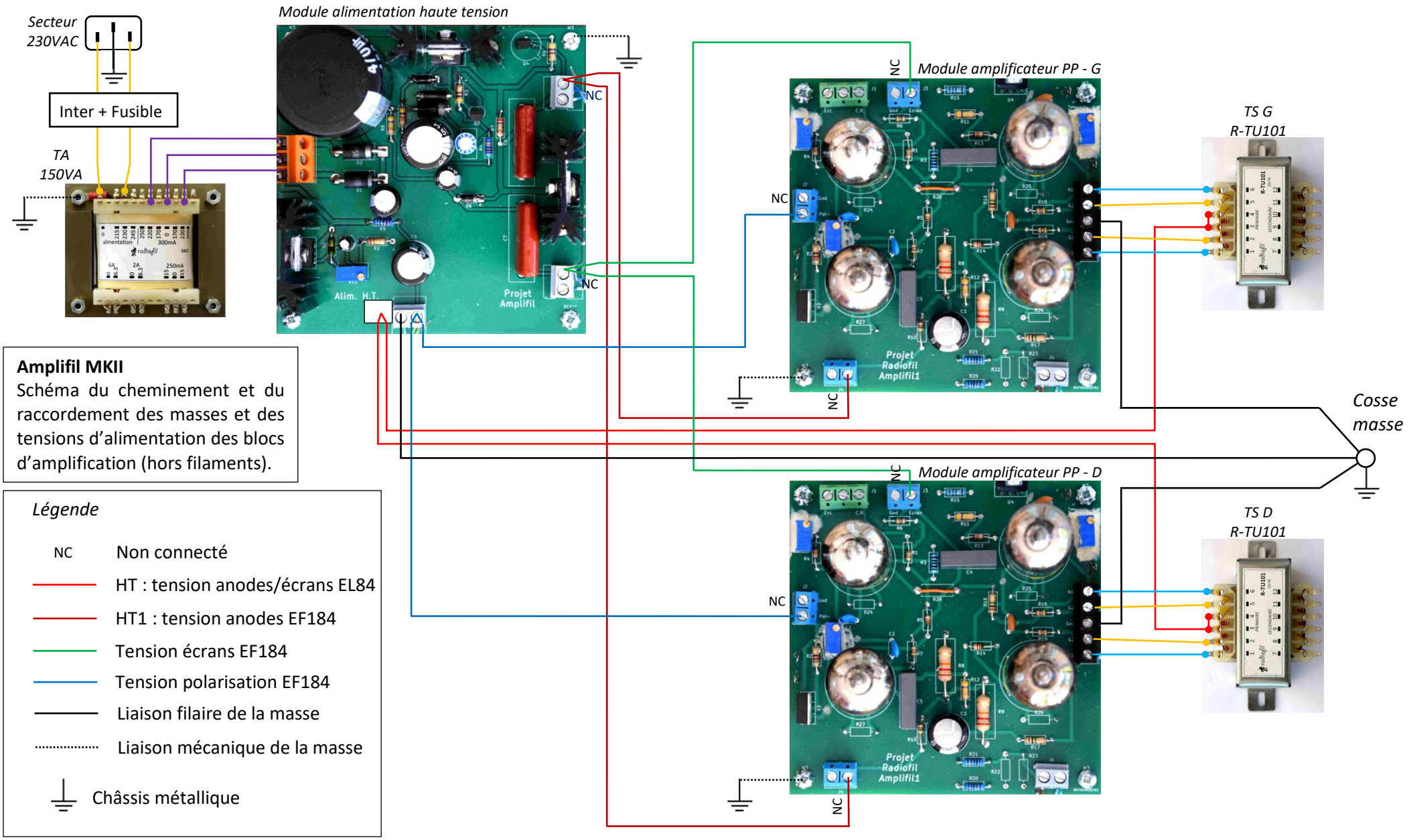
ANNEXE 1 – ÉTUDE D'UN RÉSEAU OPTIMISÉ DU CÂBLAGE DES MASSES

Plusieurs essais et approches successives ont été nécessaires pour obtenir les performances de bruit mesurées lors des diverses sessions de qualification de l'amplificateur.
Outre les précautions d'usage connues et l'expérience de l'équipe, il est parfois nécessaire de mettre en œuvre diverses approches, jugées empiriques, pour identifier les meilleurs câblages de l'ensemble des circuits de masse.
Une fois le design en place, il est ensuite nécessaire de s'assurer de la stabilité et de la robustesse du réseau ainsi câblé (température, diverses puissances de sortie en fonctionnement, susceptibilité aux rayonnants extérieurs, transformateurs, proximité d'autres équipements, etc.).

La prescription de raccordement inter modules répondant aux critères de protection définis, est déterminée suivant le câblage proposé page 40.
La cosse de masse vissée ou soudée sur le châssis est placée entre les deux transformateurs de sortie.

Le câblage de la contre-réaction globale doit faire l'objet d'une attention particulière et d'un strict respect du schéma proposé en page 41.
Les tresses des câbles blindés ne doivent être utilisées que pour le blindage du signal et non pour son transport. C'est pourquoi elles ne sont raccordées que d'un seul côté (du côté de la destination du signal).
Le point froid du signal relié au 0 volt est assuré par l'un des 2 conducteurs du câble blindé (fil noir).

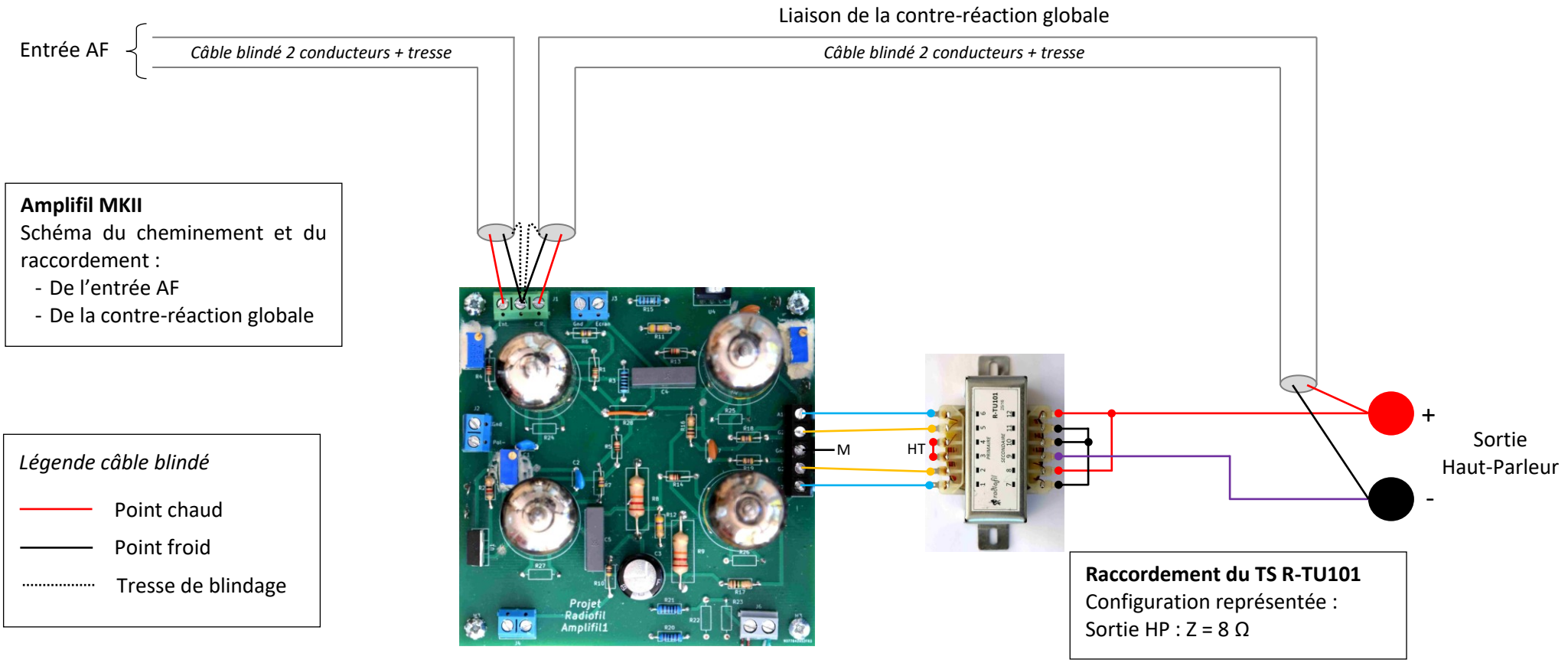
C'est dans cette configuration générale de câblage du prototype (canal d'amplification câblé sur CI), que les meilleurs résultats ont été obtenus, en matière de rapport signal/bruit.



Amplifil MKII
Schéma du cheminement et du raccordement des masses et des tensions d'alimentation des blocs d'amplification (hors filaments).

Légende

NC	Non connecté
———	HT : tension anodes/écrans EL84
———	HT1 : tension anodes EF184
———	Tension écrans EF184
———	Tension polarisation EF184
———	Liaison filaire de la masse
·····	Liaison mécanique de la masse
⏚	Châssis métallique



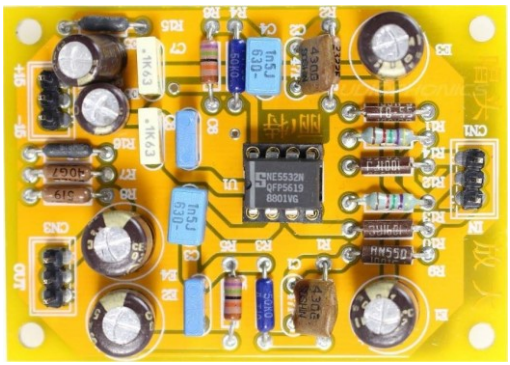
Important :

Entrée AF : la tresse du câble blindé est **seulement** reliée sur la cosse de masse du bornier du bloc d'amplification avec le fil noir (retour de masse du signal AF).

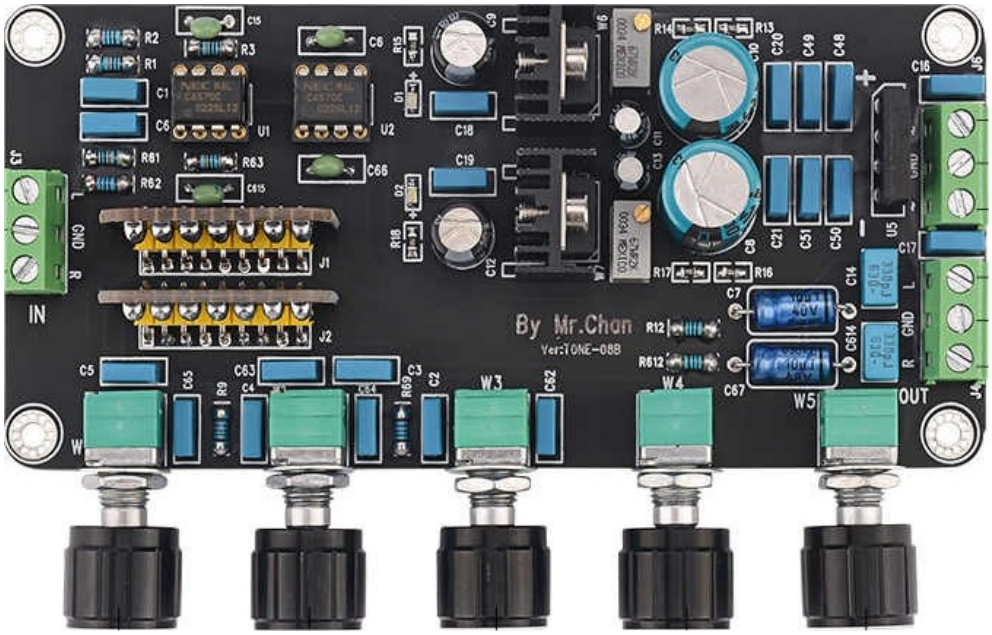
Contre-réaction : la tresse du câble blindé est **seulement** reliée d'un seul côté du câble : sur la cosse de masse du bornier du bloc d'amplification avec le fil noir issu de la borne « moins » de la sortie HP.

ANNEXE 2 – AUTRES DOCUMENTATIONS ET INFORMATIONS

Représentation du préamplificateur RIAA à l'échelle 1.



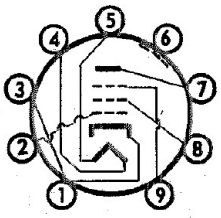
Représentation du correcteur de tonalité à l'échelle 1.



Brochage du tube électronique **EF184**

Fig. 0xx

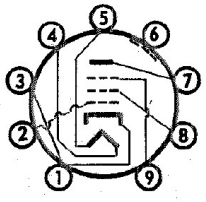
Fig. 0xx



Brochage du tube électronique **EL84**

Fig. 0xx

Fig. 0xx



Repérage des broches du circuit intégré régulateur **LM317**

Fig. 0xx

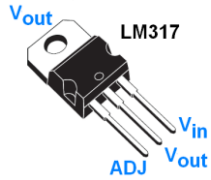
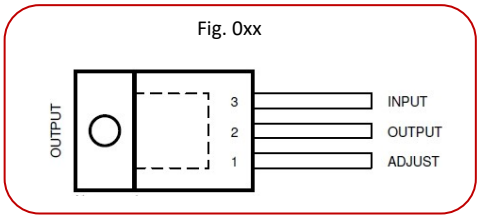


Fig. 0xx



Fin du document