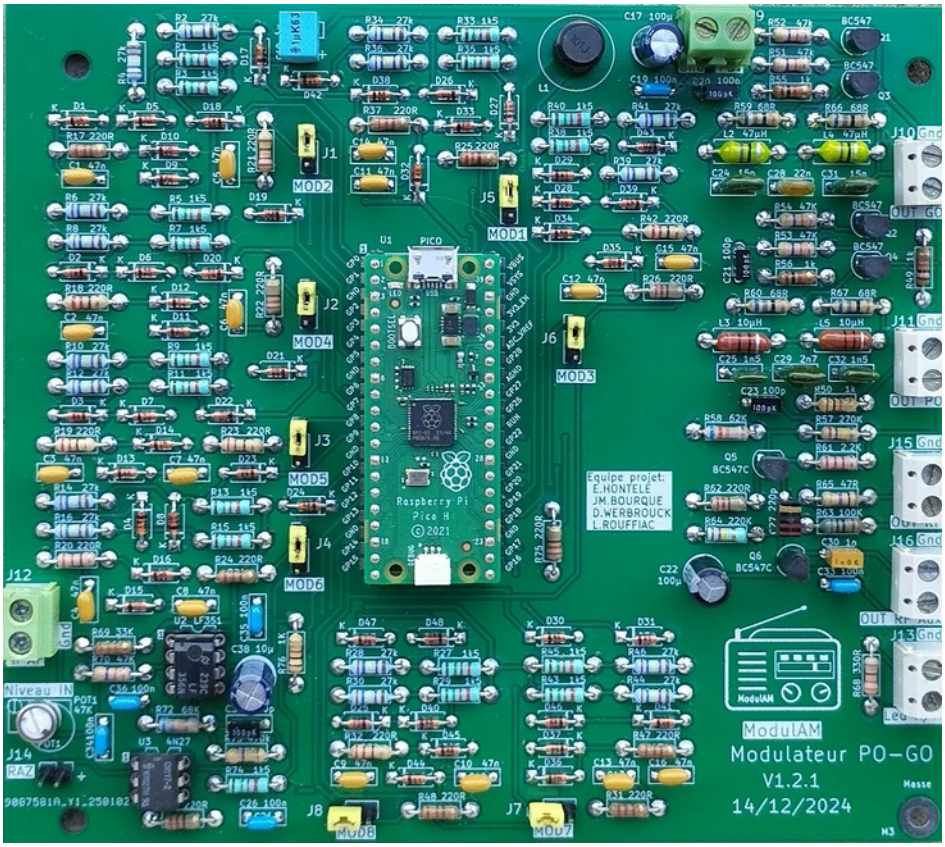
ModulAM
Essais et mesures par F6EGK



À la mémoire de Philippe F0ELT

Table des matières

1. Objectifs des essais et mesures....3
2. Banc d'essais et de mesures....4
3. Méthodes alternatives de mesure à l'analyseur de spectre....6
3.1 Mesure de Taux AM....6
3.2 Mesure de TDH....7
3.3 Mesure de SINAD....9
4. Évaluation de références alternatives à l'amplificateur opérationnel LF 351A....11
4.1 Contexte....11
4.2 Conditions de mesure....11
4.3 Résultats et commentaires....11
5. Comportement en situation de modulation externe de plus d'un modulateur....14
5.1 Contexte....14
5.2 Conditions de mesure....14
5.3 Résultats et commentaires....14
6. Évaluation de la qualité individuelle des signaux modulés....19
6.1 Contexte....19
6.2 Conditions de mesure....19
6.3 Résultats et commentaires....19
6. Conclusion....22

1. Objectifs des essais et mesures

Les investigations rapportées dans ce document sont complémentaires à celles entreprises par l'équipe qui a développé le ModulAM. Elles concernent plus particulièrement l'évaluation des performances de la qualité des signaux modulés, suivant différents scénarios d'utilisation. Les cas de figure suivants sont notamment considérés :

- extension des investigations portant sur le choix alternatif d'un amplificateur opérationnel, en substitution au modèle de référence LF351 (U2A) ;
- analyse du comportement, si la source audio de modulation externe est dirigée vers plus d'un modulateur ;
- évaluation de la qualité individuelle des signaux modulés, pour le plan de diffusion ModulAM_Usine (tous modulateurs actifs).

Les documents de référence sont ceux édités par l'équipe de conception du ModulAM à la date de rédaction de ce document :

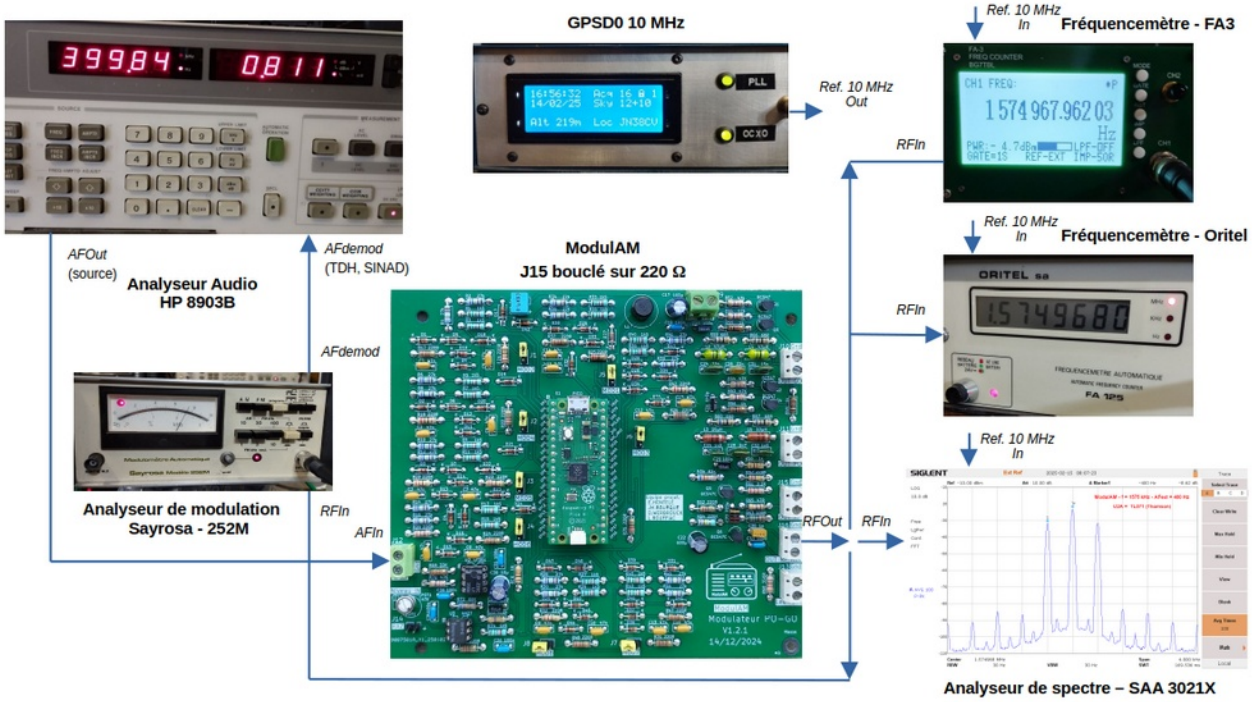
- notice générale v1.2 ;
- rapport de test amplificateur opérationnel entrée AF EXT v1.1 ;
- synthèse des mesures et tests de qualification v1.0 ;
- schéma de principe v1.2.1.

Le logiciel embarqué dans le ModulAM (Orange Pi Zéro 2) à la date de ces essais et mesures, est en version 1.0.

Les chapitres qui suivent se rapportent respectivement :

- à la description du banc d'essais et mesures, ainsi qu'aux principales caractéristiques et limites des équipements utilisés, dans le contexte de ces investigations ;
- aux méthodes alternatives de mesures mises en œuvre ;
- aux résultats obtenus et à leurs commentaires.

2. Banc d'essais et de mesures



L'équipement HP 8903B intègre la source audio de référence *AFOut*, ainsi que l'analyse du signal *AFdemod*, issu de la démodulation du signal *RFOut* produit par le ModulAM. Ses caractéristiques de base sont :

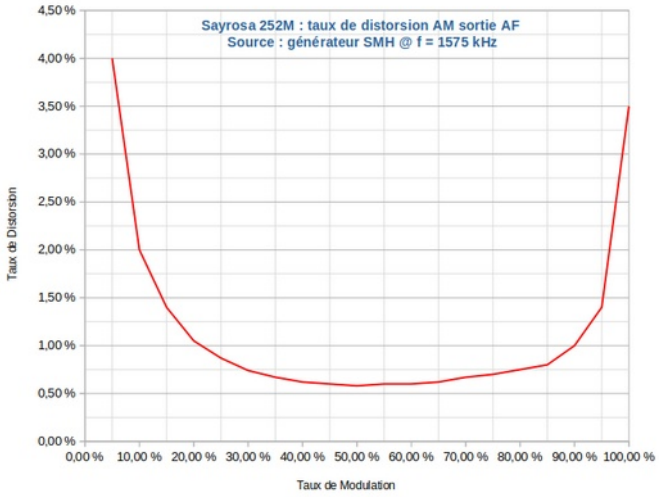
- Taux de Distorsion Harmonique : 0,04 % pour AFdemod = 400 mVeff à 800 Hz (1)
- Valeur SINAD plafond : 68 dB pour AFdemod = 400 mVeff à 800 Hz (1)

(1) La valeur de 400 mVeff est équivalente à celle issue de l'analyseur de modulation Sayrosa 252M (*AFdemod*) obtenue pour un taux de modulation AM de 75 % du ModulAM (un seul modulateur actif).

Dans la suite de ce document, les paramètres ci-dessus sont respectivement notés TDH, SINAD, Taux AM.

L'équipement Sayrosa 252M assure la démodulation du signal *RFOut* issu du ModulAM. Il permet une lecture analogique directe du Taux AM, et délivre le signal démodulé *AFdemod* aux fins de mesures par l'analyseur audio HP 8903B, à savoir TDH et SINAD. Ses caractéristiques de base sont :

- Valeur SINAD plafond : 41 dB pour un Taux AM de 75 %
- TDH suivant Taux AM : < 1 % , cf. caractéristique ci-après



L'analyseur de modulation Sayrosa 252M est un équipement dont l'entrée *RFIn* est à large bande. Il n'est pas possible d'effectuer de mesures valides, dès lors que plus d'un modulateur du ModulAM est activé. A cette limitation vient celle qui résulte du tandem entre analyseur de modulation et analyseur audio. Les valeurs TDH, SINAD renvoyées par l'analyseur HP 8903B ne pourront jamais être meilleures que celles plafonnées par l'analyseur Sayrosa 252M.

Par rapport à ces limitations, les mesures Taux AM, TDH, SINAD feront l'objet d'approches alternatives décrites au chapitre suivant. Cependant, si les mesures s'effectuent dans les limites précisées ci-avant, une comparaison des résultats reste toujours possible avec ceux procurées par le tandem Sayrosa 252M, HP 8903B.

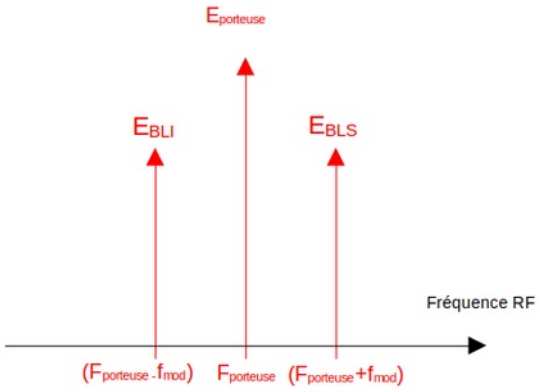
L'analyseur de spectre Siglent SSA3021X permet la mesure de tous les paramètres RF tels que niveaux des composantes du signal, Taux AM et aussi par extension TDH, SINAD (cf. chapitre suivant). Il confère la sélectivité radioélectrique qui fait défaut à l'analyseur de modulation Sayrosa 252M. Cela autorise les mesures dans un contexte de fonctionnement dynamique du ModulAM, à savoir lorsque plus d'un modulateur est actif, et pour tout type de source audio mise en œuvre (signal audio externe ou issue de flux IP).

Les fréquencemètres Oritel FA-125 et BG7TBL FA-3 permettent une mesure de la fréquence porteuse générée individuellement par le modulateur MOD1 (en fait le RPI Pico H) du ModulAM. Comme dans le cas de l'analyseur Siglent SSA3021X, ils bénéficient d'une référence externe 10 MHz, délivrée par un GPSDO de construction personnelle. La précision en relation avec la résolution est respectivement de ±0,1 Hz (Oritel FA-125) et ±5 mHz (BG7TBL FA-3). En pratique, de tels niveaux de précision ne sont toutefois pas requis dans le contexte du ModulAM.

3. Méthodes alternatives de mesure à l'analyseur de spectre

3.1 Mesure de Taux AM

Le principe de la mesure du Taux AM, repose sur l'évaluation de l'écart relatif en décibels existant entre la porteuse RF et l'une ou l'autre des bandes latérales (BLI , BLS). L'écart en fréquence entre la porteuse RF et les bandes latérales est déterminé par la fréquence du signal AF modulant (f_{mod}). La figure ci-dessous illustre cette représentation spectrale.



La relation qui lie le Taux AM et l'écart relatif de niveau entre la porteuse RF et l'une ou l'autre des bandes latérales est la suivante :

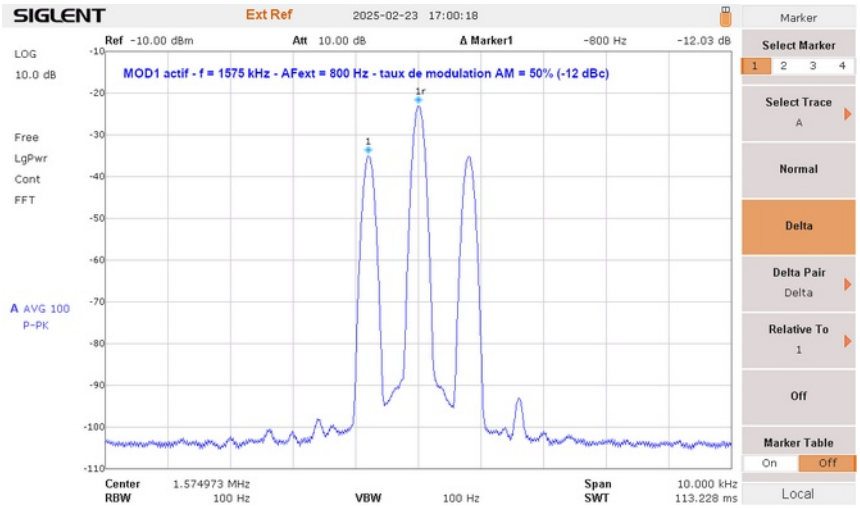
$$\Delta\ (dBc) = E_{porteuse}\ (dB) - E_{BLI}\ (dB) = 20 \times \log\ (m/2)$$

m est défini comme l'indice de modulation, et sa valeur est comprise entre 0 et 1. Sa valeur exprimée en pourcentage correspond au taux AM (0 à 100%).

A titre indicatif, le tableau ci-après reprend quelques valeurs qui lient ces différents paramètres. La configuration où Δ (dBc) = ∞ correspond à celle de l'absence de signal AF modulant, entraînant l'absence de bandes latérales (porteuse RF seule).

Δ (dBc)	∞	-18,0 dBc	-12,0 dBc	-8,5 dBc	-6,0 dBc
m	0	0,25	0,50	0,75	1,00
Taux AM	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %

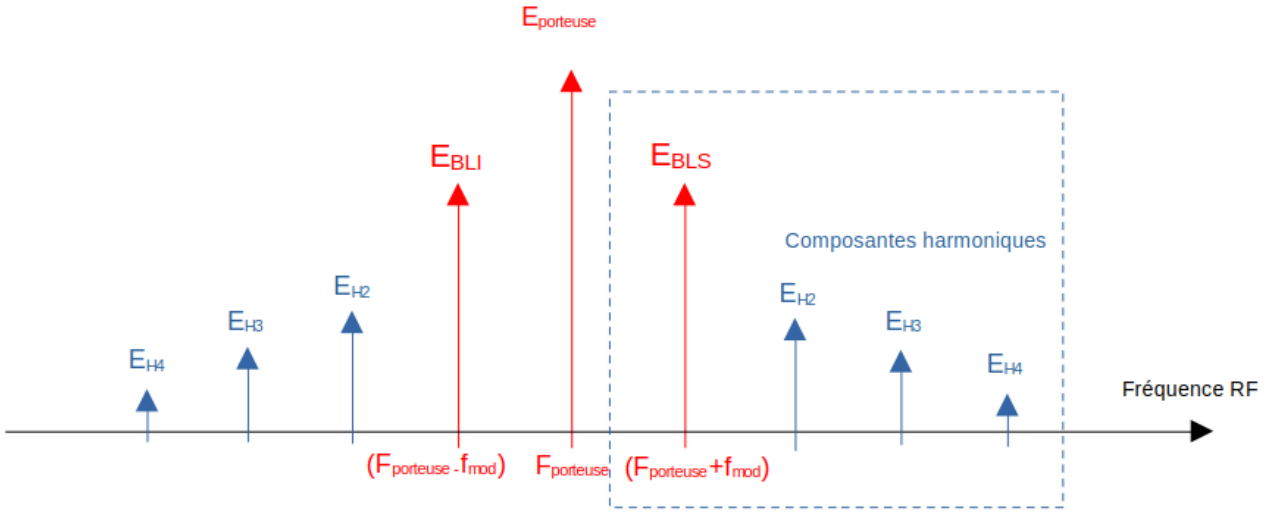
La capture à l'analyseur de spectre ci-après illustre un réglage du niveau AF (f_{mod} = 800 Hz), pour lequel la valeur de Taux AM est de 50 %, soit Δ (dBc) = -12 dBc



3.2 Mesure de TDH

Dans le cas où plus d'un modulateur est actif, ou bien si le TDH est inférieur à 1% (un seul modulateur actif), l'utilisation de l'analyseur de modulation Sayrosa 252M associé à l'analyseur audio HP8903B n'est pas pertinente. L'analyseur de spectre procure ici la sélectivité et la dynamique de mesure, qui font défaut avec l'analyseur de modulation Sayrosa 252M.

La mesure du TDH s'effectue à partir du signal modulant (f_{mod}) et du niveau relatif de ses composantes harmoniques. De par la modulation d'amplitude, ces composantes sont positionnées comme des bandes latérales secondaires du signal RF modulé (E_{H2}, E_{H3}, … E_{Hn}), comme illustré ci-après.



Dans cette représentation la composante harmonique est limitée au rang quatre. En termes de mesures, et afin de s'adapter aux différentes valeurs de f_{mod} et à la bande passante d'un modulateur AM, le rang harmonique le plus élevé pris en compte est de six.

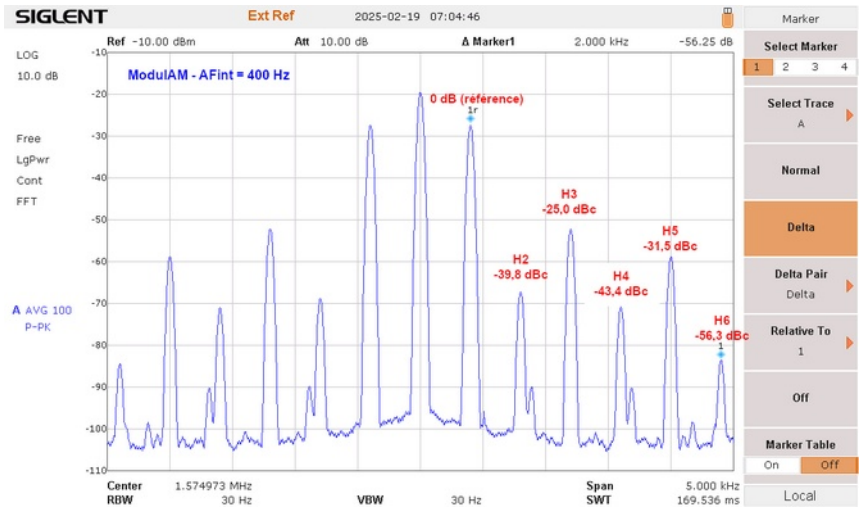
La valeur TDH est alors calculée suivant la relation mathématique ci-après, et pour des valeurs exprimées linéairement de chacune des composantes (E_{BLS}, E_{H2} … E_{H6}). La valeur du résultat est comprise entre 0 et 1, ou exprimée en pourcentage entre 0 % et 100 %

$$TDH = \frac{\sqrt{(E_{H2})^2 + (E_{H3})^2 + (E_{H4})^2 + (E_{H5})^2 + (E_{H6})^2}}{E_{BLS}}$$

En pratique E_{BLS} est pris comme référence à 0 dB et l'écart en décibels (dBc) est relevé pour chacune des composantes E_{H2} … E_{H6}. Par rapport à la relation ci-dessus, il y a donc nécessité de passer par une étape intermédiaire de calcul dans un tableur, afin que les écarts relatifs soient exprimés linéairement.

Pour illustrer le principe de cette mesure, le choix se porte délibérément sur la base du signal 400 Hz interne proposé dans la liste des sources AF du ModulAM. Il est bien précisé qu'à la date de rédaction de ce document, ce signal issu d'un enregistrement MP3 ne constitue pas un signal de référence, et n'est pas recommandé pour une caractérisation du ModulAM.

En d'autres termes ce signal AF présente en propre un TDH bien supérieur à celui réellement engendré par le ModulAM. Ici le TDH mesuré va largement excéder 1 %, et il est alors possible de comparer le résultat issu du tandem analyseur de modulation + analyseur audio, par rapport à celui issu de la méthode à l'analyseur de spectre, et valider ainsi cette approche.



Les valeurs relatives ci-dessus sont reportées dans le tableau de calcul :

Mod Interne 400 Hz	fondamental	H2	H3	H4	H5	H6	
Fréquence	400 Hz	800 Hz	1200 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2400 Hz	
Ecart (dB)	0 dB	-39,8 dBc	-25,0 dBc	-43,4 dBc	-31,5 dBc	-56,3 dBc	TDH résultant
Ecart (ratio)	1	0,01023293	0,056234133	0,00676083	0,026607251	0,001531087	6,34 %

Compte tenu que la valeur TDH est ici largement supérieure à 1 %, la comparaison avec la valeur obtenue avec le tandem analyseur de modulation + analyseur audio reste pertinente, cf. capture ci-après :

La convergence sur les résultats obtenus, valide ainsi la méthode de mesure du TDH à l'analyseur de spectre.

A noter sur un plan arithmétique que lorsque l'écart relatif entre la composante harmonique de niveau le plus élevé (généralement H2 ou H3) et les autres composantes harmoniques est 20 dB ou plus, l'incidence de ces dernières sur la valeur finale du TDH est relativement faible.

3.3 Mesure de SINAD

La mesure du SINAD est complémentaire à celle du TDH, car elle permet de prendre en compte les autres composantes parasites présentes dans le canal de diffusion. Ces dernières peuvent être issues de comportements non linéaires telles que surcharge des étages RF, intermodulations, et englobent aussi le bruit. C'est notamment la situation à laquelle on est confrontée, lorsque les huit modulateurs sont actifs.

SINAD est l'abréviation de "SIgnal to Noise And Distortion". Le SINAD est défini arithmétiquement comme le rapport entre la somme de l'ensemble des signaux, c'est à dire le signal utile plus la somme de toutes les composantes de bruit et de distorsion, sur la somme des seules composantes de bruit et de distorsion.

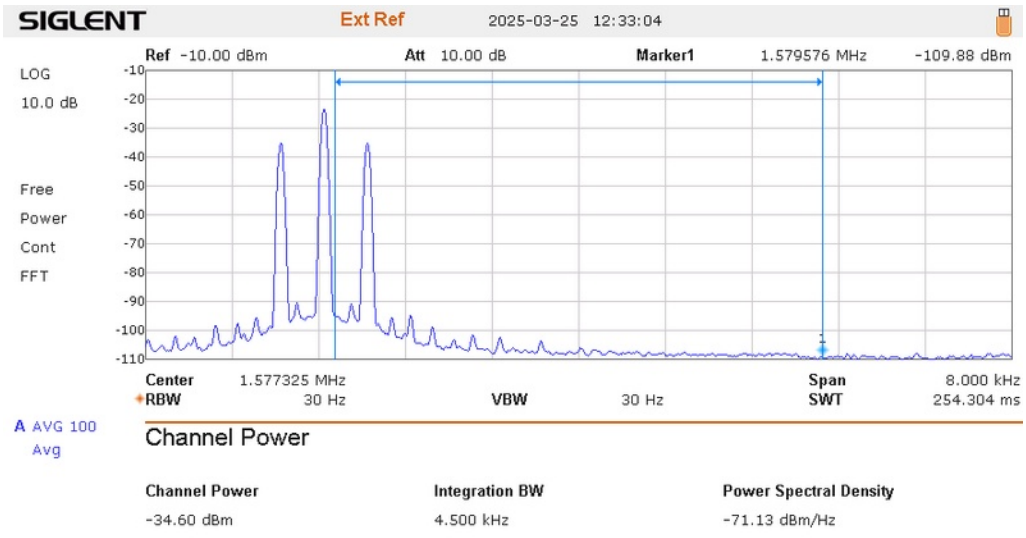
$$SINAD = 10\log\frac{P_{signal}+P_{bruit}+P_{distorsion}}{P_{bruit}+P_{distorsion}}$$

Le facteur (10 log) revient à exprimer le numérateur et le dénominateur en dBm. La valeur de SINAD en dB correspond alors à la différence de ces deux valeurs.

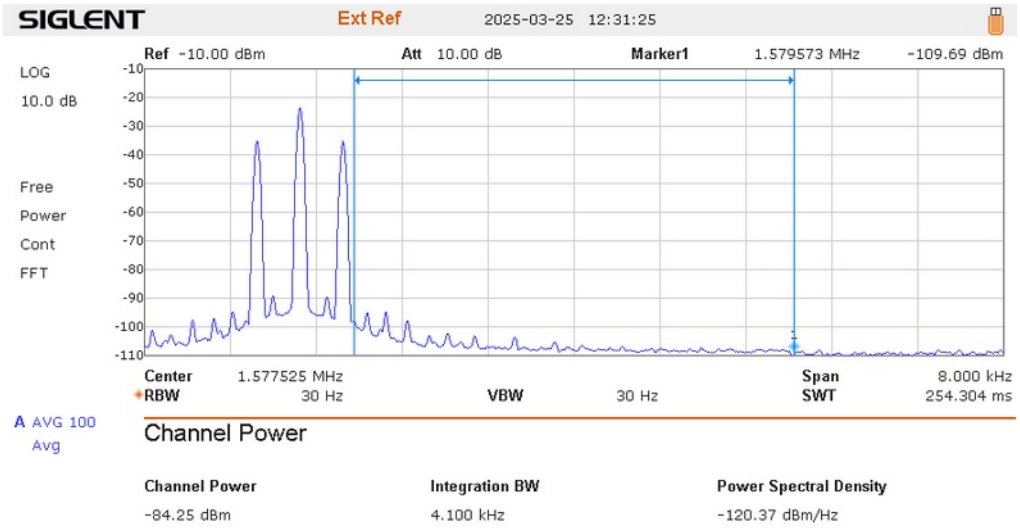
Pour effectuer cette mesure, la fonction "Channel Power" de l'analyseur de spectre est utilisée. Après définition d'une largeur de bande, l'analyseur va renvoyer la valeur de puissance totale des composantes présentes. La mesure est effectuée sur la bande latérale supérieure en deux étapes, comme illustré ci-après.

Étape 1 : La largeur de bande (Integration BW) est ajustée à 4,5 kHz, correspondant en limite haute à celle d'une diffusion AM (occupation spectrale totale ±4,5 kHz). Le réglage en fréquence de l'analyseur de spectre est ajusté de manière à exclure la fréquence porteuse à 1575 kHz du gabarit de mesure, tout en englobant les autres composantes du signal. La puissance totale (Channel Power) mesurée est de -34,6 dBm, représentatif du numérateur de la relation arithmétique du SINAD.

MOD1 (autres modulateurs inactifs) $F_{porteuse}$ = 1575 kHz, f_{mod} = 400 Hz, taux AM = 50 %



Étape 2 : La largeur de bande (Integration BW) est ajustée à 4,1 kHz. L'analyseur de spectre est réglé de manière à exclure le signal utile du gabarit de mesure, à savoir ($F_{porteuse}$ + f_{mod}). A noter que la limite haute en fréquence du gabarit reste ici inchangée (Marker 1). La puissance totale (Channel Power) mesurée est de -84,3 dBm, représentatif du dénominateur de la relation arithmétique du SINAD.



De ce qui précède, la valeur résultante de SINAD est de [-34,6 - (-84,3)] = **49,7 dB**

Cette valeur peut être rapprochée de celle communiquée dans le document de synthèse des mesures et tests de qualification v1.0, mesurée à **50,2 dB**.

Cette méthode alternative de mesure du SINAD peut être considérée comme satisfaisante, même si elle n'est pas complètement rigoureuse :

- Lors de l'étape 2, le signal utile est exclu du gabarit de mesure, et de fait l'intervalle compris entre la fréquence porteuse et le signal modulant ($F_{porteuse}$ + f_{mod}) n'est pas pris en compte pour ce qui est du bruit, ou des produits de non-linéarités. C'est précisément pour cette raison que f_{mod} est choisie à 400 Hz, afin de réduire cet intervalle, tout en restant dans la bande passante du ModulAM.
- A noter également que la mesure ne porte que sur la seule bande latérale supérieure, mais généralement la bande latérale inférieure reste comparable.

On peut estimer que l'erreur de mesure pourrait conduire à une valeur légèrement plus favorable de 1 dB à 2 dB par rapport à la réalité, ce qui reste acceptable pour caractériser le comportement. L'avantage conféré par l'analyseur de spectre reste celui de la sélectivité, autorisant la mesure individuelle de SINAD, alors que l'ensemble des huit modulateurs sont simultanément actifs.

La valeur de SINAD est à caractériser pour chacun des huit modulateurs. Comme les résultats peuvent être sujets à variations suivant le plan de fréquences sélectionné, on s'en tiendra à la seule configuration référencée ModulAM_Usine. Cette dernière présente également l'avantage de refléter le plan de fréquences, tel qu'il était en vigueur, avant l'extinction de la diffusion en Grandes Ondes.

4. Évaluation de références alternatives à l'amplificateur opérationnel LF 351A

4.1 Contexte

Dans le cas ou l'entrée AF externe du ModulAM est utilisée comme source audio, la qualité du signal modulé résulte essentiellement de la linéarité de l'amplificateur opérationnel U1A, qui équipe l'étage d'entrée. Cette linéarité s'apprécie simplement par une mesure de TDH.

Du fait de possibles difficultés d'approvisionnement de la référence initiale LF351, l'équipe de conception du ModulAM s'est attachée à évaluer diverses références au travers du document intitulé "rapport de test amplificateur opérationnel entrée AF EXT v1.1".

Les investigations menées ici portent sur des références complémentaires, avec un échantillonnage reposant sur plusieurs marques et exemplaires. Tous ces circuits ont été approvisionnés auprès de distributeurs nationaux, ou sont issus d'anciens stocks (pas de circuits d'origine Aliexpress).

4.2 Conditions de mesure

- Les principes de mesure sont ceux décrits aux sous-chapitres 3.1 et 3.2 (Taux AM, TDH).
- Tous les modulateurs sont inactifs à l'exception de MOD1.
- $F_{porteuse}$ = 1575 kHz, f_{mod} = 800 Hz, Taux AM cible = 75%

Suivant les relevés effectués par l'équipe de conception du ModulAM, à un niveau de taux AM à 75 %, la valeur TDH reste encore largement convenable (< 1%).

Le choix d'une valeur cible élevée de Taux AM, si elle peut toutefois être atteinte, permet également de tirer l'amplificateur opérationnel vers ses limites de linéarité, car le TDH peut croître rapidement dans ces circonstances. Le couple obtenu (Taux AM, TDH), est ainsi discriminant pour classer les amplificateurs opérationnels entre eux.

4.3 Résultats et commentaires

Référence	Marque	Taux AM	TDH	Remarques
TL 071	Motorola	75,0 %	0,32 %	1
TL 071	Thomson	75,0 %	0,28 %	1
TL 081	Motorola	75,0 %	0,27 %	1
TL 081	Thomson	75,0 %	0,28 %	1
TL 071	Texas	69,0 %	3,66 %	2
TL 081	Texas	75,0 %	3,46 %	2
NE 5534	Signetics	75,0 %	3,41 %	2, 3
NE 5534	Texas	75,0 %	4,93 %	2, 3
TL 081	STM	75,0 %	5,00 %	4
µA 741	STM	60,0 %	12,10 %	3
LF 356	National	50,0 %	33,00 %	5
LF 356	Signetics	47,0 %	32,00 %	5

(1) Les références TL071 et TL081 sont indifféremment utilisables. Leur conception interne est identique, et le comportement pour une même marque apparaît comme comparable.

(2) Les circuits fabriqués par Texas Instruments procurent des performances en retrait, qu'elles que soient les références testées. Le choix de ce constructeur (quand cela est possible!) est à éviter.

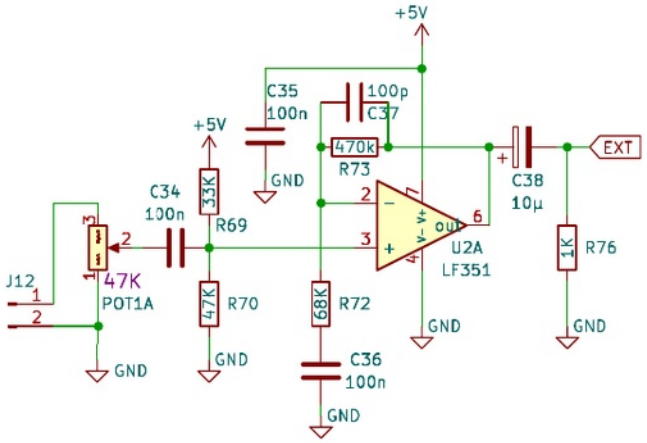
(3) Ces références ne sont pas équipées d'étages d'entrée bi-fets (ici technologie bipolaire). Dans le cas du NE5534, les fonctions d'équilibrage (BALANCE) et compensation associée (COMP/BAL) ne sont pas mises en œuvre.

(4) Il n'a pas été possible d'accéder à un deuxième circuit, pour confirmer le comportement de la marque STM.

(5) La référence LF356 qui est parfois présentée comme un possible substitut à la référence TL071, est totalement à oublier.

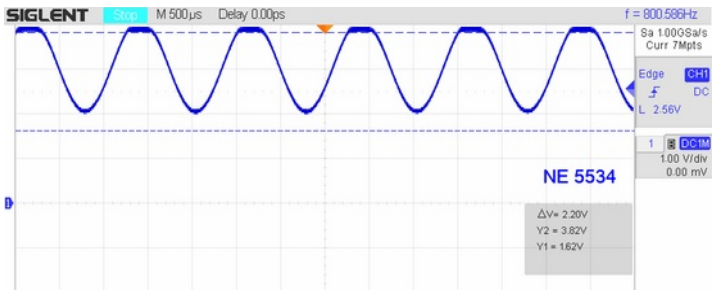
Les références suivantes correspondent à des amplificateurs opérationnels pour lesquels aucun fonctionnement convenable n'a pu être obtenu : CA3080, CA3100, CA3140, LF355, LF357, LM318, OP37.

Un relevé complémentaire à l'oscilloscope permet de cerner ce qui est à l'origine d'un TDH excessif avec certains amplificateurs opérationnels. L'analyse est effectuée en sortie de U2A (pin 6), cf. schéma ci-après.



TL 071 : signal de référence, amplitude crête à crête de 2,2 V permettant l'obtention d'un taux AM de 75 %

NE 5534 : écrêtage en limite haute (3,82 V), impossibilité d'atteindre la valeur basse de la composante DC (1,62 V)



µA 741 : écrêtage en limite basse, impossibilité d'atteindre la valeur basse de la composante DC (1,62 V)

LF 356 : écrêtage en limite haute, impossibilité d'atteindre la valeur haute de la composante DC (3,82 V)

Ces trois dernières captures illustrent des comportements différents suivant la référence d'amplificateur opérationnel. Elles mettent en évidence la difficulté à atteindre sans distorsion les valeurs requises de composantes continues, et d'amplitude crête à crête pour bénéficier du taux AM à 75 % (référence TL071).

Ces comportements sont imputables à l'alimentation mono-tension de U2A, pour laquelle il est nécessaire de créer une tension de référence aux environs de 3 V sur la pin 3 (création d'une pseudo tension symétrique entre les pins 7 et 4, par rapport à la pin 3.

Les amplificateurs opérationnels évalués sont généralement conçus pour être alimentés à partir d'une vraie tension symétrique par rapport à la masse, et montrent des limites normales d'utilisation dans une configuration d'alimentation mono-tension. Certains s'en sortent mieux que d'autres !

5. Comportement en situation de modulation externe de plus d'un modulateur

5.1 Contexte

La carte ModulAM offre la possibilité suivant le positionnement des cavaliers référencés MOD1 à MOD8, de pouvoir choisir la source de signal modulant pour chacun des huit modulateurs. Le cas d'usage normalement retenu pour le ModulAM est l'affectation du signal modulant externe (*AFIn*) à l'un des huit modulateurs.

Bien que la pertinence du scénario soit discutable, il est intéressant d'évaluer l'incidence sur la qualité du signal modulé, si le signal *AFin* est affecté à plus d'un modulateur.

5.2 Conditions de mesure

- Les principes de mesure sont ceux décrits aux sous-chapitres 3.1 et 3.2 (Taux AM, TDH).
- Utilisation d'un TL071 Thomson pour U2A (cf. 4.3)
- Tous les modulateurs sont actifs en émission, suivant le plan de fréquences ModulAM_Usine.
- Les modulateurs inutilisés sont en porteuse pure (absence de cavalier, aucun signal modulant).
- *AFIn :* f_{mod} = 800 Hz, Taux AM de référence = 50% (MOD8 seul)
- Mesures Taux AM et TDH sur MOD8 @ $F_{porteuse}$ = 1548 kHz, suivant affectation du signal *AFIn* à un nombre variable de modulateurs.

5.3 Résultats et commentaires

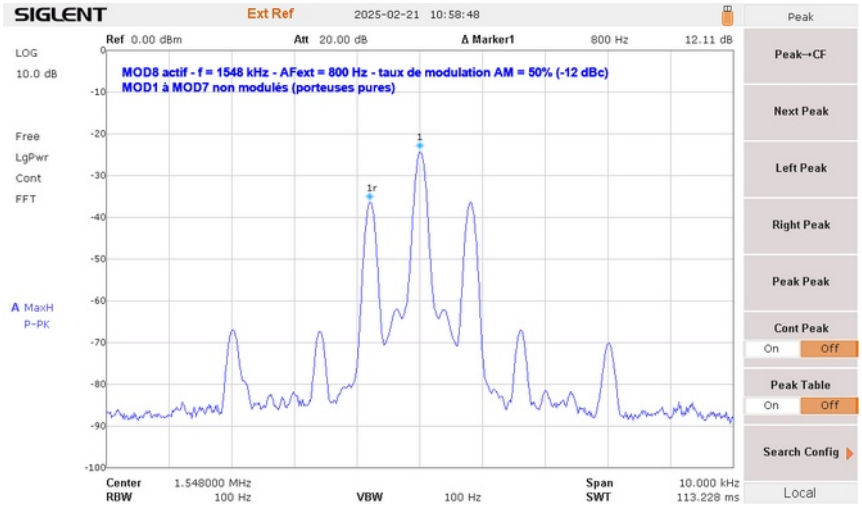
AFin @ MODx (autres modulateurs en porteuse pure)	Taux AM	TDH
MOD8 (référence)	50 %	0,20 %
MOD8 + [MOD7]	36 %	0,42 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6]	30 %	0,72 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6 + MOD5]	25 %	1,05 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6 + MOD5 + MOD4]	24 %	1,44 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6 + MOD5 + MOD4 + MOD3]	22 %	2,39 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6 + MOD5 + MOD4 + MOD3 + MOD2]	20 %	4,47 %
MOD8 + [MOD7 + MOD6 + MOD5 + MOD4 + MOD3 + MOD2 + MOD1]	18 %	7,03 %

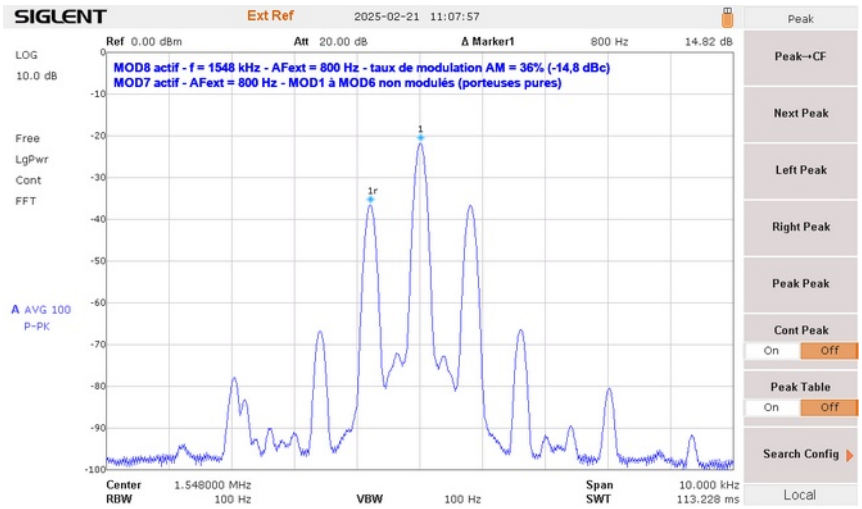
Au plan du TDH, jusqu'à trois modulateurs peuvent être raisonnablement alimentés simultanément par le signal *AFIn*. En revanche le Taux AM décroît avec le nombre de modulateurs, mais suivant un comportement inhabituel détaillé ci-après.

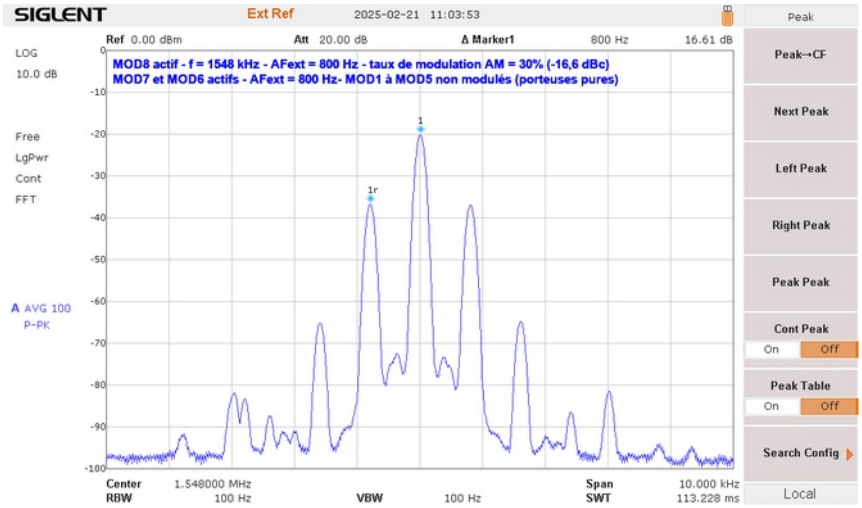
Quand le taux AM est en décroissance, c'est normalement le résultat d'une réduction de l'amplitude du signal modulant, et par voie de conséquence l'amplitude des bandes latérales $\mathbf{E_{BLI}}$ et $\mathbf{E_{BLS}}$ (cf. 3.1).

Or, les relevés à l'analyseur de spectre montrent que cette amplitude ne varie pas. C'est en fait le niveau de la porteuse $\mathbf{E_{porteuse}}$ qui varie suivant le nombre de modulateurs alimentés par le signal *AFIn*, comme l'illustre les trois relevés ci-après. Ils correspondent aux trois premières lignes du tableau ci-dessus.

Ici le marqueur **1r** positionné sur $\mathbf{E_{BLI}}$ présente une amplitude invariable, contrairement au marqueur **1** positionné sur $\mathbf{E_{porteuse}}$. Plus le nombre de modulateurs alimentés par *AFin* s'élève, plus $\mathbf{E_{porteuse}}$ croit.



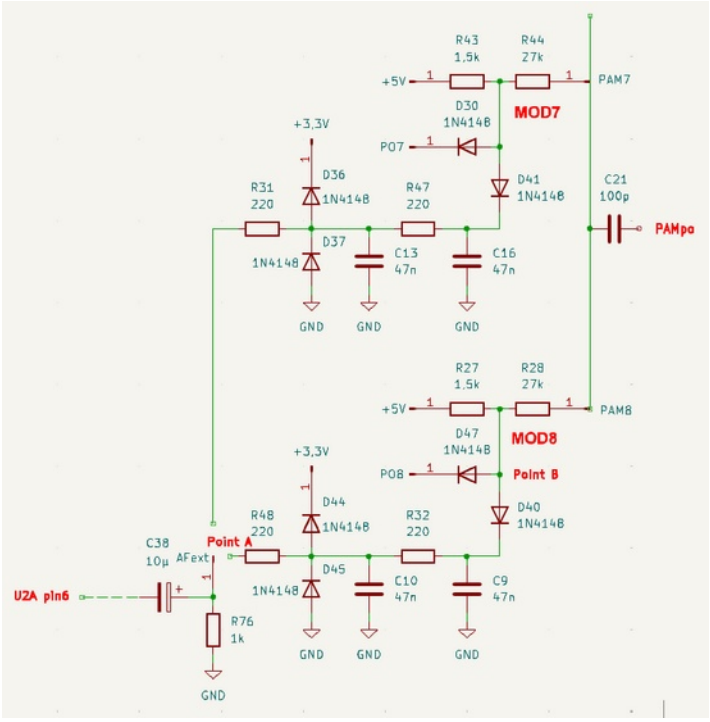




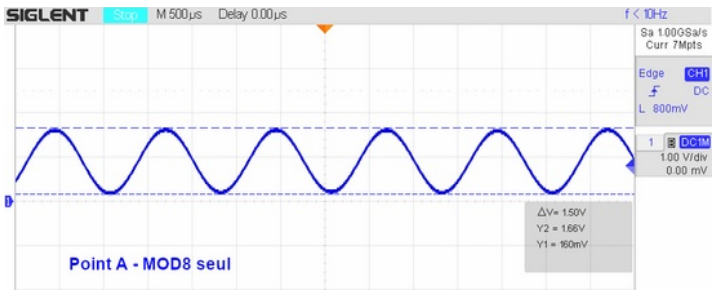
On notera dans ces captures spectrales qu'il existe des composantes parasites, autres que des composantes harmoniques. Ces composantes additionnelles ne sont pas prises en compte pour la mesure du TDH, mais le seront dans la mesure du SINAD (cf. 3.3), objet du chapitre 6.

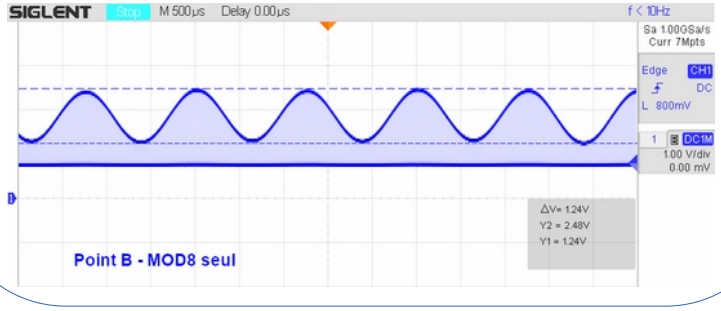
L'amplitude des bandes latérales $\mathbf{E_{BLI}}$ et $\mathbf{E_{BLS}}$ reste constant, et la variation du Taux AM est en fait induite par la variation du niveau de la porteuse. Pour bien cerner ce comportement, des relevés complémentaires ont été effectués à l'oscilloscope sur les points suivants :

- **Point A** (R76) représentatif du signal modulant externe alimentant un modulateur (MOD8) ou plus (MOD8, MOD7, MOD6, ...). A noter que le point A est le reflet au plan de la tension alternative, de ce qui est délivré par la sortie de U2A (pin 6), en aval du condensateur de liaison C38.
- **Point B** (D40) représentatif du processus de modulation, rattaché à MOD8.

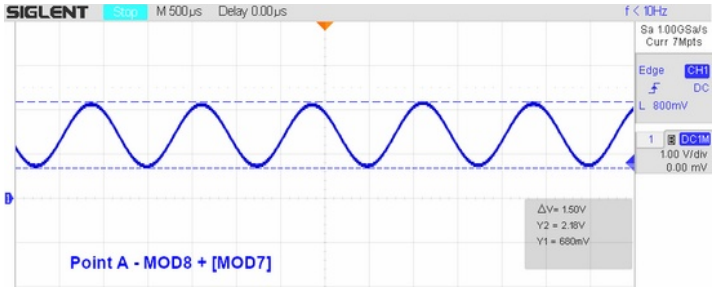


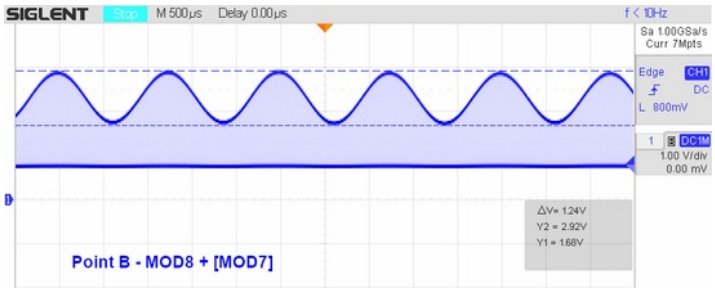
MOD8 seul



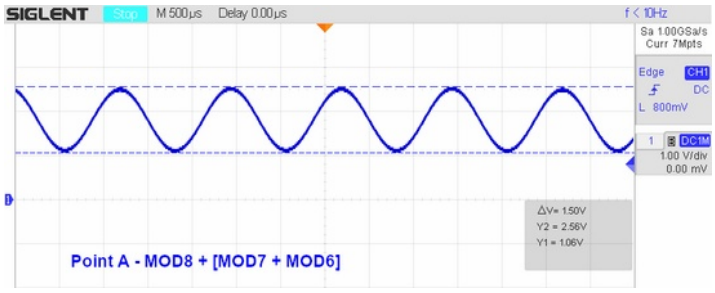


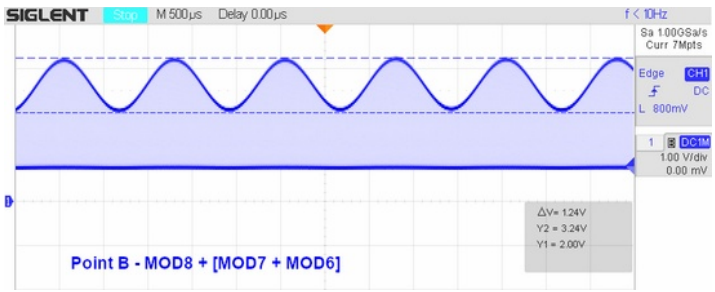
MOD8 + [MOD7]





MOD8 + [MOD7 + MOD6]

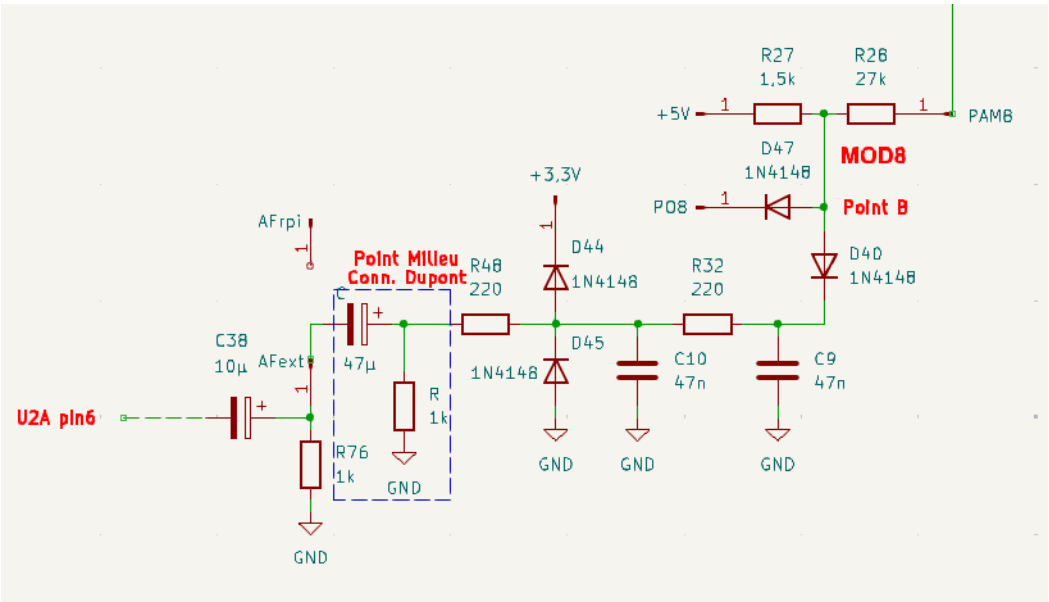




On constate que le point de fonctionnement de MOD8 présente une composante continue qui croît avec le nombre de modulateurs, entraînant notamment l'augmentation du niveau de $\mathbf{E}_{\text{porteuse}}$ au point B. L'enveloppe de modulation AF reste de son côté à un niveau constant. Le point de fonctionnement est modifié de par le fait que le courant continu qui circule dans R76 s'élève avec le nombre de modulateurs alimentés par le signal *AFIn*. Dans le cas de MOD8, le courant (hors modulateur GO non représenté sur le schéma) circule via R27, D40, R32, R38 pour finir dans R76 qui elle, est commune à tous les modulateurs.

Afin d'éviter cette incidence, il suffit d'isoler chaque modulateur concerné, de manière à ce que leur point de fonctionnement individuel ne soit plus modifié, lors de l'attaque simultanée par le signal *AFIn*.

Ceci est réalisé au niveau d'un connecteur Dupont (MOD1 à MOD8) en disposant une cellule RC, en substitution au cavalier, conformément au schéma ci-après.



La cellule RC additionnelle est représentée dans l'encadré. R (1 kΩ) fixe le point de fonctionnement d'un modulateur en se substituant à R76, et C (47 µF) procure l'isolation DC vis à vis des autres modulateurs. Cet aménagement externe ne nécessite aucune modification de la platine ModulAM.

Ce dispositif a été validé pour une configuration de trois modulateurs (TDH contenu à une valeur raisonnable), et a bien mis en évidence l'absence de répercussions sur le Taux AM. Cet aménagement est bien sûr inutile dans le cas où la source audio est issue du RPi Pico H.

Rappelons que le cahier des charges du ModulAM ne prévoyait rien de tel, et que dans la pratique peu d'utilisateurs vont diriger le signal audio externe vers plus d'un modulateur. Avec deux modulateurs actifs, la dégradation sur le taux de modulation pour le signal externe *AFIn* reste encore acceptable, sans recourir obligatoirement à cet aménagement.

6. Évaluation de la qualité individuelle des signaux modulés

6.1 Contexte

Au chapitre précédent, les mesures effectuées à l'analyseur de spectre mettent en évidence qu'outre les composantes harmoniques (TDH), il existe d'autres composantes parasites. Celles-ci sont issues de comportements non linéaires engendrés par le fonctionnement de l'ensemble des modulateurs, et des étages d'amplification situés en aval. Le niveau de l'ensemble de ces composantes indésirables rapporté à celui du signal utile, caractérise la qualité du signal diffusé, et en final celle perçue au niveau du récepteur.

C'est la mesure de SINAD telle que décrite au sous-chapitre 3.3, qui permet d'évaluer la qualité du signal diffusé.

6.2 Conditions de mesure

- Les principes de mesure sont ceux décrits aux sous-chapitres 3.1 et 3.3 (Taux AM, SINAD).
- Utilisation d'un TL071 Thomson pour U2A (cf. 4.3).
- Tous les modulateurs sont actifs en émission, suivant le plan de fréquences ModulAM_Usine.
- Les modulateurs secondaires sont soit en porteuse pure (absence de cavalier, aucun signal modulant), ou au contraire modulés par les programmes tels que ceux définis par défaut dans la configuration ModulAM_Usine.
- *AFIn :* f_{mod} = 400 Hz, Taux AM de référence = 50%, tour à tour pour chacun des huit modulateurs.

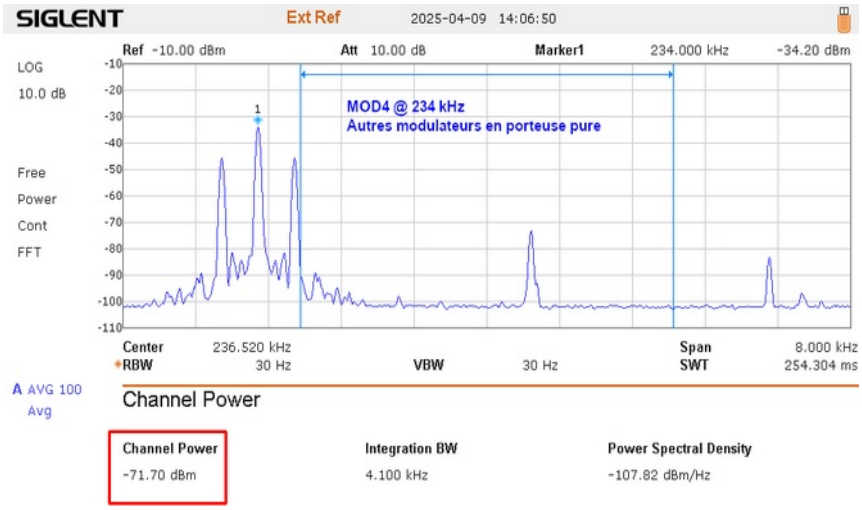
6.3 Résultats et commentaires

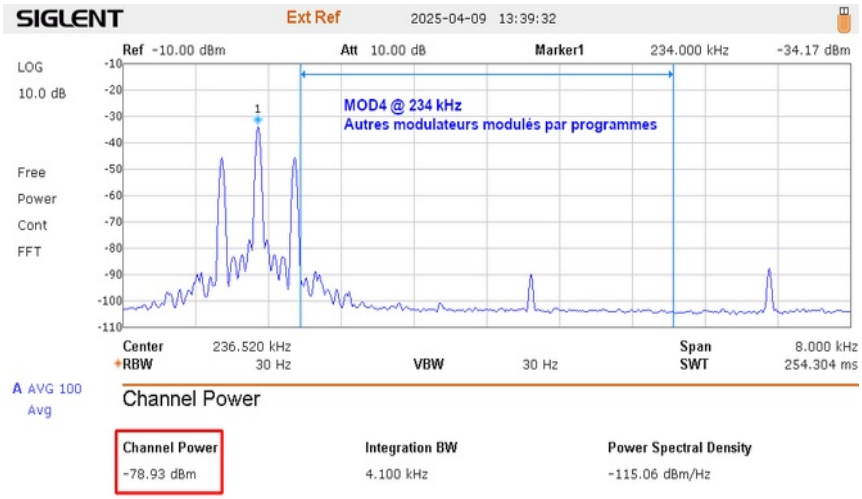
Modulateur	Fréquence	Porteuse	SINAD Autres modulateurs en porteuse pure	SINAD Autres modulateurs modulés par programmes
MOD1	162 kHz	-37 dBm	26 dB	31 dB
MOD2	183 kHz	-35 dBm	31 dB	33 dB
MOD3	216 kHz	-34 dBm	33 dB	33 dB
MOD4	234 kHz	-34 dBm	27 dB	34 dB
MOD5	603 kHz	-25 dBm	38 dB	37 dB
MOD6	891 kHz	-24 dBm	35 dB	36 dB
MOD7	1278 kHz	-24 dBm	36 dB	37 dB
MOD8	1548 kHz	-24 dBm	37 dB	37 dB

Dans le tableau ci-dessus, les valeurs absolues (dBm) ou relatives (dB) sont délibérément arrondies à la valeur entière la plus proche, afin de faciliter la lecture. La mesure du niveau de porteuse, ainsi que le taux AM (50%) sont contrôlés pour les deux configurations de mesures SINAD. Aucune variation significative n'a été mise en évidence.

Les valeurs SINAD les plus élevées, sont quasiment toujours obtenues lorsque les modulateurs sont modulés par des contenus dynamiques (programmes). Dans cette situation les contenus modulants sont totalement décorrélés entre eux, et les produits de non-linéarités ne présentent plus un caractère statique aussi marqué. La durée d'échantillonnage pour l'obtention d'une mesure fiable et stable, est d'environ trois minutes.

Ce comportement est particulièrement mis en évidence aux fréquences de 162 kHz (MOD1) et 234 kHz (MOD4). Les captures ci-après illustrent cette différence de 7 dB à la fréquence de 234 kHz.





Rappelons que la caractérisation d'un seul modulateur activé avait abouti à une valeur SINAD de **49,7 dB** (cf. 3.3). Dans un contexte de fonctionnement à huit modulateurs, les valeurs de SINAD s'échelonnent entre **31 dB et 37 dB** (moyenne et médiane égales à 35 dB). Cette dégradation n'a toutefois rien d'anormal par rapport à la conception du ModulAM.

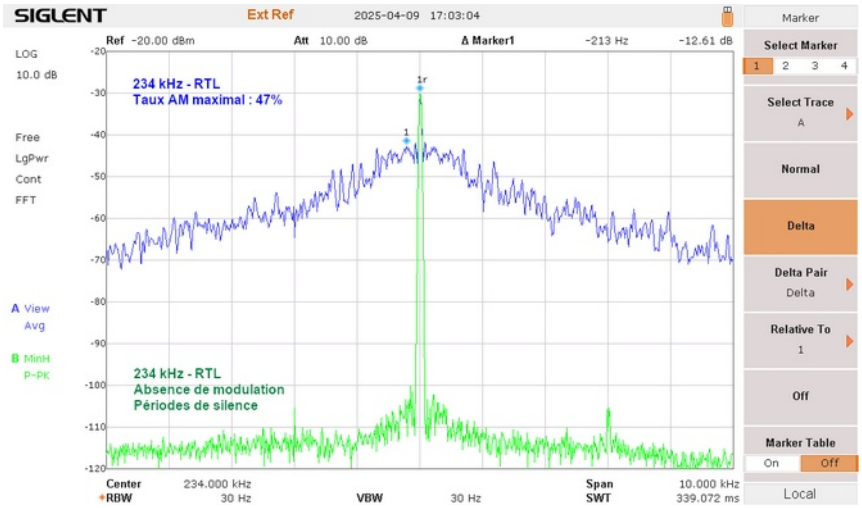
Si ces valeurs s'avèrent un peu faible dans le cas où le récepteur considéré est un tuner AM issu d'une chaîne haute fidélité, elles sont par contre largement satisfaisantes pour des récepteurs grand-public anciens. Dans beaucoup de cas, ces récepteurs présentent une valeur de SINAD plafond qui n'excèdent pas 30 dB. Il sera subjectivement difficile de mettre en évidence un défaut de modulation inhérent au ModulAM pour la configuration ModulAM_Usine.

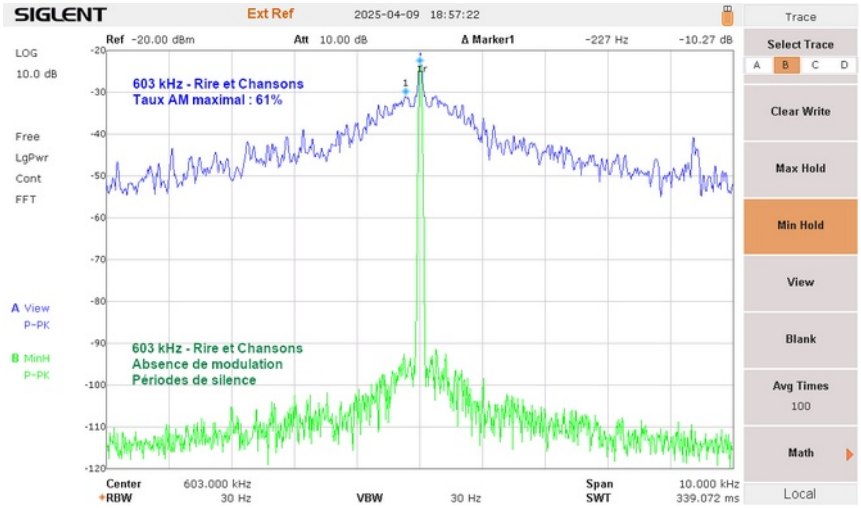
Comme cela a été mentionné par l'équipe de conception du ModulAM, le choix de certaines combinaisons de fréquences peut conduire à une dégradation de la qualité des signaux modulés. C'est quelque chose à garder en tête pour le cas où cette situation viendrait à être rencontrée. Généralement, la modification d'une ou deux valeurs de fréquences permet alors de retrouver un fonctionnement convenable.

Pour achever la caractérisation des signaux modulés en sortie du ModulAM, deux relevés spectraux en situation dynamique, ont été effectués aux fréquences de 234 kHz et 603 kHz.

Les contenus audio associés sont respectivement ceux de RTL et de Rire et Chansons. Le choix de cette dernière source est dicté par la recherche d'un contenu dont le traitement audio est par nature plus agressif (compression, accentuation de certains intervalles de fréquence, etc.). Ce sont ces traitements audio qui confèrent au programme sa signature sonore.

Les captures sont réalisées sur une durée de trente minutes. La fonction "Max Hold" de l'analyseur de spectre permet d'enregistrer les crêtes de niveau (trace bleu) atteintes sur les bandes latérales dans tout l'intervalle de dispersion (10 kHz). La fréquence audio la plus élevée prise en compte est par conséquent de 5 kHz. A l'inverse la fonction "Min Hold" mémorise les niveaux minimum (trace verte) atteint sur les bandes latérales, qui résultent des périodes de silence présentes dans le contenu du programme. Seule la fréquence porteuse de niveau invariable, reste toujours présente dans ces deux représentations.





Attention, de par les fréquences mises en œuvre les niveaux des signaux ne sont pas identiques, cf. tableau récapitulatif en début de sous-chapitre 6.3. Cependant statistiquement, le taux AM atteint par le programme Rire et Chansons reste toujours en moyenne plus élevé que celui de RTL, ce qui n'est pas surprenant. On peut supposer que l'équipe de conception a pris en compte les flux réputés les plus agressifs, de manière à ce que le signal analogique en sortie de RPi Pico H, ne soit jamais à même de saturer le modulateur associé.

6. Conclusion

Le ModulAM tel que développé au plan matériel est une réussite, probablement sans équivalent à ce jour.

Le choix approprié pour l'amplificateur opérationnel U2A, associé le cas échéant à une modification simple et non invasive, permet d'optimiser son exploitation et ses performances, dans le cas d'un signal modulant externe.

Les performances en exploitation dynamique pour l'ensemble des huit modulateurs, sont satisfaisantes vis à vis de nos récepteurs anciens, et elles sont notamment assurées pour la configuration ModulAM_Usine.

*** Fin de document ***