



# MODULATION SIGMA DELTA

**Pedro Campos Afonso Serra Menezes**

**Vinícius Rocha Miranda Souza**

**16/01/2025**

**Cours :** Traitement Analogique du Signal - 2024-2025

**Professeur :** Chancel Geoffrey et Augereau Franck

# 1 Introduction

L'objectif principal de ce rapport est d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de la modulation sigma-delta pour convertir de manière optimale des signaux analogiques en une représentation numérique haute résolution, en s'appuyant sur la plateforme Modicom 4. Cette technique se distingue par sa capacité à simplifier les systèmes tout en maintenant une grande précision dans la conversion des signaux, ce qui en fait un outil essentiel dans le traitement numérique des signaux pour de nombreuses applications.

La carte MODICOM4 intègre divers blocs élémentaires conçus pour implémenter un modulateur et un démodulateur  $\Sigma\Delta$ . La modulation sigma delta permet de transformer un signal analogique en une séquence binaire, facilitant ainsi sa transmission sous forme numérique. Bien qu'elle partage certaines similitudes avec la modulation d'impulsions codées (PCM), le modulateur sigma delta se différencie par son architecture principalement analogique, éliminant la nécessité d'un convertisseur analogique-numérique classique. Le signal produit par le modulateur sigma delta est une modulation de densité d'impulsion (PDM), exploitable par un système de traitement numérique ou retransformable en signal analogique grâce à un démodulateur.

Cependant, l'usage principal des modulateurs sigma delta reste la conversion analogique-numérique, particulièrement adaptée au traitement des signaux continus comme la voix ou la musique.

## 2 Préparation

### 2.1 Structure et Fonctionnement de la Structure Sigma-Delta

La modulation sigma-delta utilise un amplificateur différentiel, un intégrateur et un comparateur pour convertir un signal analogique en un flux de bits synchronisés par une horloge. La sortie du comparateur passe par une bascule D et un convertisseur de niveau, générant des tensions bipolaires (+4 V et -4 V) qui sont rétroactionnées dans le système. Ce processus, illustré par le schéma de la figure 1, vise à maintenir la différence moyenne entre le signal d'entrée et le signal rétroactionné égale à zéro.

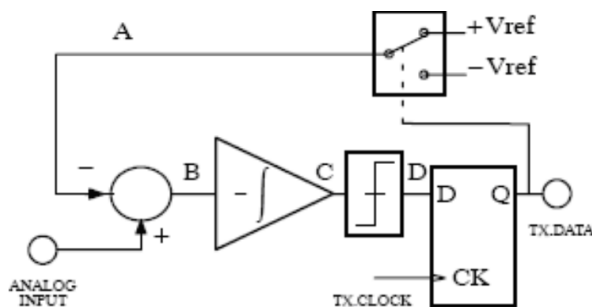


FIGURE 1 – Modulateur Sigma-Delta

Le démodulateur, représenté par le schéma de la figure 2, traite le flux de bits en utilisant une autre bascule et un filtre passe-bas pour reconstruire le signal analogique, en éliminant les composants haute fréquence. La modulation sigma-delta offre des avantages tels qu'un rapport signal-bruit élevé et une efficacité pour les signaux de basse fréquence. Elle est largement utilisée dans les applications de traitement numérique et multimédia en raison de sa haute résolution avec une fréquence d'échantillonnage relativement basse.

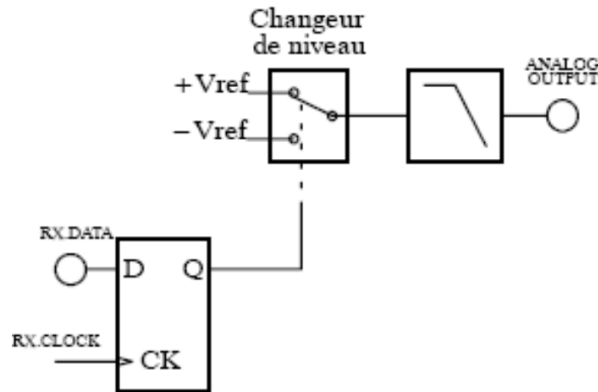


FIGURE 2 – Démodulateur Sigma-Delta

## 2.2 Étude des Blocs Élémentaires de la Carte Modicom 4

Le diagramme ci-dessous représente la carte MODICOM 4.

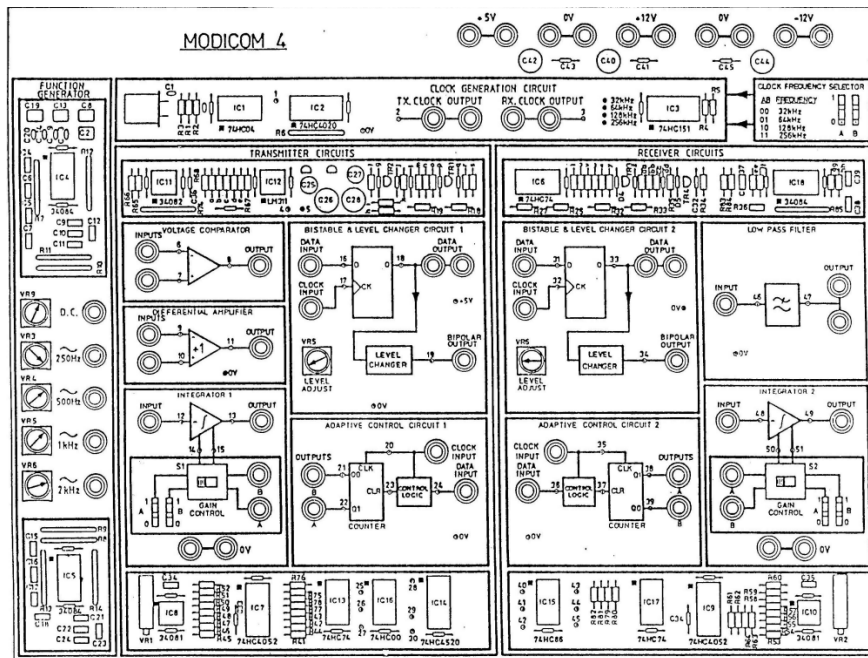


FIGURE 3 – Démodulateur Sigma-Delta

Qui contient les blocs fondamentaux pour la modulation et la démodulation sigma-delta. La structure est composée des éléments suivants :

1. **Générateur de Fonctions** : Génère des ondes de test qui sont injectées pour évaluer le comportement du système. Il permet de configurer différents types de signaux en ajustant la fréquence et l'amplitude.
2. **Circuit de Génération d'Horloge** : Responsable de la génération des signaux d'horloge. Il contient l'horloge TX (Transmission Clock), utilisée dans le premier flip-flop D, et l'horloge RX (Reception Clock), utilisée dans le deuxième flip-flop D. Les noms TX et RX indiquent leurs fonctions de transmission et de réception, respectivement.

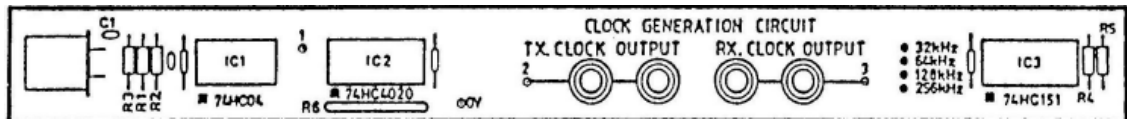


FIGURE 4 – Circuit de Génération d'Horloge

3. **Amplificateur Différentiel** : Amplifie la différence entre deux signaux d'entrée, en supprimant les composantes communes et en augmentant la sensibilité au signal différentiel.

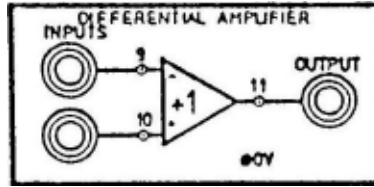


FIGURE 5 – Amplificateur Différentiel

4. **Intégrateur** : Réalise l'intégration du signal, essentielle au fonctionnement du modulateur sigma-delta. Il génère une rampe en réponse au signal d'entrée.

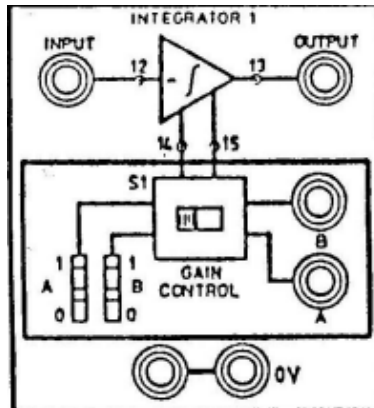


FIGURE 6 – Intégrateur

5. **Comparateur de Tension** : Compare la sortie de l'intégrateur avec une valeur de référence et génère un signal numérique (1 ou 0) selon la polarité de la tension.

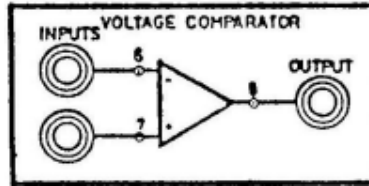


FIGURE 7 – Comparateur de Tension

6. **Bistable & Changeur de Niveau** : Le bistable (flip-flop D) synchronise le flux de bits avec l'horloge, tandis que le changeur de niveau transforme les valeurs numériques (0 et 1) en tensions bipolaires (+4 V et -4 V).

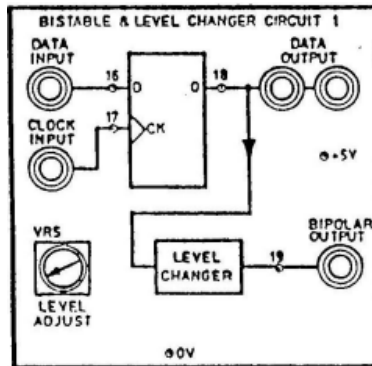


FIGURE 8 – Bistable & Changeur de Niveau

7. **Filtre Passe-Bas** : Filtre les composantes haute fréquence, permettant de récupérer le signal analogique original à partir du flux de bits généré par le modulateur.

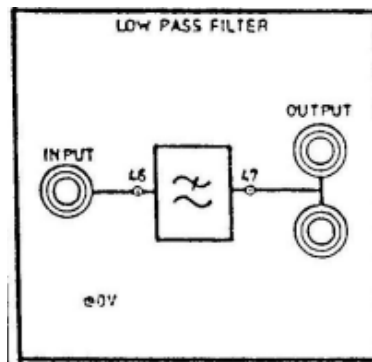


FIGURE 9 – Filtre Passe-Bas

## 2.3 Schéma de Câblage

L'image 10 présente le schéma de la carte Modicom, mettant en évidence les chemins pour les processus de modulation et de démodulation du système. On observe que la mo-

ulation est obtenue en extrayant le signal de sortie de données (data output) du premier bascule D, tandis que la démodulation est obtenue à partir de la sortie du filtre passe-bas, où le signal reconstruit est disponible.

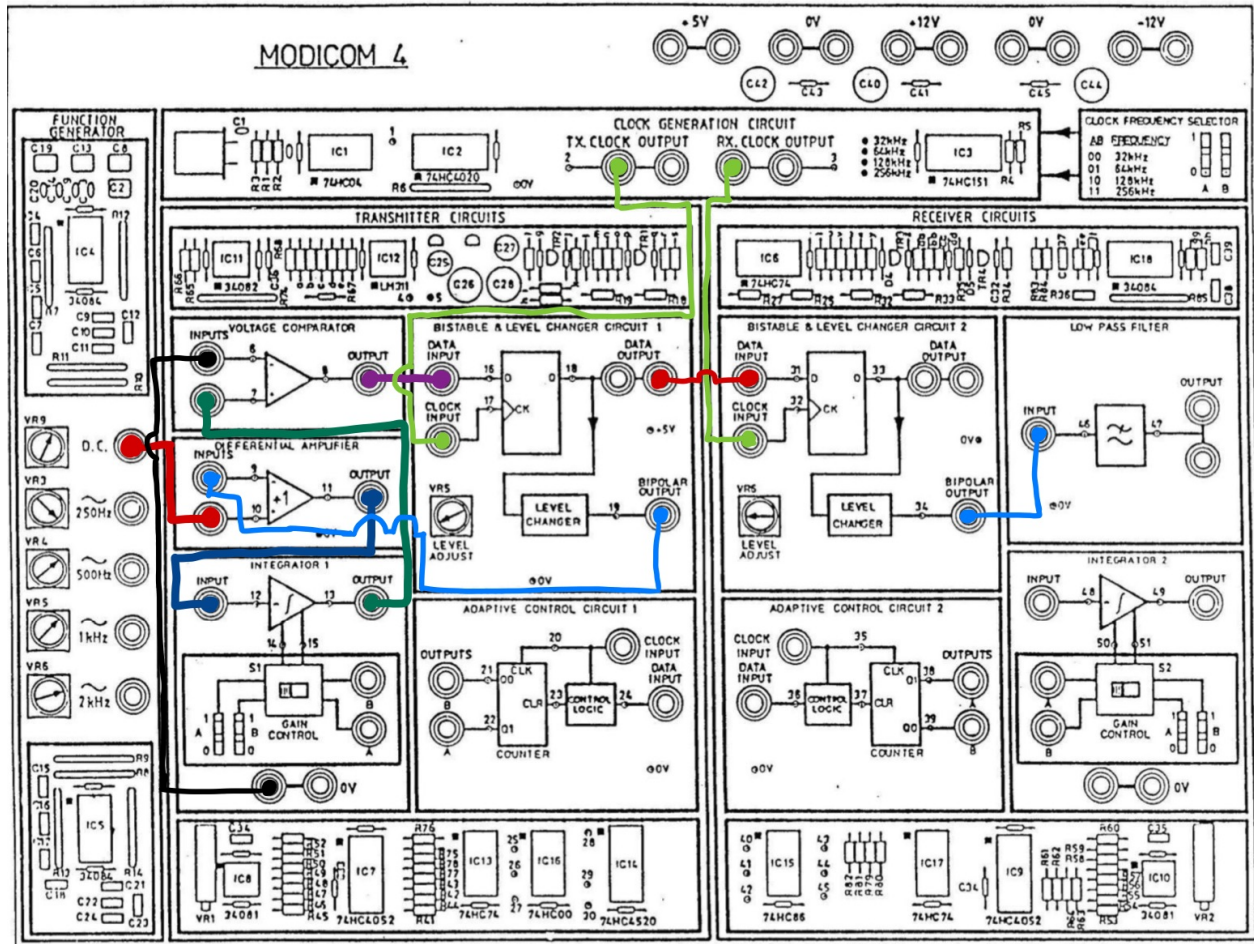


FIGURE 10 – Schéma de Câblage

## 2.4 Tracé des Signaux

L'image 11 illustre le comportement des signaux générés lorsqu'un signal d'entrée triangulaire est appliqué à l'entrée analogique du modulateur Sigma-Delta.

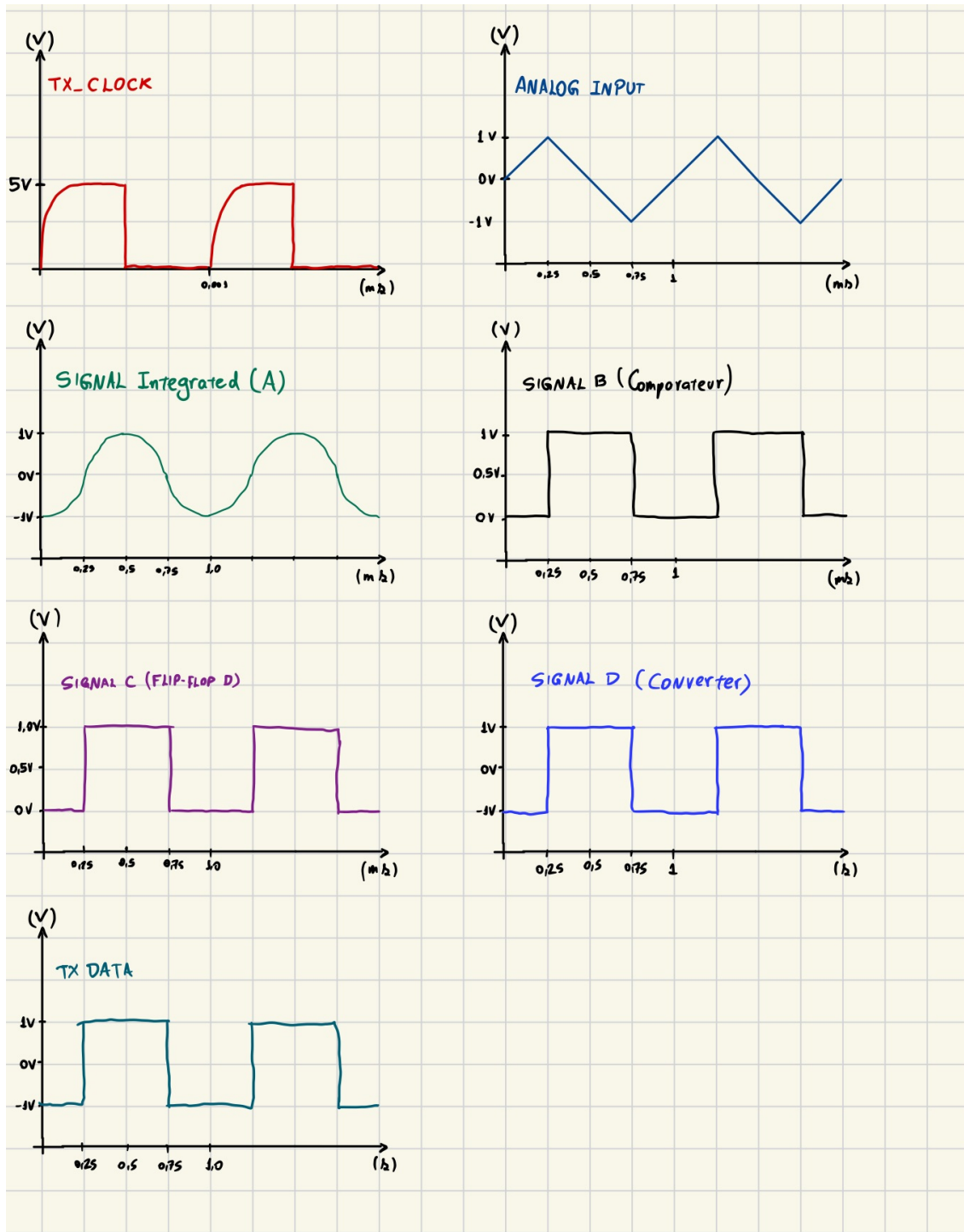


FIGURE 11 – Tracé des Signaux

## 2.5 Structure Globale d'un Convertisseur Analogique/Numérique Sigma-Delta

Ci-dessous, nous avons la structure globale d'un convertisseur Analogique/Numérique. Essentiellement, nous constatons qu'elle est identique aux schémas des circuits précédents.

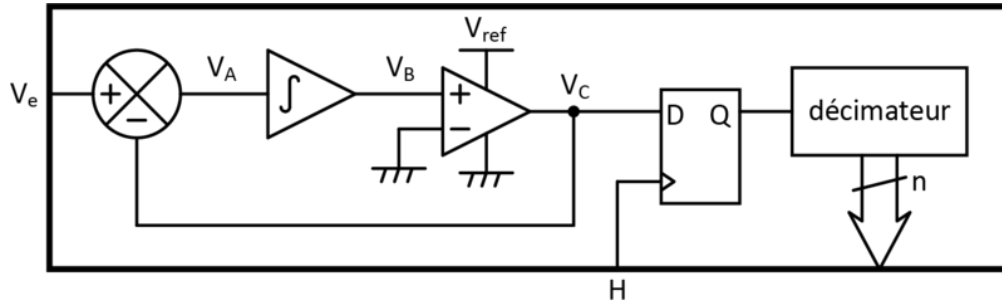


FIGURE 12 – Structure Globale

## 2.6 Exemple d'Application Réelle d'un CAN Sigma-Delta

Ils sont largement utilisés dans des applications nécessitant une haute précision, un faible bruit et une large plage dynamique. L'un des exemples les plus courants se trouve dans l'industrie de l'audio numérique. Les CANs, en particulier dans les équipements audio, sont utilisés pour reproduire un son de haute qualité dans les casques, les amplificateurs et les lecteurs de musique. Leur capacité à fournir un rapport signal-bruit élevé et à réduire les distorsions les rend idéaux pour ces dispositifs. Les CNA dans les microphones numériques utilisent des convertisseurs Sigma-Delta pour capturer des signaux audio analogiques et les convertir en signaux numériques avec une précision extrême, même dans des environnements bruyants.

# 3 Manipulation

## 1. Réalisez un modulateur sigma-delta

En utilisant les blocs disponibles sur la carte Modicom 4, nous avons configuré la fréquence de l'horloge à 32 kHz et réglé le gain des intégrateurs au minimum. Cela a permis de générer un signal carré d'une certaine amplitude tout en assurant la symétrie du signal de sortie du changeur de niveau. Nous avons d'abord vérifié la conformité du signal délivré par l'horloge, ce qui est confirmé par la figure 13. Le signal d'horloge obtenu est bien un signal carré avec un rapport cyclique de 50 % et une fréquence de 32 kHz. Dans la même figure, nous pouvons vérifier le signal de sortie en appliquant un signal de 0V au système. Dans celle-ci, le signal de sortie est déjà ajusté par le potentiomètre du LEVEL ADJUST.



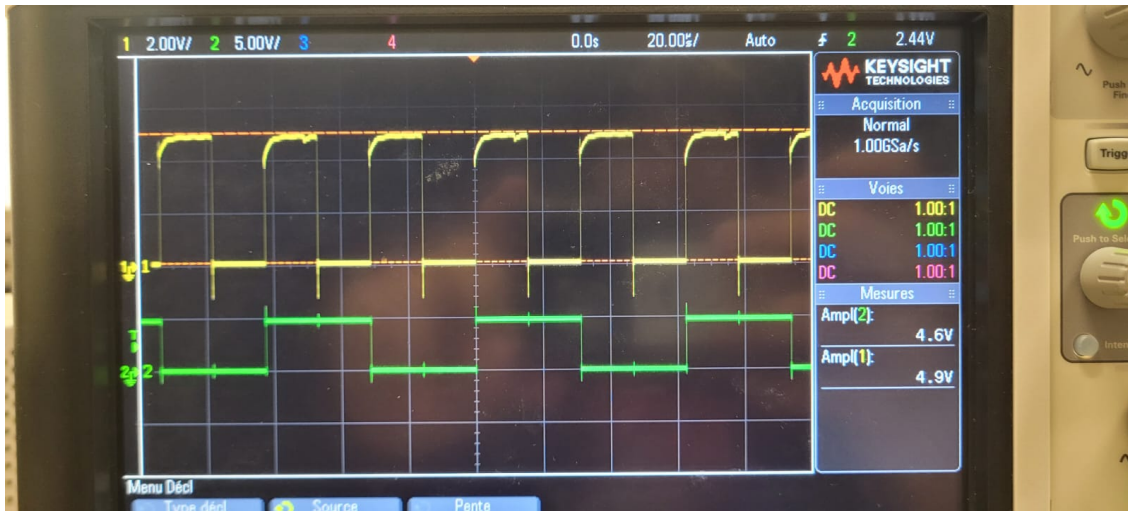


FIGURE 13 – Sortie (vert) et l'horloge (jeune)

## 2. Injectez un signal sinusoïdal à 250 Hz

Nous remplaçons désormais l'entrée à la masse par un signal sinusoïdal de 250 Hz et 11,1V d'amplitude. Cela permet d'observer le fonctionnement du modulateur avec ce type de signal. Nous proposons alors d'examiner les signaux intermédiaires au sein du bloc pour en analyser le comportement. La figure 14 montre les signaux d'entrée et de sortie, ainsi que les signaux intermédiaires. Le signal modulé (vert) représente la modulation 1-bit du signal sinusoïdal. On peut voir que ce signal possède bien les caractéristiques du signal d'entrée (jeune), nous permettant alors d'avoir une modulation cohérente.



FIGURE 14 – Entrée (jeune), Sortie du differential amplifieur (bleu), Sortie du integrateur (rose) et la Sortie du système (vert)

### 3. Câblez le démodulateur.

Le bloc modulateur est conservé, et le démodulateur est désormais connecté à sa sortie. L'analyse se fait en sortie de la bascule D, qui reçoit le flux de bits généré par le modulateur et procède à leur échantillonnage. Pour garantir la fiabilité des données, le signal d'horloge est déphasé de  $180^\circ$  par rapport au TX CLOCK, ce qui permet d'échantillonner chaque bit au centre de son état stable. La figure 15 illustre les deux signaux d'horloge, TX CLOCK et RX CLOCK, déphasés de  $180^\circ$  afin d'éviter que les informations soient lues avant d'avoir été correctement transmises.

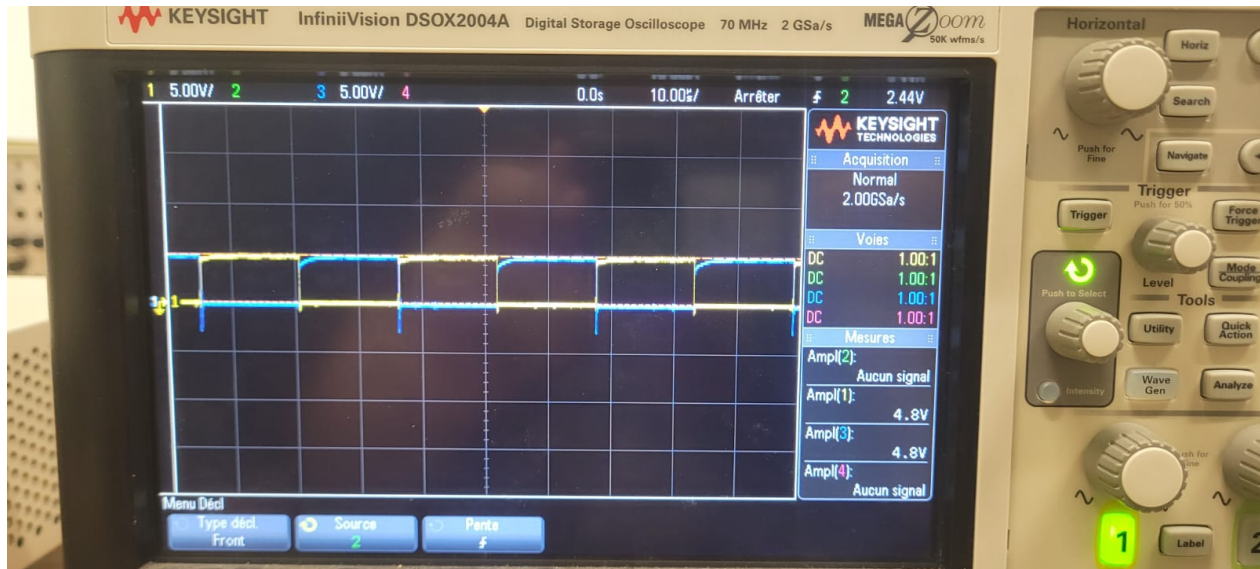
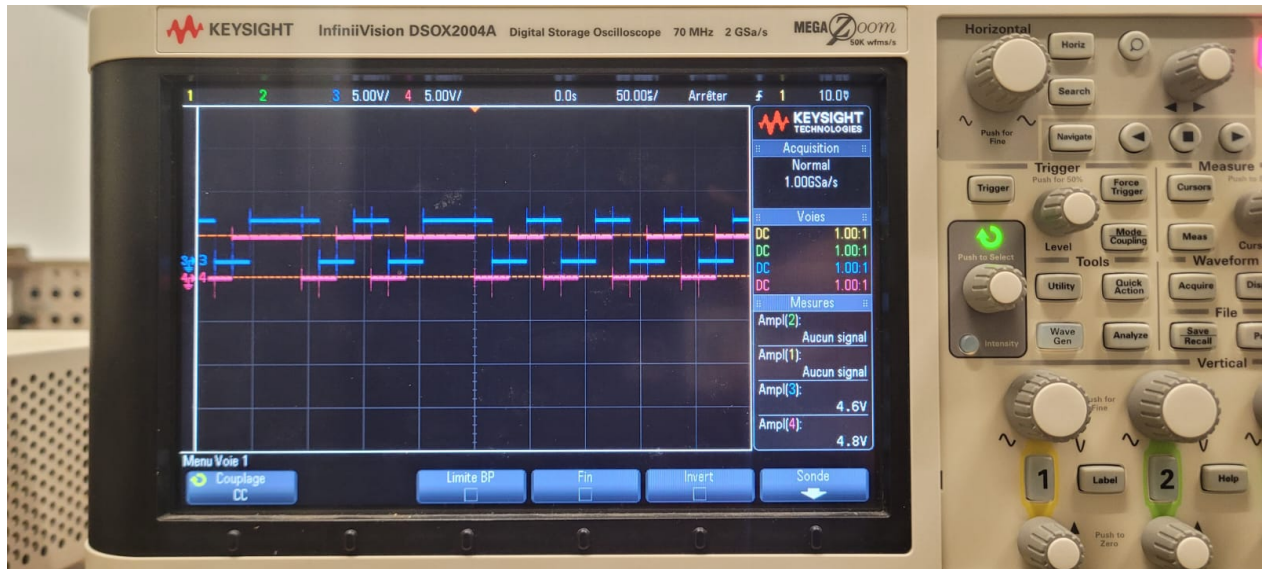


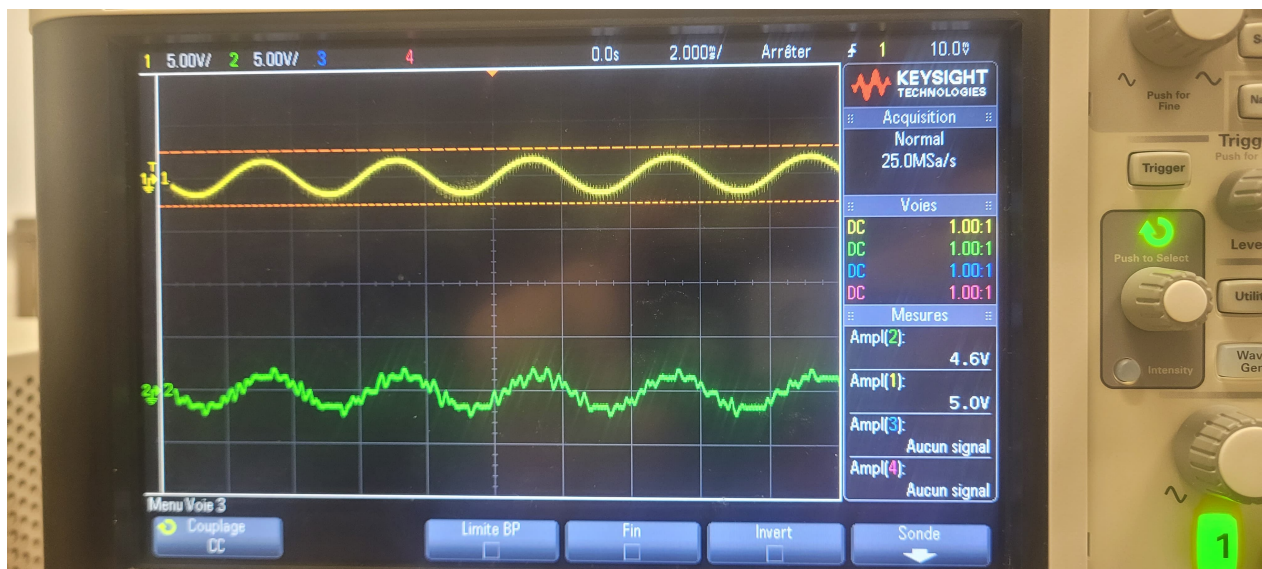
FIGURE 15 – Clock TX (jaune) et clock RX (bleu)

Étant donné que la bascule D du démodulateur génère un flux de bits identique à celui produit par la bascule D du modulateur, il en résulte que le signal en sortie du changeur de niveau du démodulateur est identique à celui présent à l'entrée négative de l'amplificateur différentiel du bloc modulateur. Cette observation peut être confirmée en comparant les deux signaux. On constate alors que leurs amplitudes et leurs fréquences sont presque identiques, comme illustré à la figure 16. Le signal démodulé suit le modèle du signal modulé, mais il est légèrement décalé.





**FIGURE 16** – Signal du changeur de niveau du démodulateur (en bleu) et du modulateur (en rose)



**FIGURE 17** – Entrée (jaune), Sortie du differential amplifier (bleu), Sortie du integrateur (rose) et la Sortie du système (vert)

On observe que le signal démodulé semble suivre le signal d'entrée, malgré une forme d'onde non sinusoïdale, figure 17. Lors de la démodulation du signal sinusoïdal à 250 Hz, le résultat obtenu s'avère insatisfaisant, car les écarts de mesure sont trop significatifs pour être considérés comme acceptables. Cette divergence entre les deux signaux peut s'expliquer par une fréquence d'échantillonnage insuffisante.

## 4. Comparaisons de spectres

Le spectre du signal numérique est modulé par la fonction sinc, dont tous les zéros se trouvent aux multiples de la fréquence d'horloge. Par conséquent, une augmentation de la fréquence d'horloge répartit les harmoniques sur une bande de fréquence plus large, rendant ainsi le signal de sortie plus sensible aux interférences provenant des autres harmoniques. De plus, avec une fréquence d'horloge suffisamment élevée, le filtre passe-bas peut éliminer plus efficacement la majorité des harmoniques indésirables, ce faisant, le signal de sortie devient de plus en plus proche d'une sinusoïde parfaite, tout comme le signal d'entrée.

32 kHz

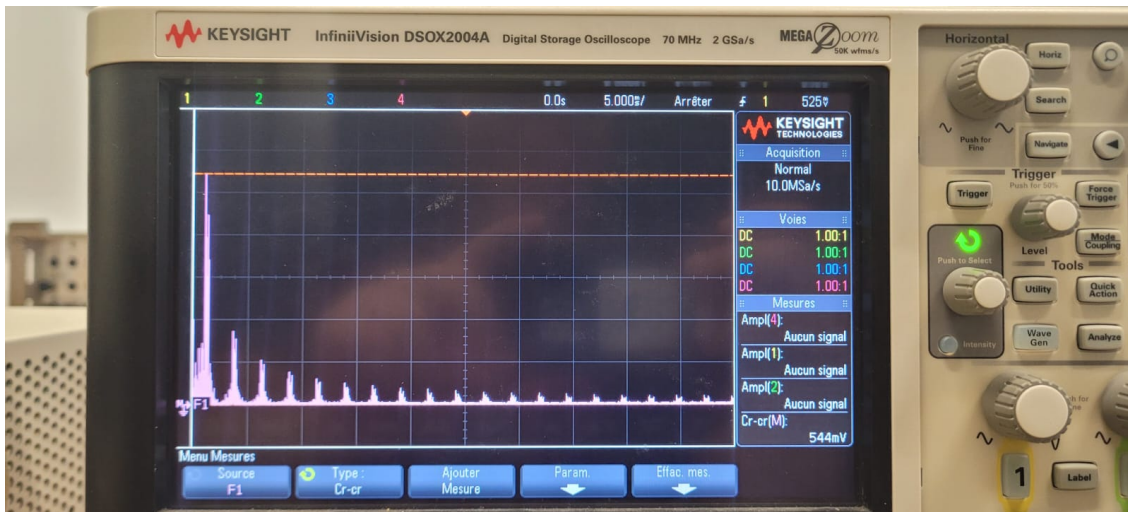


FIGURE 18 – FFT du signal d'entrée avec une fréquence d'horloge de 32 kHz

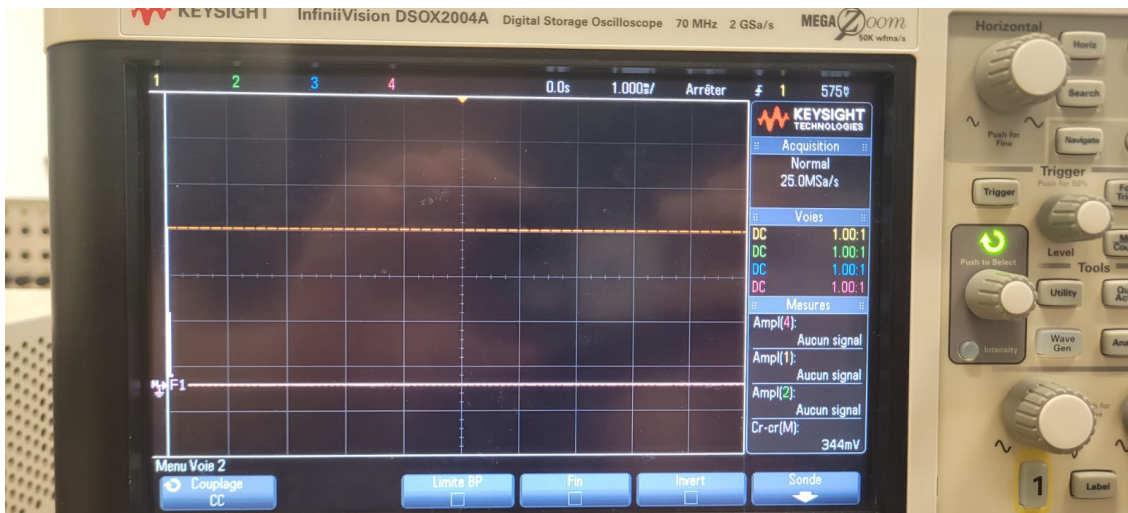


FIGURE 19 – FFT du signal de sortie avec une fréquence d'horloge de 32 kHz

Pour les autres fréquences, le temps du TP s'est écoulé et nous n'avons pas pu effectuer l'analyse.