|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Charte et Logo de l’entreprise | | | |
| **PFE : « Traitement de signal audio embarqué temps réel sur carte STM32 »**  **FIPA 2021** | | | |
|  | ENSTA Bretagne  2 rue F. Verny  29806 Brest Cedex 9, France  JÉZÉGOU, Pierre-Yves,  [pierre-yves.jezegou@ensta-bretagne.org](mailto:pierre-yves.jezegou@ensta-bretagne.org) |  | Contact :  Reynet Olivier,  [olivier.reynet@ensta-bretagne.fr](mailto:olivier.reynet@ensta-bretagne.fr)  Probst Irvin,  [irvin.probst@ensta-bretagne.fr](mailto:irvin.probst@ensta-bretagne.fr) |

# Remerciements

# Résumé

# Abstract

Sommaire

[Remerciements 2](#_Toc88215454)

[Résumé 3](#_Toc88215455)

[Abstract 3](#_Toc88215456)

[Sommaire 4](#_Toc88215457)

[Introduction *(3e livrable, 2/3 de page)* 5](#_Toc88215458)

[1. Besoin/Attentes du projet 6](#_Toc88215459)

[2. Plateforme cible. 7](#_Toc88215460)

[2.1. Carte cible 7](#_Toc88215461)

[2.2. Chaine de capture 7](#_Toc88215462)

[2.2.1. Le microphone 7](#_Toc88215463)

[2.3. Sortie audio 9](#_Toc88215464)

[3. Conversion PDM -> PCM 10](#_Toc88215465)

[3.1. Les échantillons 10](#_Toc88215466)

[3.1.1. PCM 10](#_Toc88215467)

[3.1.2. PDM 11](#_Toc88215468)

[3.2. Chaine de filtrage 11](#_Toc88215469)

[3.3. Intégration au microcontrôleur 15](#_Toc88215470)

[4. Les démonstrateurs 17](#_Toc88215471)

[4.1. Présentation des démonstrateurs : 17](#_Toc88215472)

[4.1.1. « Parrot » 17](#_Toc88215473)

[4.1.2. « Digital recorder » 17](#_Toc88215474)

[4.1.3. « Direct output » 17](#_Toc88215475)

[4.2. Configuration des périphériques de la carte 17](#_Toc88215476)

[Bibliographies 18](#_Toc88215477)

[Glossaires des termes techniques 18](#_Toc88215478)

[Table des figures 18](#_Toc88215479)

[Annexe 1 : Titre de l’annexe… 20](#_Toc88215480)

# Introduction *(3e livrable, 2/3 de page)*

* Introduction générale du projet
* Présentation de la structuration du rapport

# Besoin/Attentes du projet

* Lever les incertitudes sur l’acquisition audio temps réel :
  + Implémentation sur cible STM32

Créer une chaine de capture -> recopie audio sur un microcontrôleur STM32

* + Réglages du Microphone PDM/filtrage du signal

Affiner les réglages des blocs de traitement audio du microcontrôleur. Se détacher de la librairie statique (non libre) fournie par ST Micro pour la conversion PDM->PCM.

# Plateforme cible.

## Carte cible

Le Projet se base sur la carte de découverte commercialisée par ST Microelectronics : "STM32F429I-DISC1". Cette carte intègre un microcontrôleur 32 bits STM32F429xx. Ce microcontrôleur fait partie de la série de microcontrôleurs hautes performances : STM32F4, série qui se base sur un cœur ARM Cortex M4. Cette carte permet de se familiariser avec l’architecture ainsi que de concevoir des solutions intégrant un microcontrôleur de la famille STM32 qui est un standard de l’industrie embarqué. Cette carte intègre en plus du microcontrôleur, une interface de programmation ST-LINKV2, un écran LCD 2.4", plusieurs LED de débogue, 2 boutons poussoir, un port micro USB type B compatible OTG, une puce de SDRAM de 64 Mbit et un Gyroscope MEMS.

Une image contenant texte, équipement électronique

Description générée automatiquement

Figure  : Carte Cible (STM32F429I-DISC1)

## Chaine de capture

### Le microphone

Le projet a pour objectif principal de lever les incertitudes sur l’utilisation de microphone PDM pour la capture de son sur une plateforme utilisant un microcontrôleur STM32. En effet, les microphones PDM sont innovation intéressante pour la capture de son, car par leur nature numérique ils sont peut influencer par les bruits électromagnétiques de leur environnement, permettant ainsi d’obtenir un rapport signal sur bruit important a moindre coût. Un microphone PDM est généralement structuré comme suit :

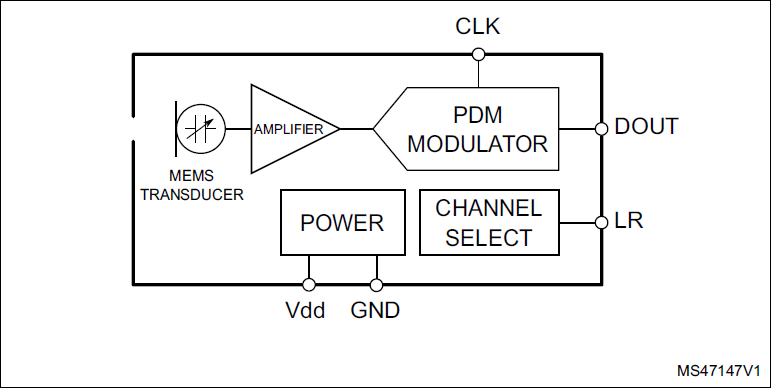


Figure  : Schéma bloc typique d’un microphone PDM

Sur la Figure 2, on a plusieurs blocs qui remplissent un rôle :

* MEMS Transducer :

Le transducteur MEMS est un condensateur dont la capacité va varier en fonction des variations de la pression locale de l’air, qui est caractéristique au déplacement d’une onde sonore.

* Amplifier

L’amplificateur va amplifier le signal en provenance du transducteur afin de fournir un signal adapté au modulateur PDM.

* PDM Modulator

Le Modulateur PDM va chaque front de l’horloge (CLK) convertir le signal analogique en provenance de l’amplificateur en un signal PDM (DOUT)

* Channel Select

Le sélecteur de canal informe influe sur le fonctionnement du modulateur PDM en indiquent s’il doit convertir le signal sur un front montant ou descendant de l’horloge, et donc définir si le microphone influx sur le canal gauche ou droit d’un signal stéréo, ceci permet de multiplexer deux microphones (gauche et droite) sur un unique flux PDM

* Power :

Le bloc Power correspond à l’alimentation du microphone PDM

Pour le projet nous travaillerons dans une configuration mono pour le Microphone PDM ce qui nous donne les connexions électriques suivantes :

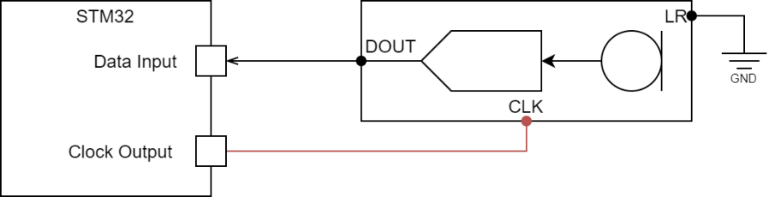


Figure  : Connexion du Microphone PDM en configuration mono

Notons que sur la Figure 3 le signal "LR" qui correspond au sélecteur gauche/droite est connecté directement à GND, indiquant que notre microphone travaille sur le canal gauche. Cependant, car nous travaillons en configuration mono le canal utilisé par le microphone n’a pas d’importance.

Dans notre application le microcontrôleur intègre un périphérique SAI (Serial Audio Interface) de générer les signaux nécessaires pour le contrôle des microphones PDM ainsi que l’acquisition en continu (sans influer sur la charge processeur) des échantillons PDM quand il est couplé au DMA. Ce qui permet d’appliquer un filtre sur le signal PDM pour le convertir en PCM uniquement quand le DMA nous indique que suffisamment d’échantillons PDM ont été chargés en mémoire, permettant au microcontrôleur d’exécuter le reste du temps d’autres instructions. Ce qui nous donne la chaine de capture suivante :

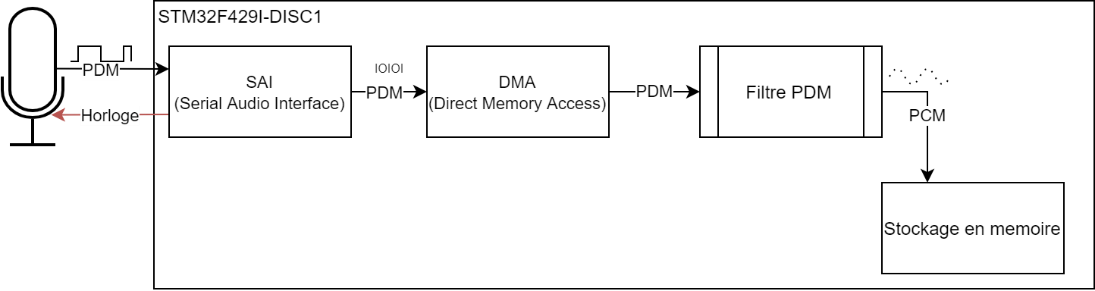


Figure  : Chaine de capture

## Sortie audio

Un deuxième objectif de projet et de reproduire les sons captés sur un hautparleur/casque. On à étudier précédemment l’aspect capture des données du son, pour l’aspect reproduction on va utiliser le DAC intégrer au microcontrôleur afin de recréer le signal analogique correspondant aux son captées. Le DAC intégrer à notre microcontrôleur a deux canaux de 12 bits, dans la configuration qu’il utilise sur notre carte il peut générer une tension comprise en 0.2 et -> avec dans notre cas ce qui nous donne une amplitude maximale :

Et donc un quantum :

Ces deux valeurs du DAC nous indique que pour adapter le signal PCM filtrer il faudra produire des échantillons sur 12 bits et comme la sortie du DAC est unipolaire (0-3V) il faudra ajouter un offset de 2047 ( ) afin de positionner le « zéro » de notre signal au milieux de l’excursion du DAC, ainsi le haut-parleur agissant comme un filtre passe bande dont la bande passante et comprise entre 20 Hz et 20kHz cette offset est gommer est ainsi on ne perd pas les valeur négatives de notre signal audio.

Maintenant que l’on a généré un signal électrique se pose la question de l’alimentation en courant du haut-parleur, en effet les haut-parleurs / casque ont une impédance très faible ( ) ce qui fait que si on les connecter simplement ainsi :

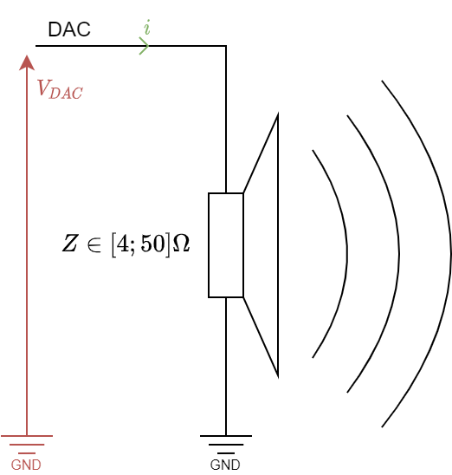


Figure : Montage direct d'un haut-parleur sur le DAC

Dans ce montage on obtient pour   une impédance du haut-parleur de :

Or la documentation du microcontrôleur nous indique que le courent maximum qui peut être délivré par une sortie est et le courant maximum qui peut être fournit par l’ensemble des sortie .

Donc pour pouvoir connecter un haut-parleur au dac sans avoir a ajouter un étage d’amplification il faut augmenter l’impédance minimum du haut-parleur c’est pourquoi j’ai décidé de réalisé le montage suivant :

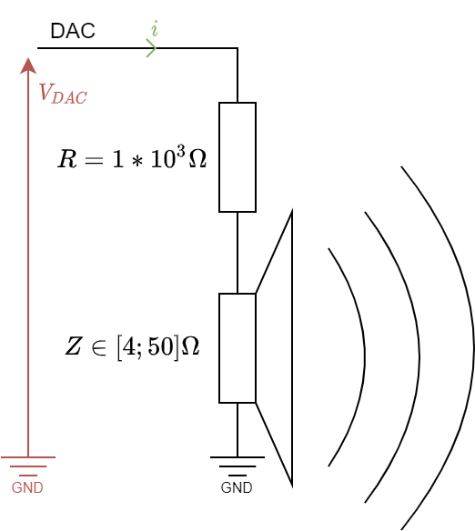


Figure : Branchement d'un haut-parleur en série avec un résistance de 1kΩ sur le DAC

Dans ce montage on obtient pour   une impédance du haut-parleur de :

Ce courant maximum donne une marge suffisante par rapport aux capacités du microcontrôleur pour s’assurer que le risque de destruction des ports du DAC est minimum.

Pour simplifier les connexions/déconnexions d’un haut-parleur/casque j’ai donc fabriqué un câble que l’on connecte sur les connecteurs Dupont de la carte et fournit un prise jack 3.5mm stéréo préchargé d’une résistance de sur chacun des deux canaux. Ce câble suit le schéma suivant :

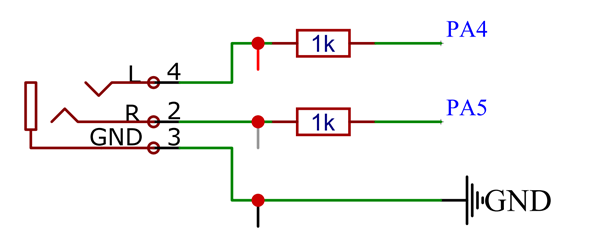


Figure : Schéma Électrique du câble DAC -> Jack 3.5mm

On remarque sur le schéma que j’ai fait sortir des fils pour connecter des sondes coté haut-parleur afin de mesurer les signaux reproduit par le DAC.

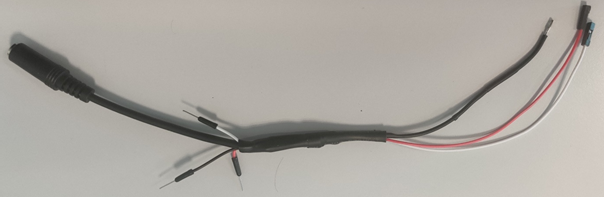


Figure : Cable DAC -> Jack 3.5mm

Le câble ainsi fabriqué utilise le code couleur des connecteur RCA (Blanc -> Gauche ; Rouge -> Droite) pour les fil de transportant le Signal et le Noir correspond à la masse

Du point de vue du logiciel le DAC est configuré pour convertir l’échantillon suivant de chaque canal quand il reçoit l’évènement de remplissage du conteur liée au Timer 2 du microcontrôleur. Dans le Timer 2 on peut configurer la fréquence qui correspond à la fréquence a laquelle l’évènement de remplissage du conteur apparait en configurent deux valeurs :

* "Prescaleur" (PSC)
* "Counter Period" (ARR)

On peut calculer ces deux valeur grâce à l’expression suivante :

Avec qui correspond à la fréquence du d’entrée du Timer.

Par exemple si on veut que le DAC ai une fréquence d’échantillonnage de 48 kHz () avec une fréquence

# Conversion PDM -> PCM

## Les échantillons

### PCM

Le PCM (Pulse Code Modulation) est une représentation numérique d’un signal analogique résultant de sa numérisation par échantillonnage. En effet pour construire un Signal PCM à partir d’un signal analogique un convertisseur analogique numérique (ADC) mesure la valeur du signal analogique à une fréquence appelé fréquence d’échantillonnage. Le résultat de cette mesure est alors stocké numériquement. Un signal PCM est donc défini par deux valeurs :

* Sa fréquence d’échantillonnage
* Le nombre de bits utilisé pour stocker la mesure

Cette deuxième valeur influe sur la précision de la valeur mesurée, en effet plus N est important plus le signal échantillonné aura de valeur possible et donc plus la mesure sera précise.

Prenons par exemple le signal suivant que l’on observe pendant 1 seconde :

Avec  Hz, et

Notre ADC peut mesurer une valeur appartement à l’intervalle Qu’il stocke dans un entier encodé sur 4 bits (0000 correspond à la valeur 0 et 1111 à la valeur 1). L’ADC effectue ses mesures à une fréquence . Cela nous donne donc les signaux suivants :

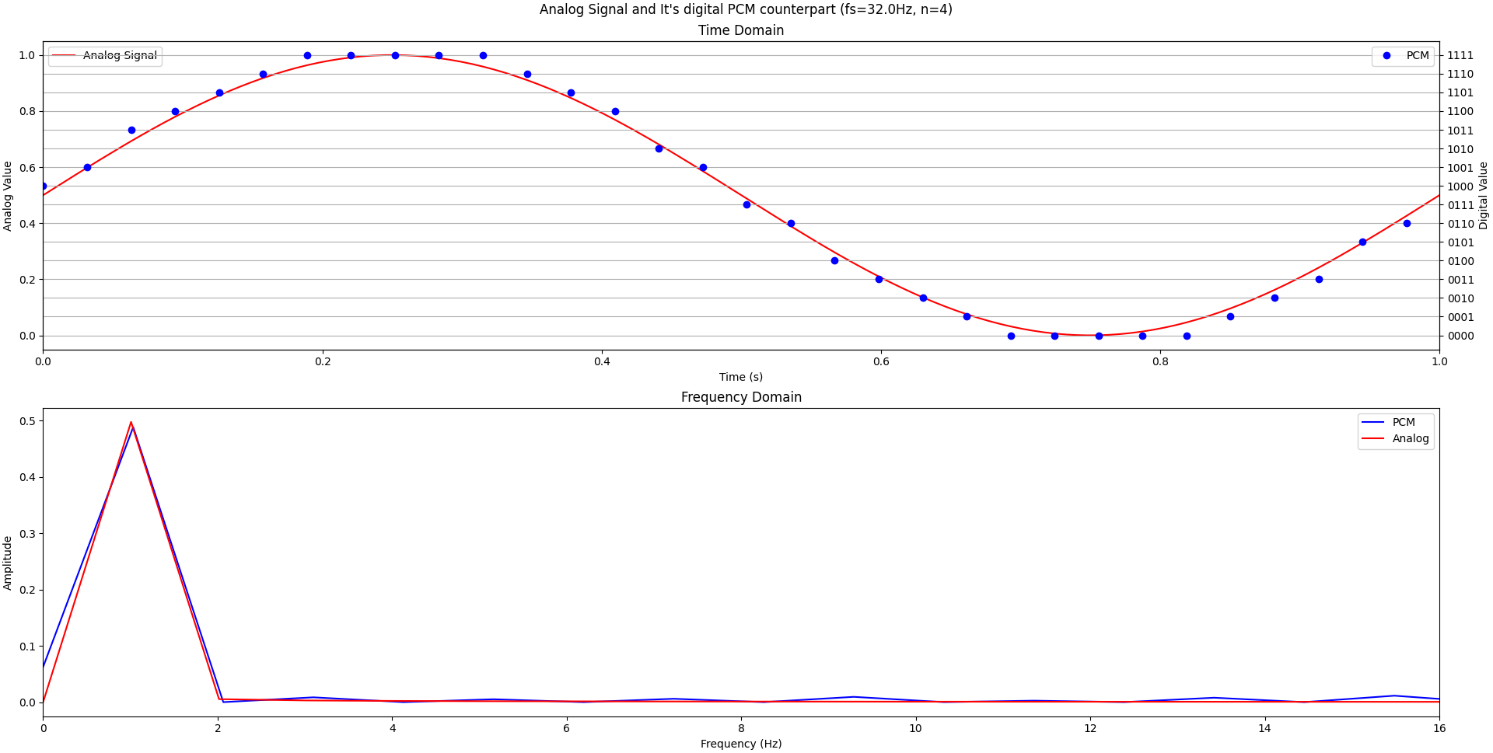


Figure  : Signal Analogique et sa conversion numérique en PCM (fs=32 Hz, n=4)

Les sons PCM sont généralement encodés sur 16 bits (65 536 valeurs possibles) et échantillonnés à pour les CD audio et pour la bande sonore d’un fichier vidéo.

### PDM

Le PDM (Pulse Density Modulation) et une représentation numérique d’un signal analogique. Cette représentation se caractérise par un flux de bits à haute fréquence. Flux dans lequel l’amplitude du signal analogique et déterminer à partir de la concentration de bit a 1 ou à 0.

Reprenons notre signal analogique que l’on observe pendant 1 seconde :

Avec  Hz, et

Le signal PDM sera alors le suivant :

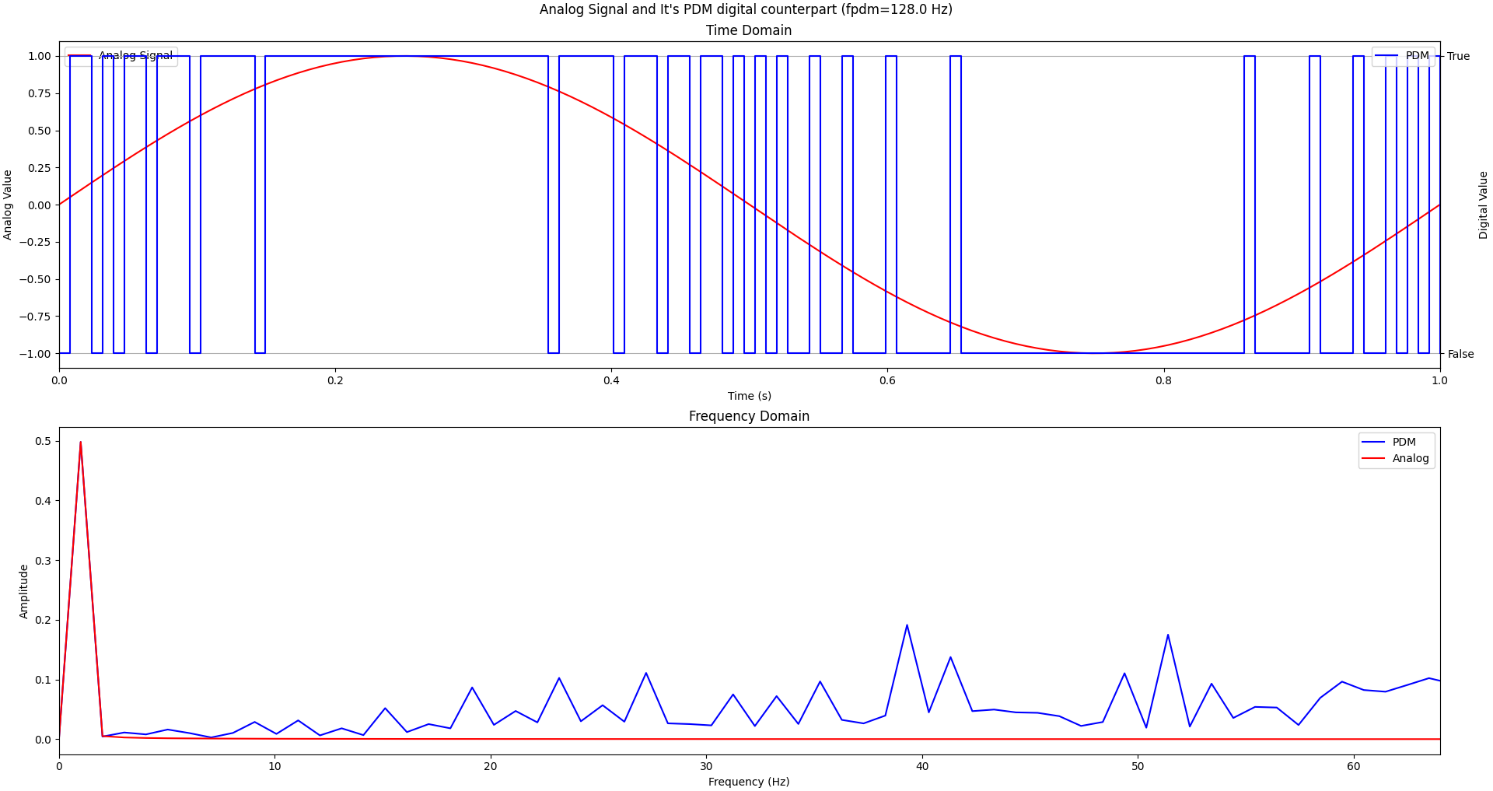


Figure 10 : Signal Analogique et sa conversion numérique en PDM (fPDM=128 Hz)

On distingue qu’une grande valeur positive est caractérisée par une forte concentration locale d’échantillons PDM à 1 et une grande valeur négative est caractérisé par une forte concentration locale d’échantillons PDM à 0. Un signal PDM est caractérisé par la fréquence du flux qui lui est associé. Notons que par rapport à la fréquence d’échantillonnage d’un signal PCM celle d’un signal PDM doit être bien plus élevée que (entre 48 et 128 fois plus importante) pour qualité similaire pour le signal.

## Chaine de filtrage

Le passage d’un signal PDM échantillonné à haute fréquence () vers un signal PCM échantillonné à plus basse fréquence () se fait par le filtrage du signal PDM par un filtre Passe Bas ayant une fréquence de coupure maximale , une fois le signal PDM filtré, on sous échantillonne le signal afin de faire correspondre sa fréquence d’échantillonnage à celle recherché pour le signal audio (). Ce sous-échantillonnage est fait avec un facteur . Généralement . On applique ensuite au signal un offset et un gain pour l’adapter l’amplitude désirée pour le signal PCM. Ce qui nous donne la chaine de filtrage suivante :

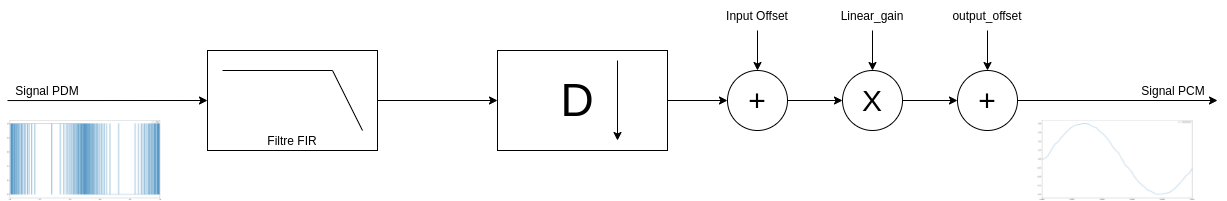


Figure  : Chaine de filtrage PDM → PCM

Pour mieux comprendre le fonctionnement du filtre, nous allons étudier un signal pendant son passage au travers de cette chaine de filtrage. Nous utiliserons un signal en dent de scie suivant l’expression suivante :

Le signal que nous utiliserons dans cet exemple a les paramètres suivants :

|  |  |
| --- | --- |
| Paramètre | Valeur |
| Fréquence PDM |  |
| Fréquence d’échantillonnage PCM |  |
| Fréquence fondamentale |  |
| Ordre de la série de Fourier |  |
| Durée du signal |  |

Ce qui donne le signal suivant (centré une période) :

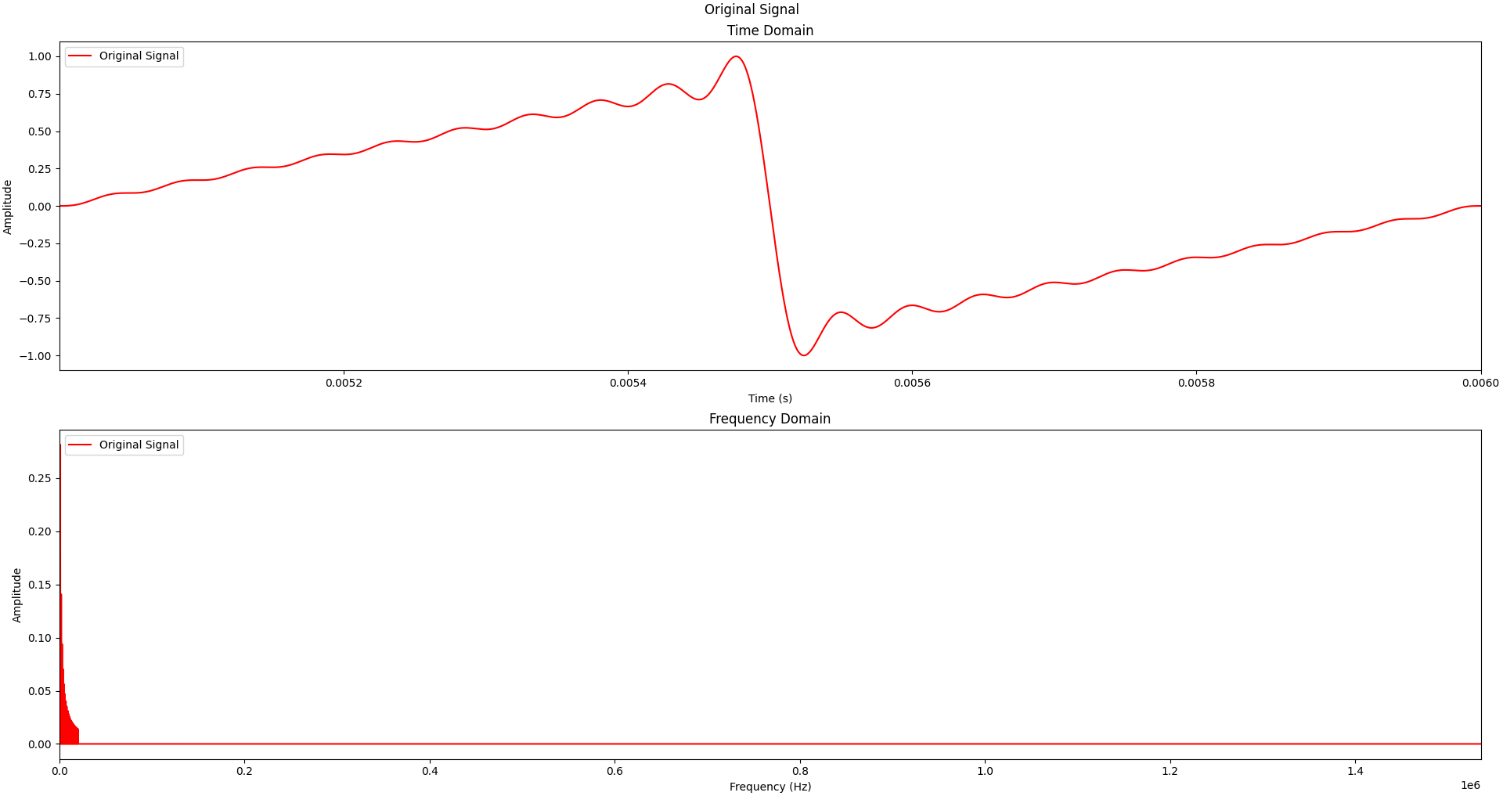


Figure  : Signal Original

Avant d’envoyer le signal dans la chaine de filtrage on le converti en PDM ce qui nous donne le signal suivant :

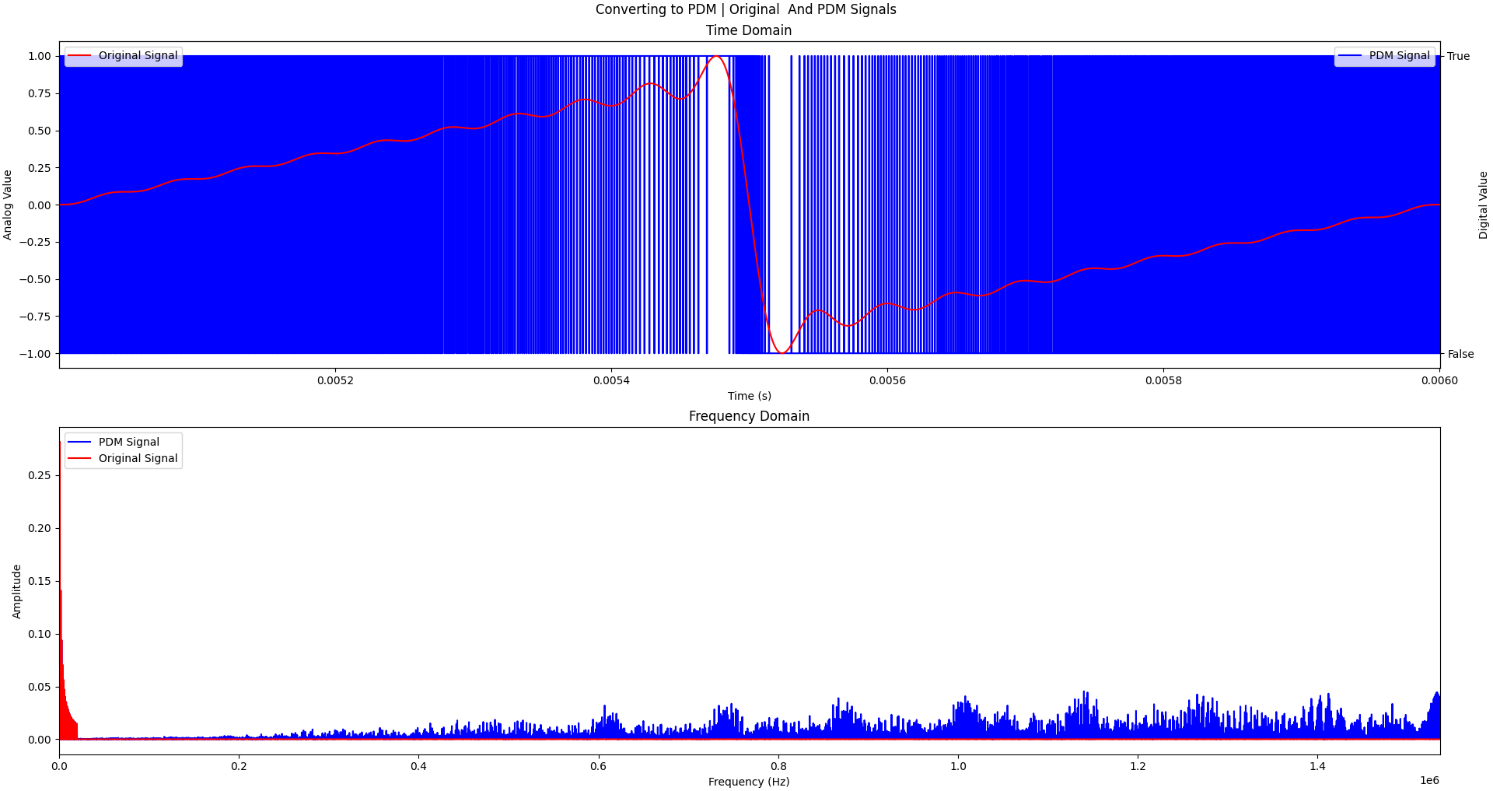


Figure  : Conversion PCM (rouge) → PDM (bleu)

La première étape de la chaine et d’appliquer un filtre passe-bas au signal, dans notre cas c’est un filtre numérique FIR (Finite Impulse Response) qui nous permet d’éliminer les hautes fréquences caractéristiques d’un signale PDM pour ne laisser que les fréquences utiles ce qui nous donne le signal suivant :

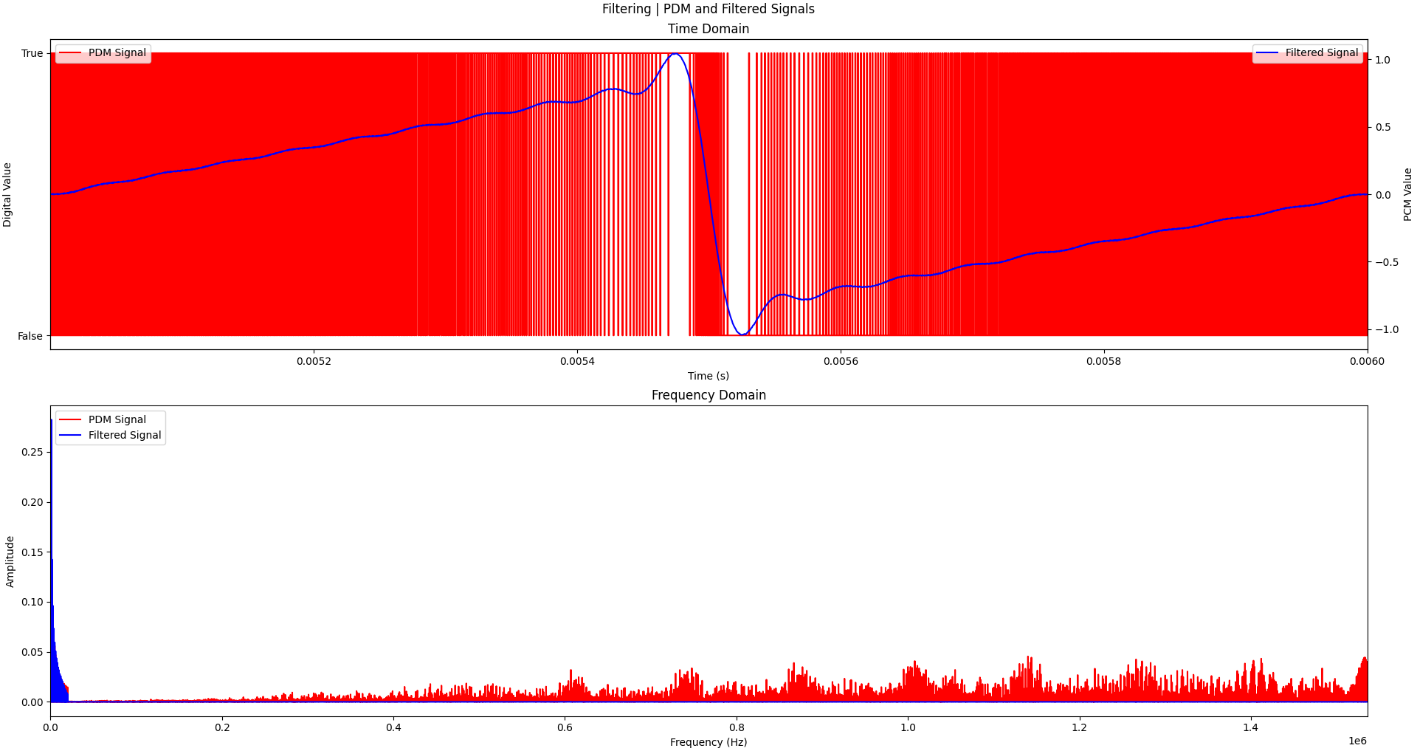


Figure 14 : Conversion PDM (Rouge) -> PCM (Bleu)

Une fois le signal le filtré il a la même fréquence d’échantillonnage que le signal PDM. Or le signal PDM est échantillonné a haute fréquence pour éloigner le plus possible les bruits générés par sa nature de la bande utile, maintenant que le signal a été filtrer la bande nécessaire est très inférieur à celle du signal PDM. On va donc sous échantillonner le signal filtré à la fréquence recherchée pour le signal PCM. Pour se faire un va sous échantillonner le signal filtré par un facteur de décimation :

Sous échantillonnage qui nous donne le signal suivant :

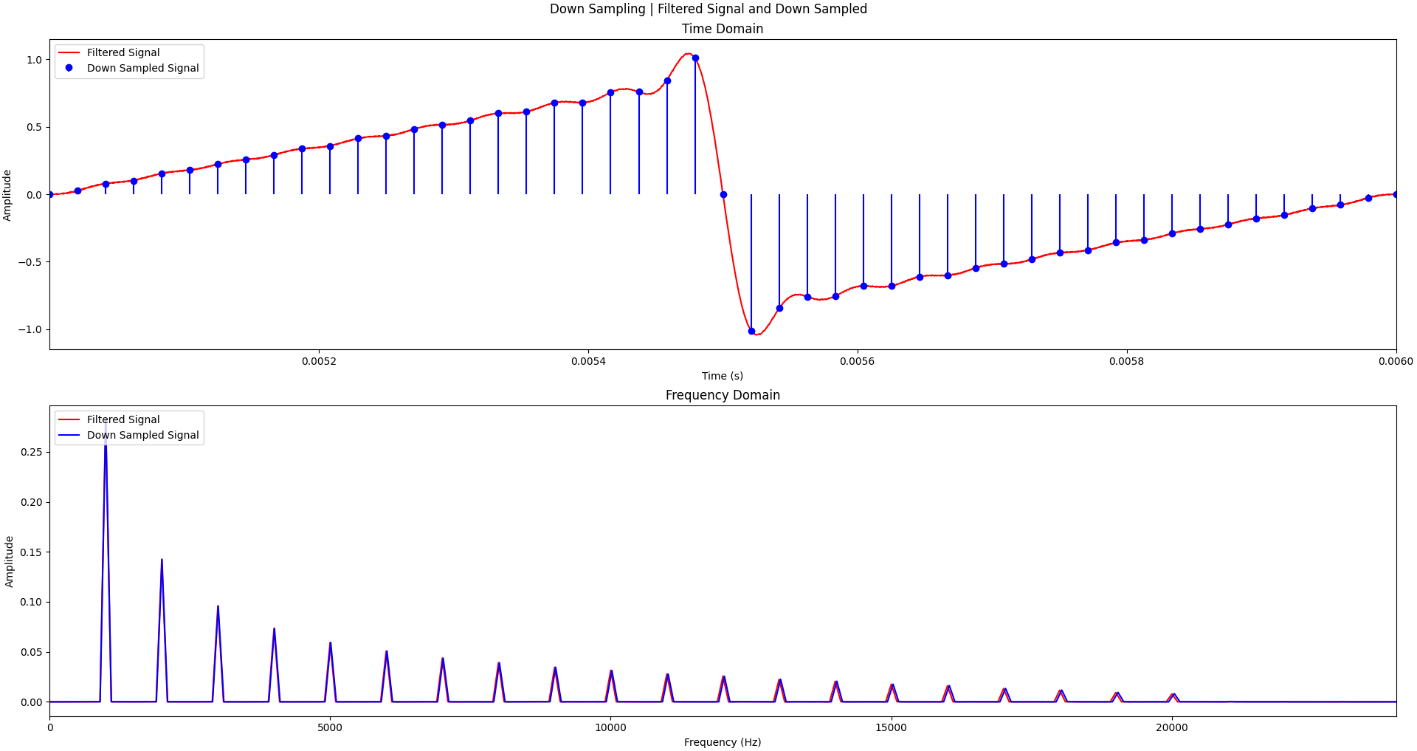


Figure 15 : Sous échantillonnage du signal filtré

Une fois le signal sous-échantillonné on applique un gain et un offset sur le signal pour l’adapter a la sortie PCM nous obtenons alors le signal suivant[[1]](#footnote-1) en sorti de chaine :

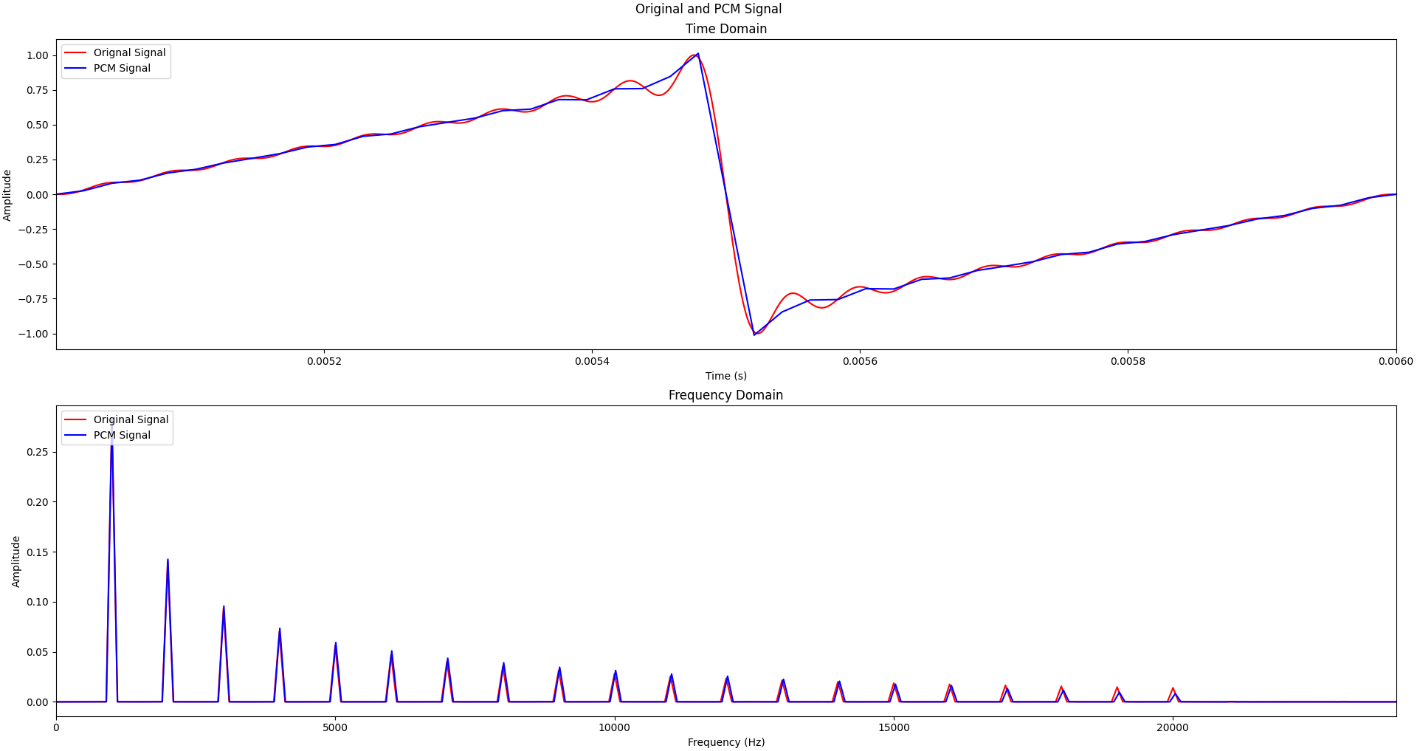


Figure 16 : Signal original (Bleu) et signal en sortie de chaine de filtrage (Rouge)

## Intégration au microcontrôleur

Les échantillons PDM arrivent dans la mémoire RAM via le DMA qui charge en continue les données en provenance du périphérique SAI dans un buffer accessible par le programme. Ce buffer est circulaire, c’est-à-dire qu’une fois la fin de celui-ci atteinte le DMA revient au début pour stocker les échantillons suivants. Afin de notifier le programme de sa position dans le buffer le DMA lève 2 interruptions, une première quand il passe la moitié du buffer la seconde à la fin de celui-ci. C’est interruption sont traitée par le programme dès que le lever via l’appel de fonction de "Callbacks". Ces fonctions agissent alors sur deux variables une première qui notifie le programme principal de la présence de nouvelles données dans le buffer et une seconde qui indique dans quelle moitié du buffer lire les données. Ce qui nous donne le processus suivant qui est intégré au programme principal :

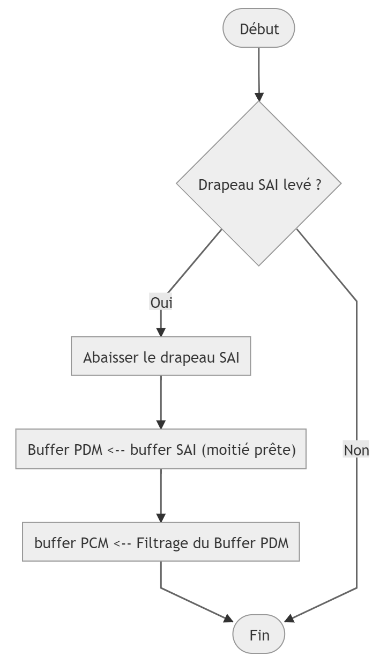


Figure  : Logigramme, Gestion des interruptions SAI

Dans ce processus, on vérifie si le drapeau SAI est levé, si oui on charge dans le buffer PDM la moitié dont le DMA vient de terminer l’écriture, puis on filtre le buffer PDM et l’on stocke le résultat dans le buffer PCM à la disposition du reste du programme.

Le bloc de filtrage utilise une librairie C que j’ai retravaillée pour l’adapter à nos besoins. Cette librairie utilise la fenêtre FIR fournis par la bibliothèque Python "Scipy" dont les coefficients sont exportés sous forme de tableau constant C, fournissant une lookup table pour la convolution de la fenêtre FIR avec le signal PDM.

Pour gagner en performance et en simplicité plutôt que travailler sur des échantillons PDM distinct, la librairie utilise des blocs de 16 échantillons PDM qui correspondent au format des données transmises par le périphérique SAI. Cette utilisation de blocs de 16 bits applique donc un premier sous échantillonnage au signal PDM d’un facteur 16.

Pour filtrer notre signal PDM, cette librairie nous fournit deux fonctions :

* "pdm\_fir\_flt\_put" :

Cette fonction ajoute un mot PDM au buffer du filtre sur lequel on applique la fenêtre FIR. La taille de ce buffer est fixée par l’ordre du filtre FIR. Il a fonctionnement circulaire qui permet de reproduire l’aspect glissant de la convolution d’un signal et d’une fenêtre.

* "pdm\_fir\_ftl\_get" :

Cette fonction calcule la convolution entre le buffer du filtre est la fenêtre FIR, et donc qui produit un échantillon PCM

La librairie tels que fournis nous permet donc d’implémenter dans le bloc de filtrage et une partie du bloc de sous échantillonnage de la chaine de filtrage PDM (cf. Figure 7). Pour compléter la chaine j’ai don ajouter a la libraire une structure de donnée contenant la configuration de la chaine de filtrage (facteur de sous échantillonnage, facteur d’amplification, offset…) ainsi que la fonction :

* "pdm\_fir\_flt\_chunk" :

Cette fonction produit le signal PCM correspondant au buffer PDM qu’on lui fournit en lui appliquant les différentes étapes de la chaine de filtrage, c’est cette fonction que l’on appelle en Figure 13 dans le bloc "buffer PCM <-- Filtrage du Buffer PDM" pour filtrer le signal PDM.

Si l’on résume le DMA rempli automatiquement le buffer SAI à partir des données transmises par le périphérique SAI, dès que le DMA termine l’écriture d’une moitié du buffer SAI un drapeau est levé pour que le programme principal entame le filtrage de cette moitié pour un usage ultérieur des échantillons PCM par le programme.

Pour estimer les performances de la chaine de filtrage, prenons le démonstrateur "Direct Output". À partir de ce démonstrateur, on va mesurer à l’oscilloscope deux signaux :

* Un signal à 3V quand le programme transfert les données dans le buffer du DAC (Channel 1)
* Un signal à 3V quand le programme passe le signal PDM dans la chaine de filtrage (Channel 2)

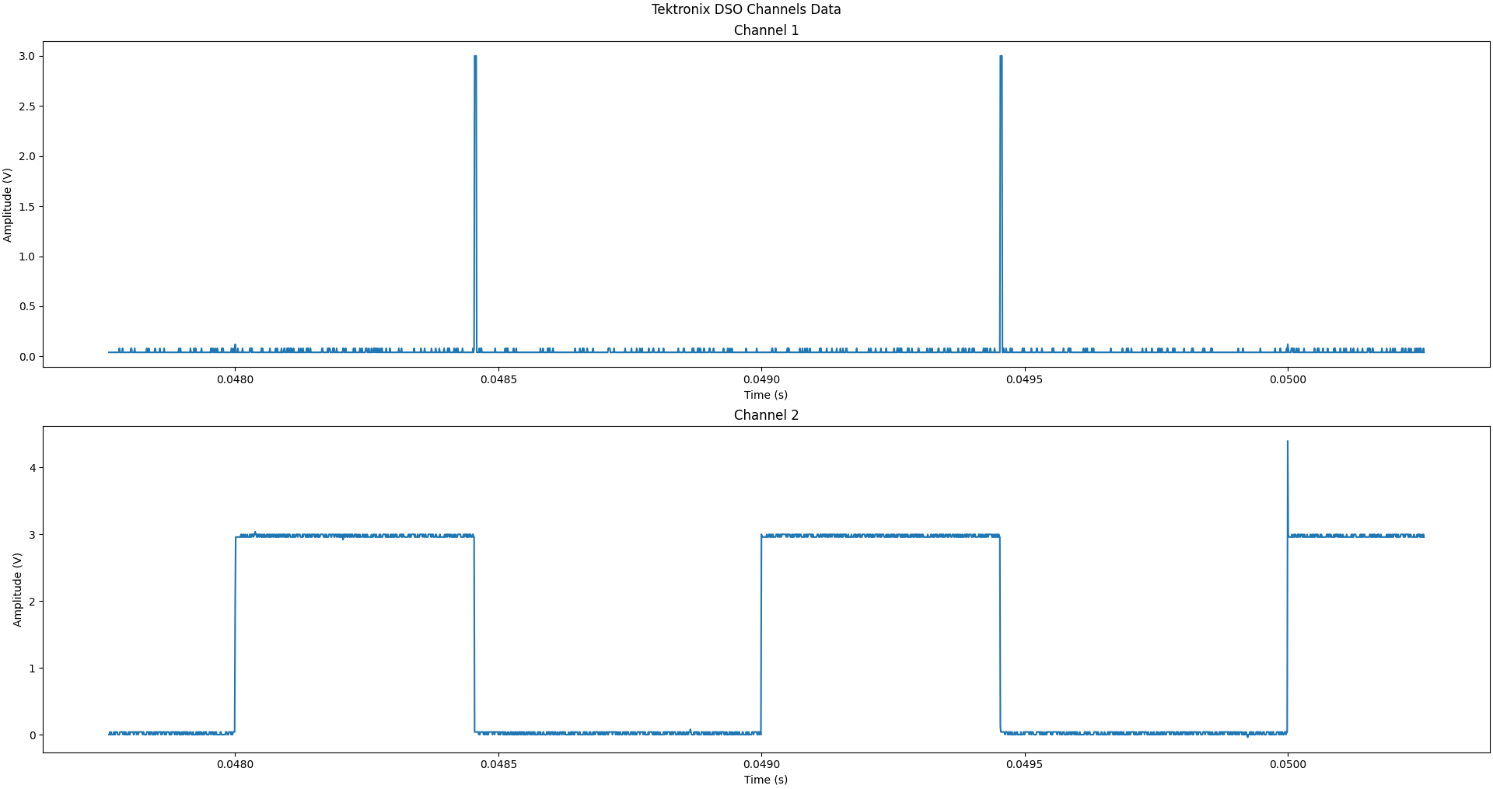


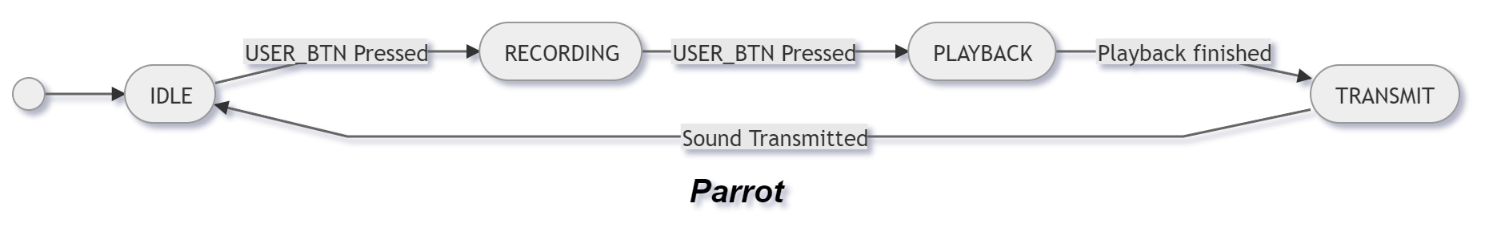
Figure 18 : Signaux de copie sur le DAC et de filtrage pour le démonstrateur "Direct Output"

Le démonstrateur est configuré pour que les drapeaux propres au DMA (SAI et DAC) se lèvent toutes les 1 ms, ce que l’on peut voir sur le "Channel 1" avec la fréquence à laquelle le programme copie les données PCM sur le DAC. Sur le "Channel 2" on peut mesurer un temps à 3V de soit environ 45 % du temps, laissant 55 % de temps pour d’autres traitements (écriture sur une clé USB…).

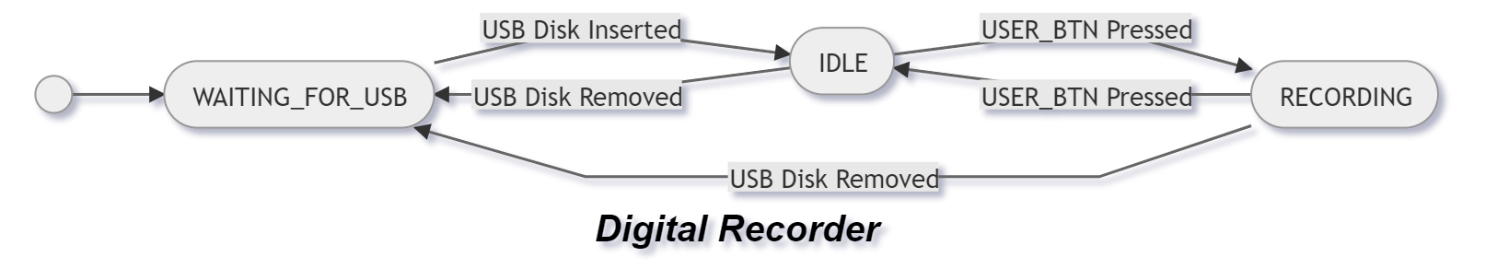
# Les démonstrateurs

## Présentation des démonstrateurs :

### « Parrot »



### « Digital recorder »



### « Direct output »

Une image contenant texte, périphérique, sombre, mètre

Description générée automatiquement

## Configuration des périphériques de la carte

# Bibliographies

olegv142. (2017). *PDM bitstream FIR filter*. Retrieved from Github.com: https://github.com/olegv142/pdm\_fir

# Glossaires des termes techniques

|  |  |
| --- | --- |
| **Terme ou acronyme** | **Définition** |
| ADC | "Analog to Digital Converter". Convertisseur analogique vers Numérique. |
| Buffer | Espace mémoire tampon |
| Buffer Circulaire | Un buffer circulaire est un buffer de taille fixe auquel on a rejoint le début et la fin de façon à ce qu’il puisse recevoir des valeurs de façon infinies, les nouvelles valeurs remplaçant les anciennes au fur et à mesure que l’on en ajoute |
| DAC | "Digital to Analog Converter". Convertisseur numérique vers Analogique. |
| DMA | "Direct Memory Access". Composant du microcontrôleur permettant l’échange de données entre la RAM et les périphériques sans impacter l’exécution du programme principal |
| FIFO | "First In First |
| LookUp Table (LUT) | « Table de Correspondance » Structure de données qui contient des données précalculer pour afin de réduit le temps nécessaire au programme pour effectuer une opération complexe en la remplaçant par une consultation de la table. Cependant, une LUT peut prendre beaucoup d’espace en mémoire. |
| MEMS | "MicroElectroMechanical Systems", un MEMS est un système dont la taille est de l’ordre de quelques micromètres, cette taille très réduite permet d’associer les propriétés électriques d’un semi-conducteur à celle d’un capteur mécanique en ayant un encombrement minimum |
| PCM | "Pulse Code Modulation". Modulation d’un signal numérique où chaque échantillon stocke le niveau du signal à un instant T |
| PDM | "Pulse Density Modulation". Modulation d’un signal numérique où le niveau du signal et définie par la densité d’échantillons à "1" |
| SAI | "Serial Audio Interface". Interface numérique de transfert de signaux audio en série |
|  |  |
|  |  |

# Table des figures

[Figure 1 : Carte Cible (STM32F429I-DISC1) 7](#_Toc88215481)

[Figure 2 : Schéma bloc typique d’un microphone PDM 8](#_Toc88215482)

[Figure 3 : Connexion du Microphone PDM en configuration mono 8](#_Toc88215483)

[Figure 4 : Chaine de capture 9](#_Toc88215484)

[Figure 5 : Signal Analogique et sa conversion numérique en PCM (fs=32 Hz, n=4) 10](#_Toc88215485)

[Figure 6 : Signal Analogique et sa conversion numérique en PDM (fPDM=128 Hz) 11](#_Toc88215486)

[Figure 7 : Chaine de filtrage PDM → PCM 12](#_Toc88215487)

[Figure 8 : Signal Original 12](#_Toc88215488)

[Figure 9 : Conversion PCM (rouge) → PDM (bleu) 13](#_Toc88215489)

[Figure 10 : Conversion PDM (Rouge) -> PCM (Bleu) 13](#_Toc88215490)

[Figure 11 : Sous échantillonnage du signal filtré 14](#_Toc88215491)

[Figure 12 : Signal original (Bleu) et signal en sortie de chaine de filtrage (Rouge) 14](#_Toc88215492)

[Figure 13 : Logigramme, Gestion des interruptions SAI 15](#_Toc88215493)

[Figure 14 : Signaux de copie sur le DAC et de filtrage pour le démonstrateur "Direct Output" 16](#_Toc88215494)

# Annexe 1 : Titre de l’annexe…

On doit au minimum trouver en annexe :

* Les documentations constructeurs des composants choisis sur étagère
* Le détail de certains calculs jugés « longs »
* Les comptes-rendus rédigés au fil des séances de projet

1. Il a été appliqué sur ce signal un gain linéaire de 1 et un offset de 0 (signal identique au signal sous échantillonné) [↑](#footnote-ref-1)