

R&T

Semestre 2

2023/2024

Telecom 2

Ressources : R205 (Signaux et systèmes.) et R206 (Numérisation)

TP n°4 : Echantillonnage

Durée du T.P. : 3h

Objectifs du T.P. :

- Etude expérimentale de l'échantillonnage d'un signal ☐ Etude temporelle et fréquentielle.
- Observation de repliement du spectre.
- Mise en œuvre d'un filtre anti-repliement

Matériel :

- Carte d'Entrées/Sorties (E/S), PCIe 6361 de National Instrument avec bornier de connexions.
- Logiciel LabVIEW pour la simulation
- Générateur de fonctions (G.B.F.) : Rigol DG 4062
- Oscilloscope 4 voies : Keysight DSO-X 3014T
- Logiciel Keysight BenchVue pour les captures d'écrans

**I / Préparation :**

- ☐ La totalité du sujet devra être lue par les 2 membres du binôme avant la séance de T.P..

I.1 / Echantillonnage d'un signal sinusoïdal

On considère un signal sinusoïdal $V_o(t)$ de fréquence $f_o=1\text{kHz}$ et d'amplitude de $5V_{\text{crête-à-crête}}$. Ce signal est échantillonné à $f_{\text{ech}}=8\text{kHz}$. On appelle $V_{\text{com}}(t)$ le signal de commande d'échantillonnage (peigne de Dirac). Le résultat de l'échantillonnage sera le signal $V_{\text{ech}}(t)$, le signal échantillonné.

- ☐ Faire une représentation schématique rapide en indiquant où se situent ces 3 signaux.
- ☐ Calculer la période du signal ; T_o et celle de l'échantillonnage, T_{ech} .
- ☐ Représenter l'allure du chronogramme de $V_o(t)$, $V_{\text{com}}(t)$ et de $V_{\text{ech}}(t)$.
- ☐ Représenter l'allure du spectre en amplitude de ces trois signaux.

Ces deux points précédents sont fondamentaux et doivent être traités correctement. Pour cela il est recommandé de les tracer sur l'annexe proposée.

- ☐ Recommencer la question précédente pour une fréquence d'échantillonnage de : $f_{\text{ech}}=5\text{kHz}$.

- Rappeler le théorème de Shannon pour l'échantillonnage. Pour quelles valeurs de f_{ech} le théorème de Shannon est-il respecté ?

I.2 / Echantillonnage d'un signal audio

On considère un signal audio de type conversation, par exemple du type « conversation.mp3 » étudié dans le TP1. Le relevé du spectre de ce signal est donné en Figure 1.

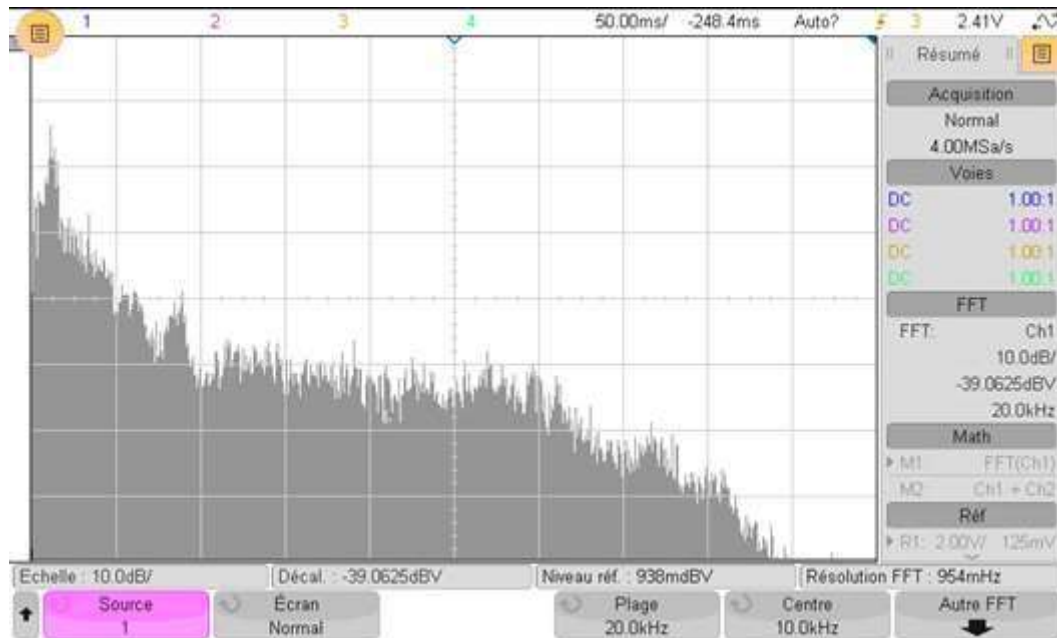


Figure 1: Relevé du spectre d'un signal audio de type « conversation »

- Donner la signification de « l'occupation spectrale à 40dB ». Sa dénomination en anglais est : Occupied Bandwidth, OBW. A quoi correspond-elle concrètement ?
- Mesurer approximativement sur la Figure 1 l'occupation spectrale à 40 dB signal audio.

Pour simplifier, on prendra par la suite la représentation du spectre du signal audio donnée en Figure 2.

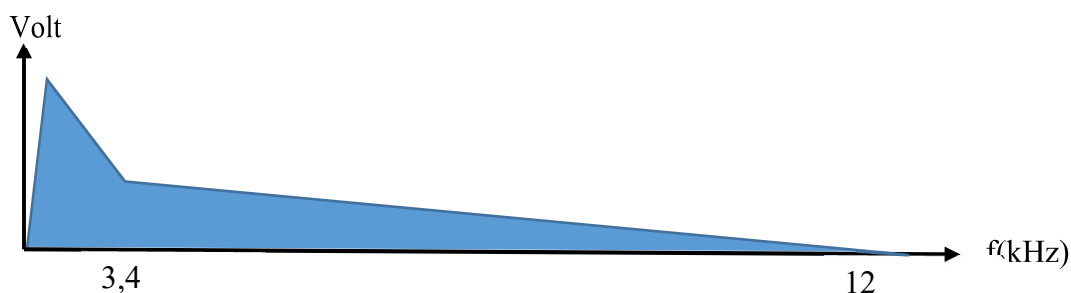


Figure 2: représentation simplifiée du spectre du signal audio

Ce signal est échantillonné à une fréquence de $f_{\text{ech}}=8\text{kHz}$.

- Représenter l'allure du spectre du signal échantillonné. Le théorème de Shannon est-il respecté ? Quel est le problème ?
- Rappeler ce qu'est un filtre anti-repliement. Quel est son intérêt ? Quels sont ses caractéristiques ?

- On place un filtre anti-repliement de fréquence de coupure 3,4kHz. Représenter l'allure du spectre échantillonné dans ce cas.

II / Présentation du contexte expérimental

L'objectif de ce TP est d'étudier l'échantillonnage d'un signal analogique au moyen d'une carte Entrées/Sorties dont la référence est : PCI 6251. Cette carte sera pilotée par un fichier exécutable sur le logiciel Labview.

Le schéma fonctionnel de la chaîne est le suivant :

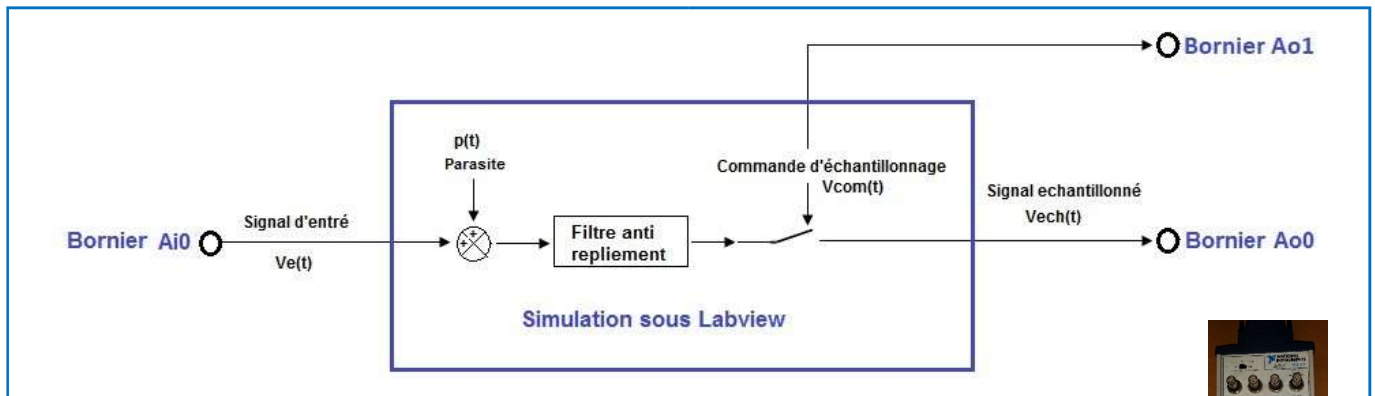


Figure 3 : schéma synoptique de la chaîne d'échantillonnage



Remarques :

- Le signal d'entrée, sera généré à l'aide du GBF ou de la sortie de la carte son du PC. Il sera appliqué à l'entrée AI0 du bornier de connexions (« I » pour Input).
- Le signal échantillonné, sera visualisable sur la sortie AO0 du bornier de connexions (« O » pour output).
- Le signal de commande d'échantillonnage sera visible sur la sortie AO1.

Les sorties, AO0 et AO1 seront donc reliées à l'oscilloscope.

Le fichier nécessaire à cette expérience est disponible sur l'ENT.

- A partir de la plateforme numérique, télécharger le dossier « Acquisition.zip » puis le décompresser sur le bureau.
- Identifier le fichier « TP4 Echantillonnage.vi ».

III / Échantillonnage d'un signal sinusoïdal

Pour comprendre la globalité de cette étude il faut lire la totalité de ce paragraphe avant de commencer la réalisation des manipulations.

- ☐ Lire la totalité de ce paragraphe !

III.1 / Configuration et étude du signal d'entrée

Dans un premier temps on va générer le signal $V_o(t)$ qui sera ensuite échantillonné. Celui-ci est défini comme suit :

- ☐ Forme : sinusoïdale
- ☐ Fréquence : 1kHz
- ☐ Amplitude : 5V crête-à-crête

- ☐ Calculer la valeur efficace de ce signal, V_{oeff} . Convertir cette valeur en dBμV.

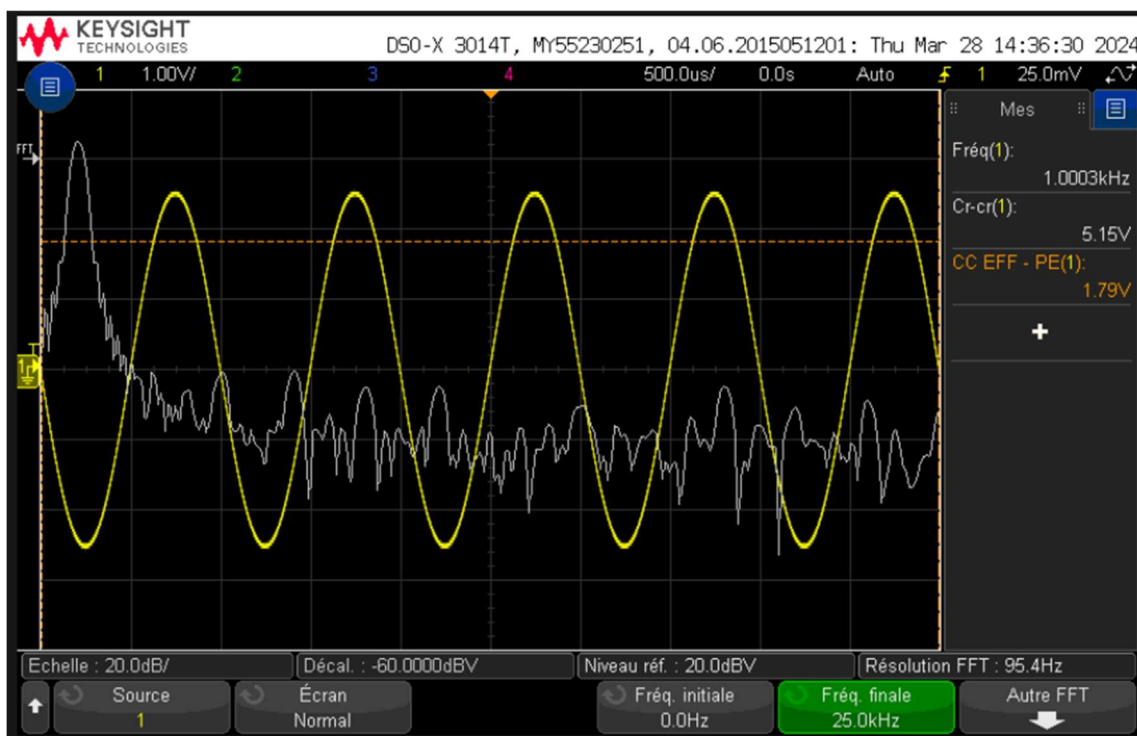
$$V_{\text{oeff}} = V_{\text{max}} / \sqrt{2}$$

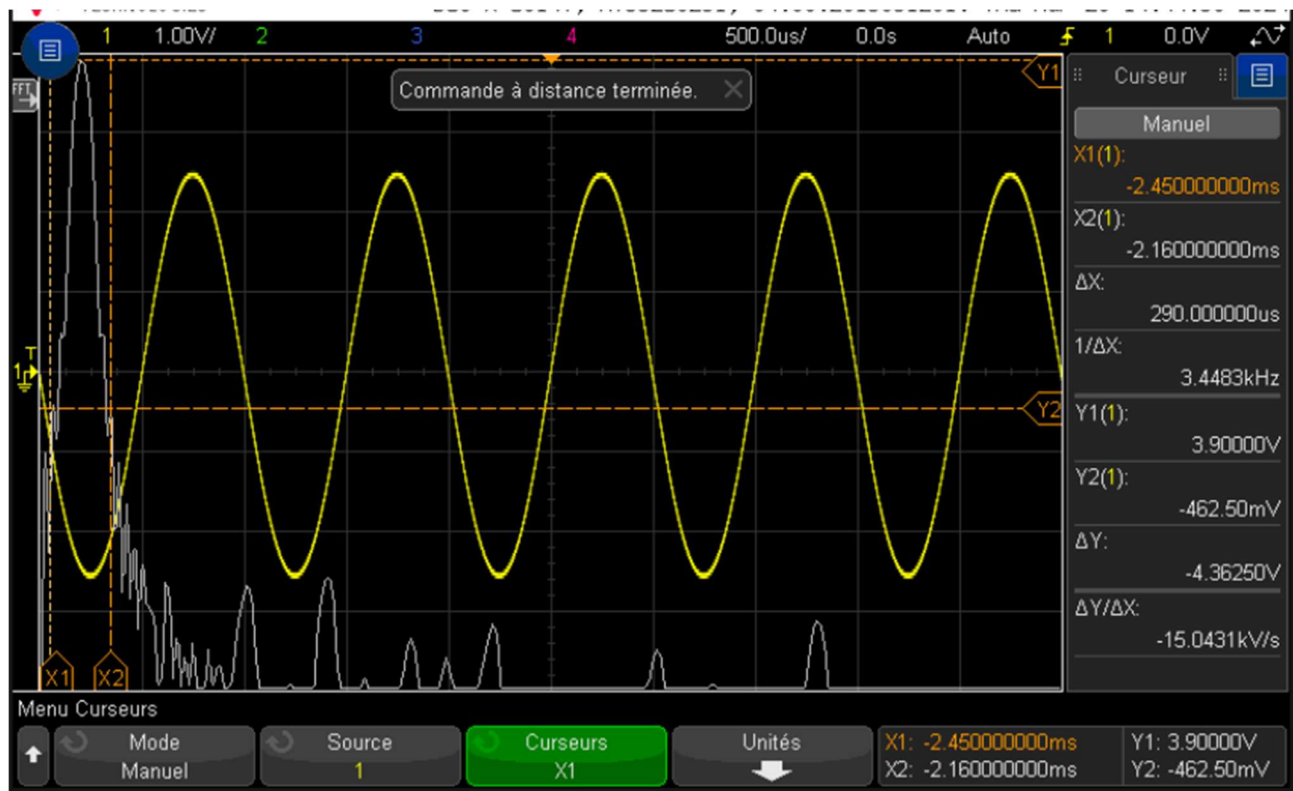
$$\text{Avec } V_{\text{max}} = 2.5 \text{ V on a } V_{\text{oeff}} = 2.5 / \sqrt{2} = 1.77 \text{ V}$$

- ☐ Configurer le GBF afin de générer un signal demandé. Vérifier ce signal en le visualisant à l'oscilloscope.

Forme : sinusoïdale , Fréquence : 1kHz , Amplitude : 5V crête-à-crête

- ☐ Observer le spectre du signal $V_o(t)$ à l'aide du module FFT de l'oscilloscope. Il est recommandé de prendre une échelle allant de 0 à 25kHz et une échelle verticale de 10dB/div. ☐ Relever la raie observée à l'aide de curseurs et comparer avec la valeur théorique attendue.





III.2 / Mise en œuvre

- ☐ Appliquer le signal $V_o(t)$ à l'entrée AI0 (I pour Input) du bornier de connections. sera le signal à échantillonner.

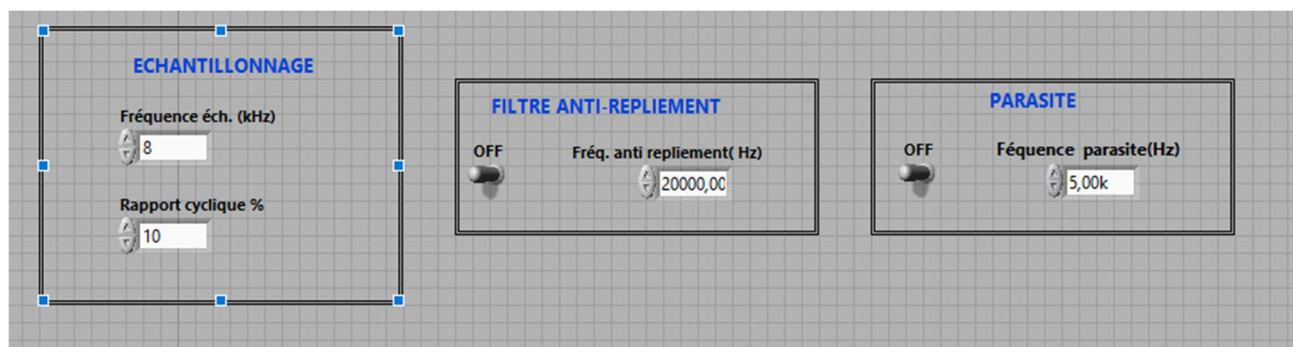


- ☐ Ouvrir et lancer le programme en cliquant sur les 2 flèches qui rebouclent (haut à gauche)

Fait

- ☐ Pour cette première étude les paramètres du logiciel à régler sont les suivants :

- ☐ Filtre anti-repliement : désactivé
- ☐ Parasite : désactivé ☐ Fréquence sd'échantillonnage : $f_{ech}=8\text{kHz}$
- ☐ Rapport Cyclique : 10%

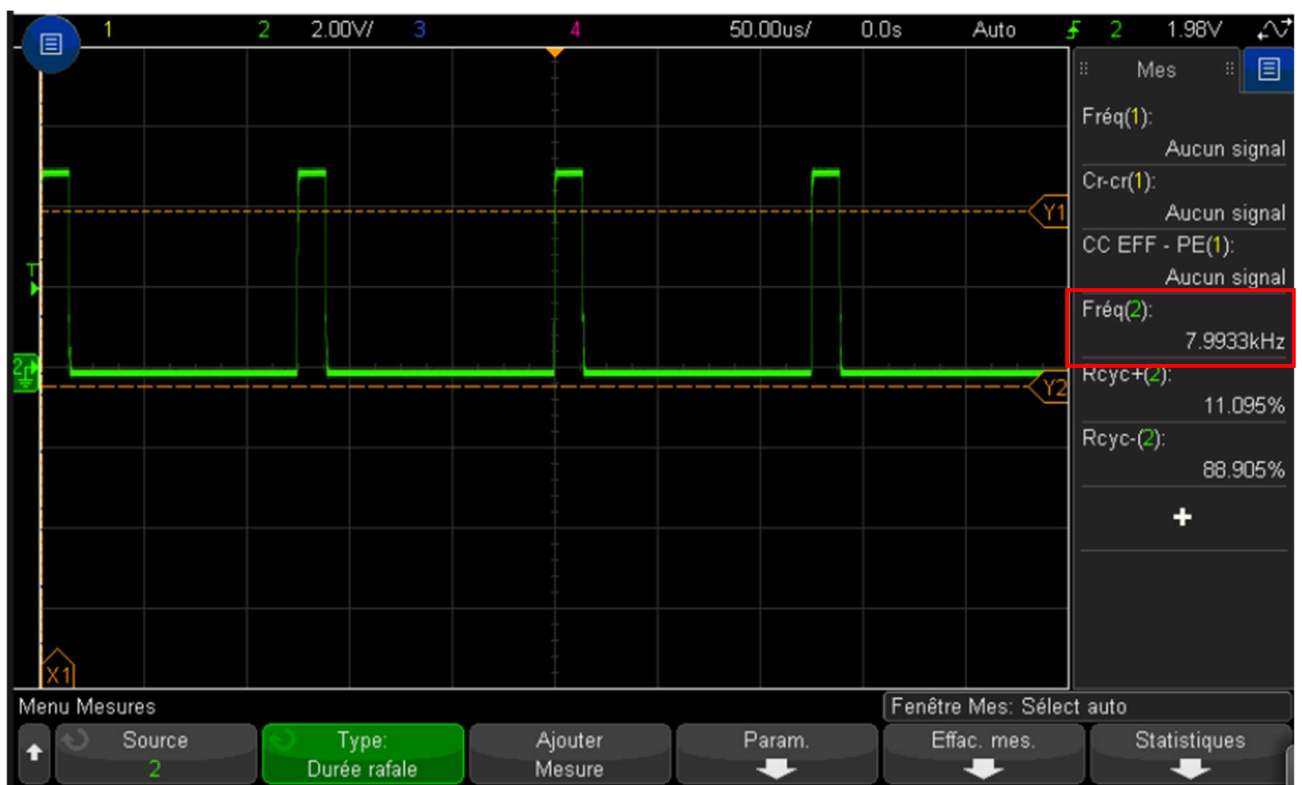


III.3 / Etude de la commande d'échantillonnage

Pour comprendre le résultat de l'échantillonnage, il est impératif de découvrir avant le signal qui commande cet échantillonnage. Ce signal est disponible sur la sortie AO1 du bornier.

III.3.a / Etude temporelle

- ☐ Lire l'annexe en fin de sujet.
- ☐ Observer à l'oscilloscope le signal de commande de l'échantillonnage : « Commande Ech ».
- ☐ Relever la fréquence du signal « Commande Ech » : fech.



Fréquence = 8kHz

- ☐ Mesurer le rapport cyclique du signal « Commande Ech » et comparer avec sa valeur théorique programmée.

Rapport cyclique = 11.095% (photo ci-dessus)

- ☐ Quelle devrait être la valeur du rapport cyclique si on voulait faire un échantillonnage idéal ? Pourquoi ne le fait-on pas ?

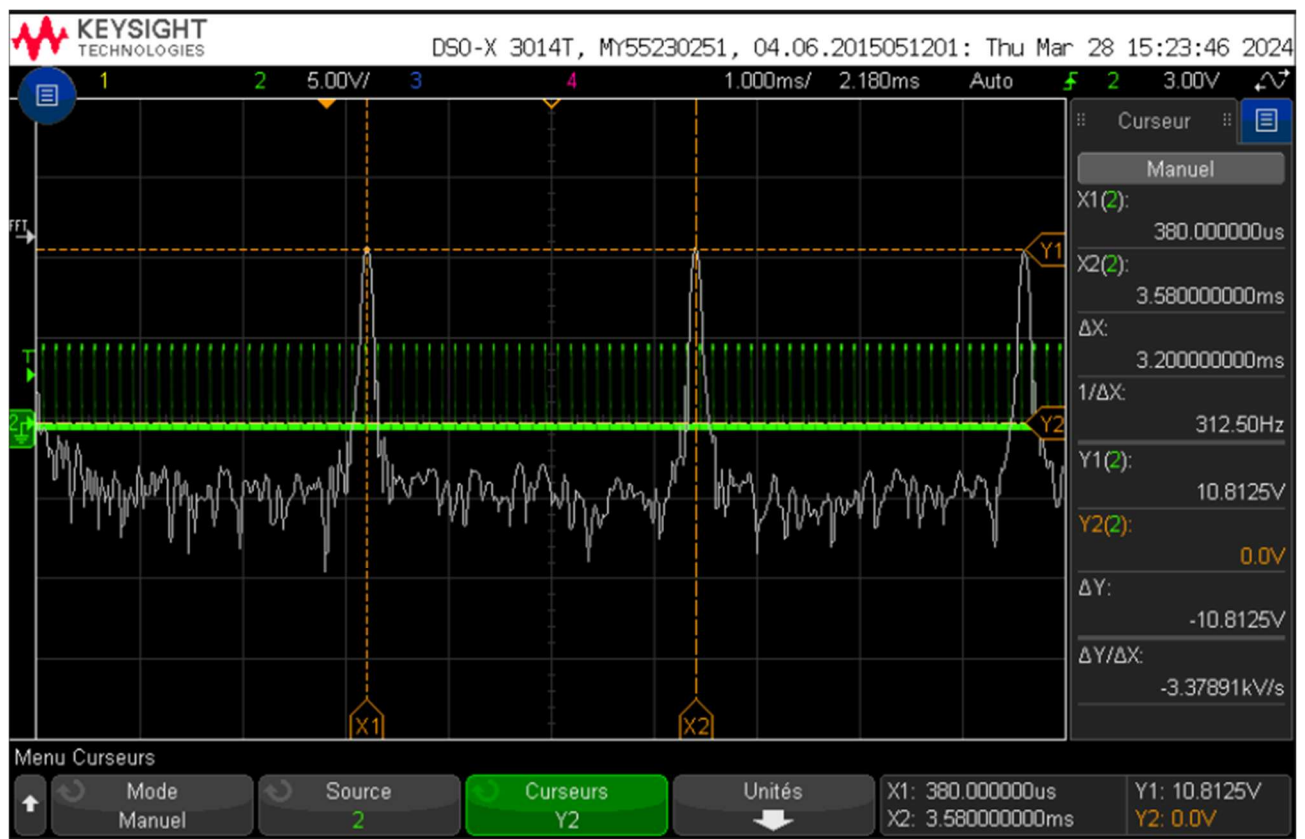
Si l'on voulait un échantillonnage idéal, la valeur du rapport cyclique serait de 50% pour avoir un signal parfaitement carré. Cependant, nous ne le ferons pas car ce signal est l'échantillonnage d'un signal x^2 sinusoïdal.

III.3.b / Etude fréquentielle

- ☐ Observer le spectre du signal « Commande Ech » à l'aide du module F.F.T. de l'oscilloscope. Il est conseillé de prendre une échelle allant de 0 à 25kHz pour l'échelle horizontale afin de voir au moins 3 composantes du signal.



- ☐ Relever les fréquences des premières raies observées à l'aide de curseurs.



On relève une fréquence de la première raie à $1 : 1,6 \cdot 10^{-3} = 625 \text{ Hz}$

et une fréquence de la deuxième raie à $1 : 3,2 \cdot 10^{-3} = 312 \text{ Hz}$

☐ Comparer avec le spectre théorique fait en préparation.

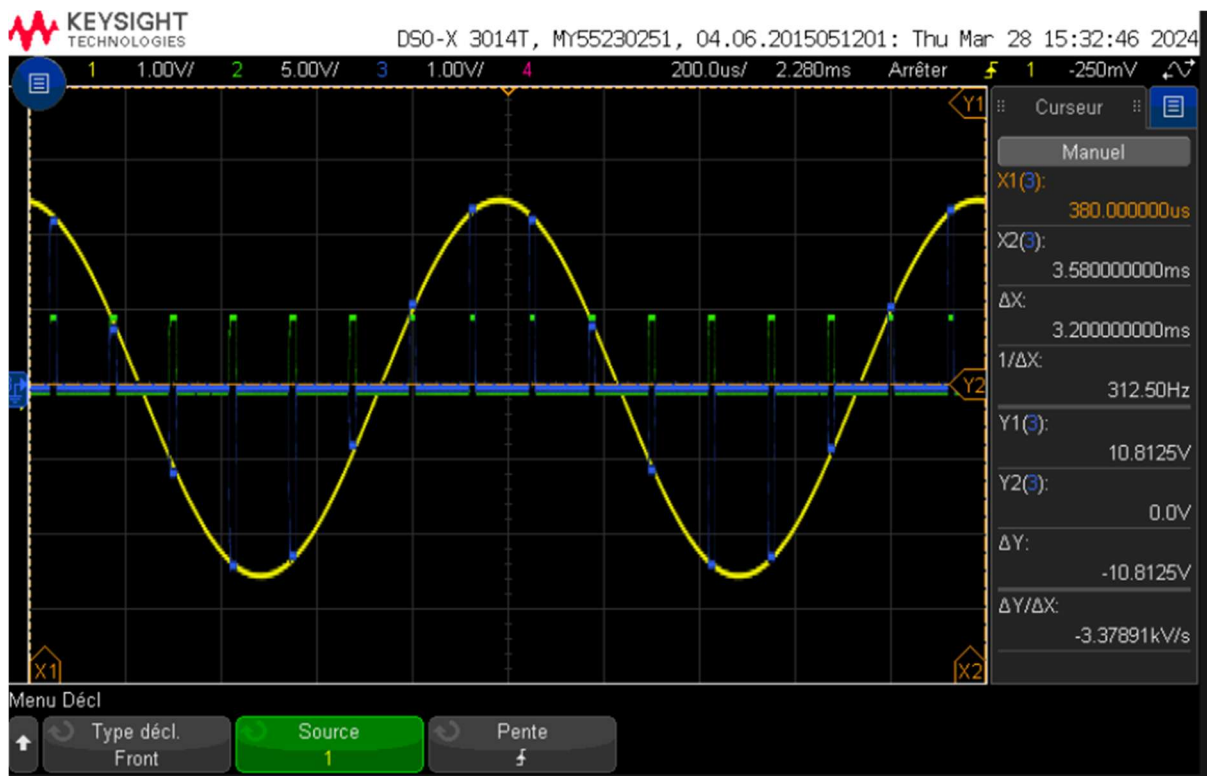
Ce spectre est différent de ce que nous avons en préparation : des raies tous les 600 Hz tandis que le spectre théorique présentait des raies tous les 1 kHz.

III.4 / Etude du signal échantillonné

On va enfin étudier ici le résultat de l'échantillonnage : le signal échantillonné !

III.4.a / Etude temporelle :

- ☐ Observer simultanément à l'oscilloscope :
 - ☐ Le signal à échantillonner, sur la voie1 de l'oscilloscope
 - ☐ Le signal « Commande Ech », sur la voie 2
 - ☐ Le résultat de l'échantillonnage, « Signal 1 éch. », sur la voie 3.



Problème expérimental :

Le signal à échantillonné n'est pas synchronisé avec les deux autres. Cela vient du fait que le Logiciel LabVIEW ne traite pas les informations en temps réel...

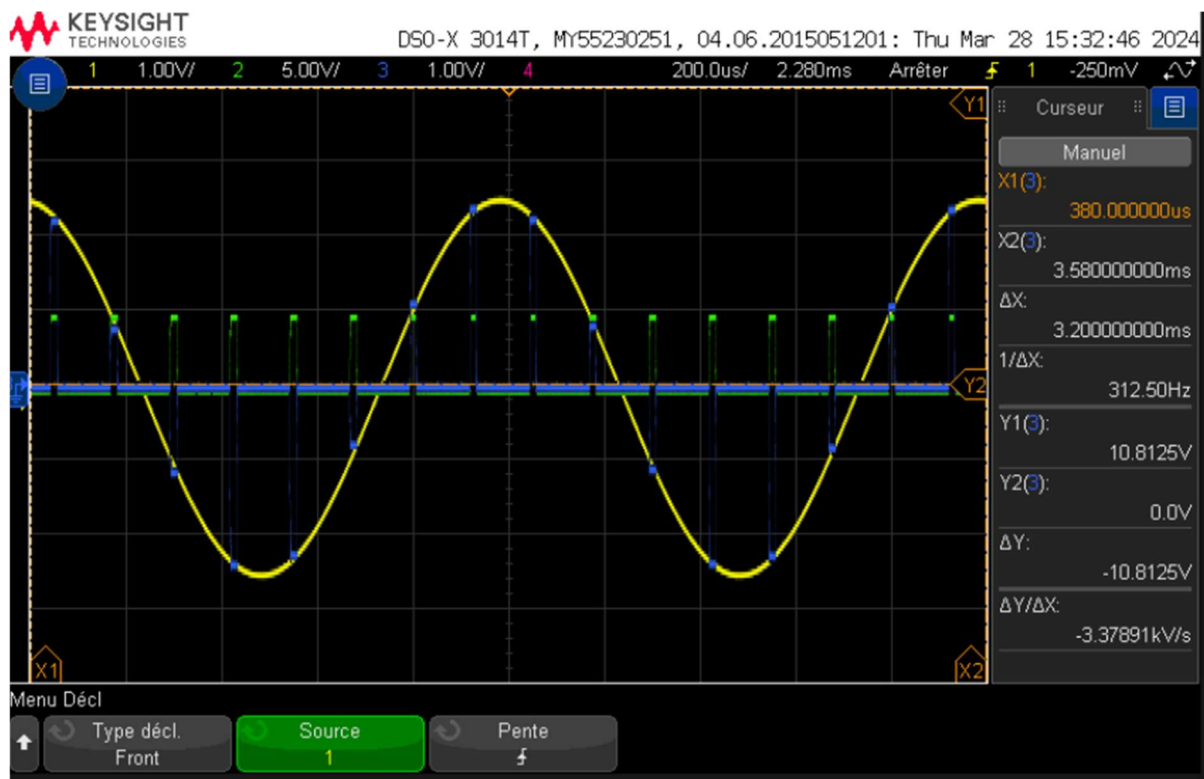
Pour la compréhension (et le compte-rendu), il est cependant important d'avoir une capture d'écran avec les 3 signaux synchronisés.

Pour cela, voici une procédure à suivre :

- ☐ Sauvegarder le signal de la voie 1, signal à échantillonner, sous « R1 » (menu « Ref » à droite de l'oscilloscope, cf. Chapitre 5 de la documentation de l'oscilloscope).

Fait, cela permet de garder visible sur l'écran de l'oscilloscope le signal enregistrer sans avoir à le brancher.

- ☐ Observer les signaux simultanément « R1 », la voie 2 (signal de commande) et la voie 3 (résultat de l'échantillonnage à l'oscilloscope)
- ☐ Utiliser la fonction Run/Stop l'oscilloscope.



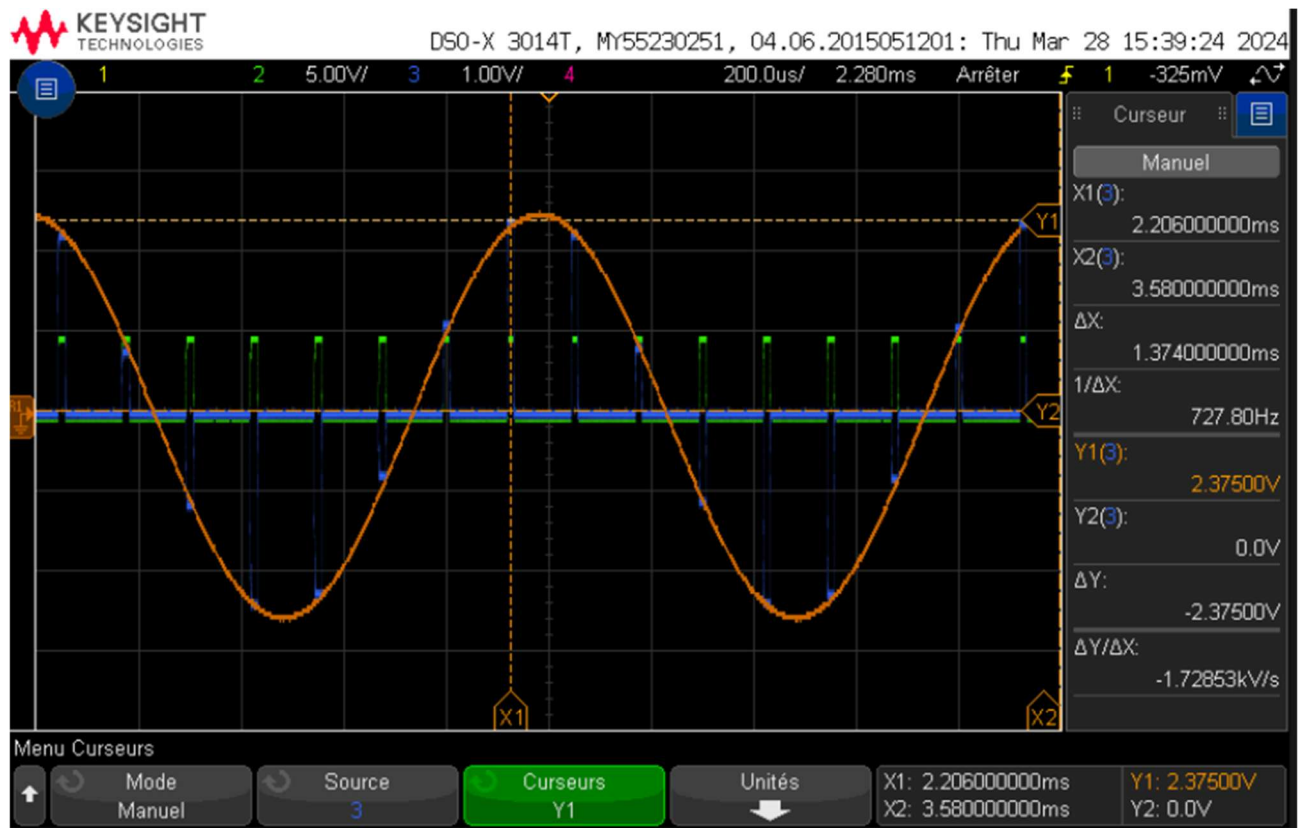
- ☐ Décaler « R1 » en utilisant l'onglet « délai » ou « skew » afin de rendre les trois signaux synchrones comme prévu en préparation.

Décaler le signal (délai) avec la molette d'action pour aligner les signaux.

On peut à présent réaliser l'étude temporelle de l'échantillonnage.

- ☐ A l'aide de curseurs mettez en évidence un instant d'échantillonnage.
- ☐ A l'aide d'autres curseurs, à l'instant précédent, mettre en évidence les amplitudes qui sont les mêmes.

Capture pour les deux questions précédentes :

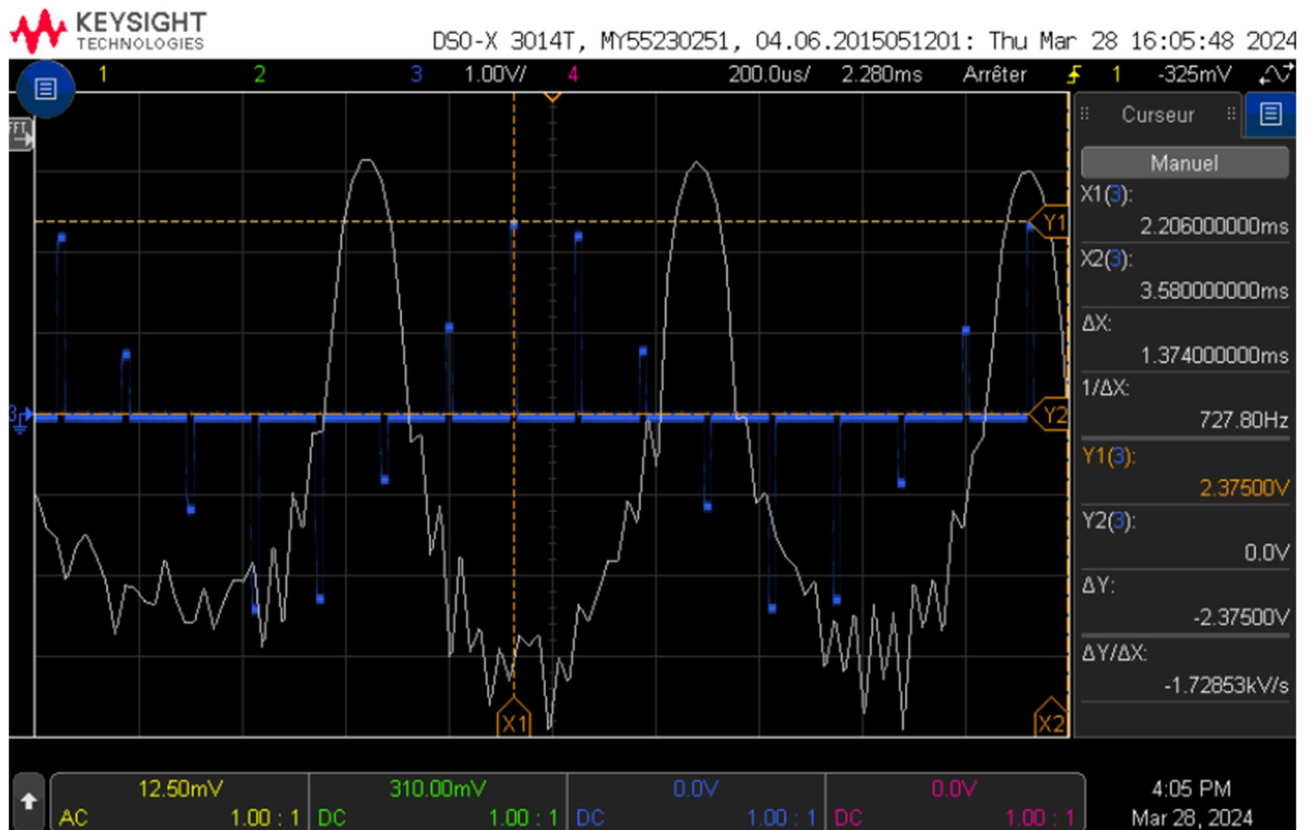


- ☐ Analyser la totalité cette expérience.

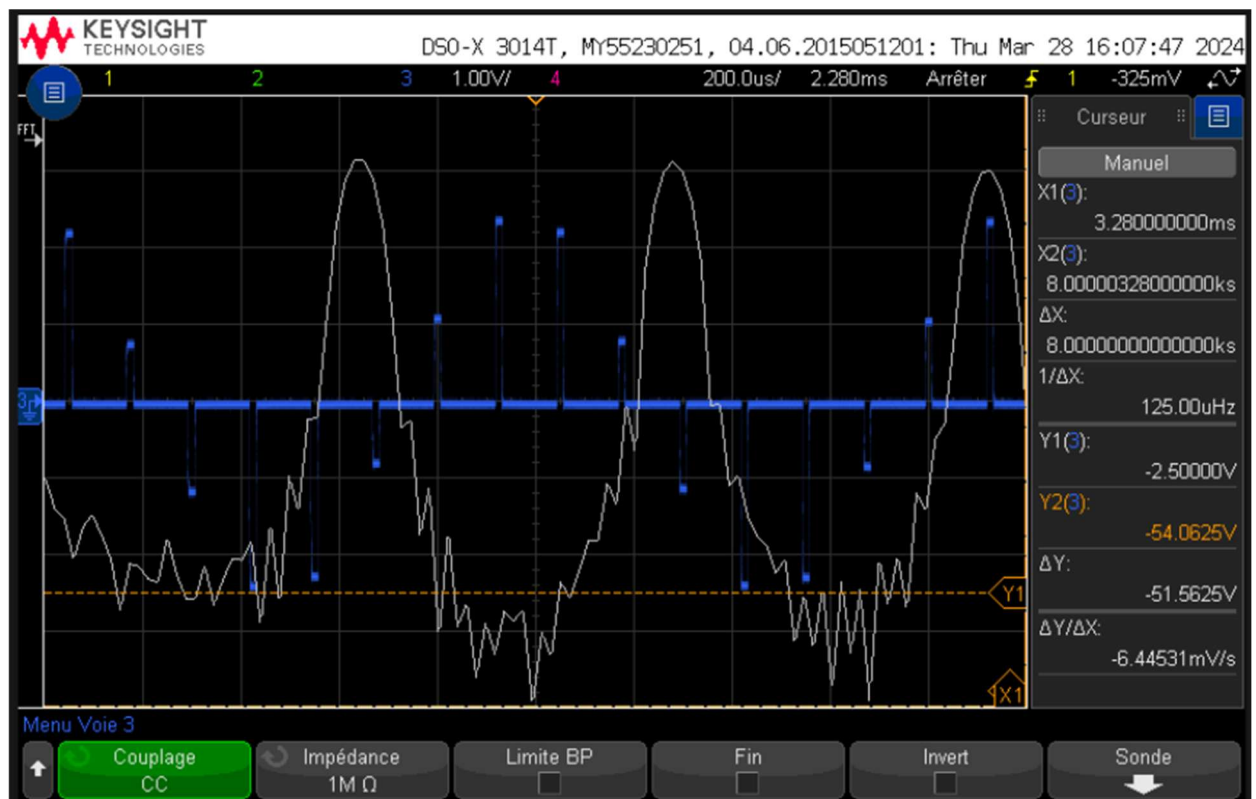
On observe que le signal échantillonner suit le sinus d'origine. On en conclue qu'un signal carré et composée de signal sinusoïdaux bien additionner.

III.4.b / Etude fréquentielle :

- ☐ Relever le spectre du signal échantillonné. Il serait bon de garder les mêmes échelles que pour le signal de commande afin de pouvoir comparer les spectres.

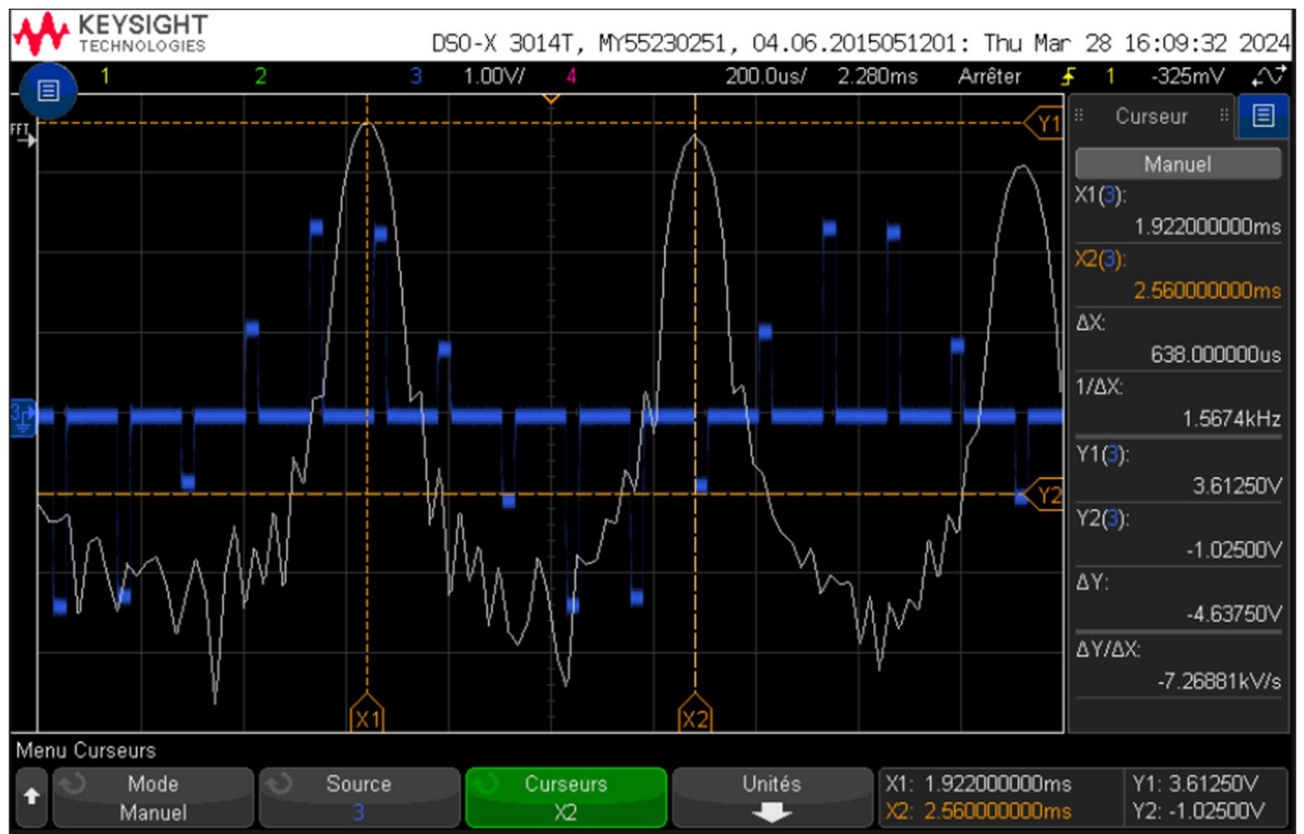


- ☐ Placer des curseurs et analyser précisément le résultat en le comparant avec la théorie.



- ☐ Augmenter le rapport cyclique du signal de commande de l'échantillonnage.

Après avoir passé l'échantillonnage à 20% au lieu de 10 :



- ☐ Comment évolue le spectre du signal échantillonné ?

On peut voir que les amplitudes sont beaucoup plus hautes et que les fréquences sont diminuées.

- ☐ Revenir pour la suite à un rapport cyclique de 10% .

Fait

- ☐ Augmenter la fréquence du signal d'entrée progressivement jusqu'à 4kHz.

Fait

- ☐ Observer et expliquer l'évolution du spectre du signal échantillonné.

Nous ne voyons pas de changement.

- ☐ Que se passe-t-il si la fréquence du signal d'entrée devient supérieure à la fréquence limite donnée par le théorème de Shannon. On analysera notamment le spectre pour une fréquence d'entrée de 5kHz.

III.5 / Synthèse de l'étude

- ☐ Faire une annexe comportant les relevés temporels des 3 signaux intervenant dans l'échantillonnage. L'objectif est d'obtenir la même chose que vu lors de la préparation : 1 page avec 3 relevés les uns sous les autres et surtout avec la même échelle de temps.
- ☐ Faire de même pour les relevés fréquentiels, avec la même échelle de fréquence.
- ☐ Conclure sur l'échantillonnage.

IV / Etude de l'échantillonnage d'un signal audio

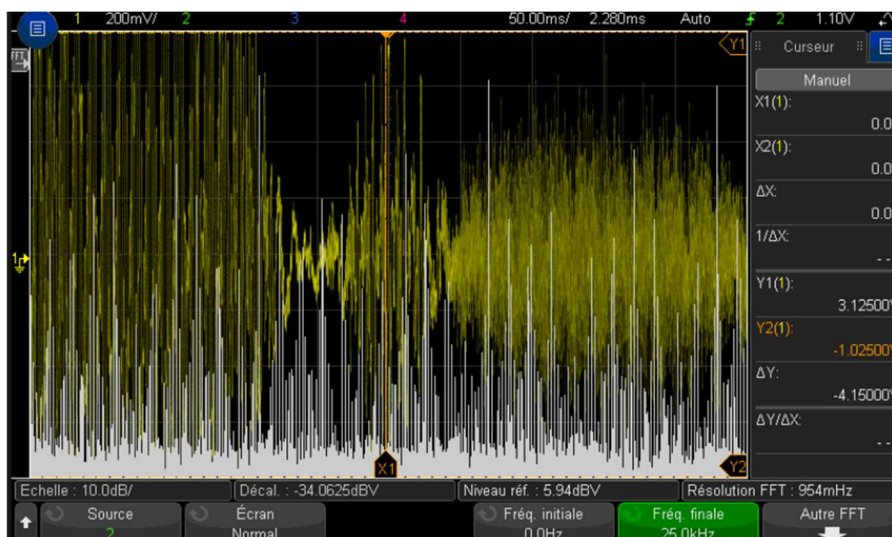
L'échantillonnage d'un signal sinusoïdal est un cas d'étude pur. En réalité l'échantillonnage se fait sur des signaux aléatoires. Par exemple un de la voix ou de la musique.

- ☐ Relier la sortie de la carte audio de l'ordinateur à l'entrée AI0 du bornier de connexion à l'aide d'un cordon adaptateur « Jack/BNC ».
- ☐ Lancer le fichier « conversation.mp3 ».

Fichier wav sur l'ent pas mp3

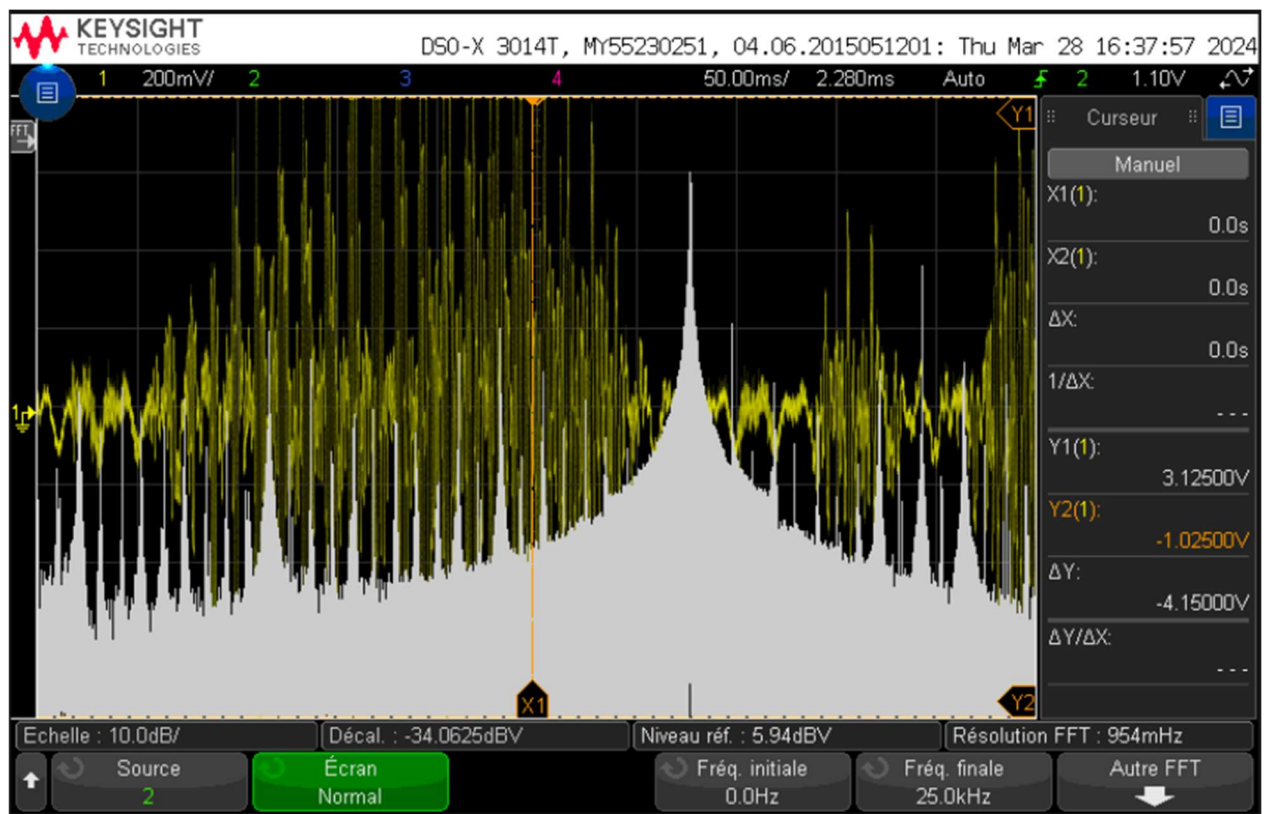
Brancher la prise jack sur le pc et le relier sur un té à la prise AI0 du bornier qui est connecter à l'oscilloscope.

- ☐ Observer le signal audio à l'oscilloscope.
- ☐ Relever le spectre du signal audio échantillonné entre 0 et 25kHz. On pourra activer la fonction persistance de l'oscilloscope.
- ☐ Analyser le spectre.



On va à présent augmenter la vitesse d'échantillonnage.

- ☐ Sélectionner une fréquence d'échantillonnage de 16kHz.



- ☐ Recommencer l'étude du spectre du signal échantillonné dans cette condition. Le repliement du spectre vous semble-t-il plus ou moins important lorsqu'on augmente la fréquence d'échantillonnage ? Quel est l'inconvénient d'augmenter la fréquence d'échantillonnage ?
- ☐ Remettre ensuite la fréquence d'échantillonnage à 8KHz.
- ☐ S'il vous reste plus d'une heure, reprendre la même étude avec le fichier « musique.mp3 ».

V / Utilisation d'un filtre anti-repliement

V.1 / Repliement d'un parasite

On veut étudier ici ce qu'il se passe lorsqu'un signal parasite s'ajoute au signal utile. Pour simplifier le signal utile sera à nouveau un sinus à 1kHz. Le signal parasite, $p(t)$, sera un signal sinusoïdal à 6kHz. Il sera généré logiciellement par le programme LabVIEW.

La fréquence d'échantillonnage sera réglée à $f_{ech}=8\text{kHz}$.

- ☐ Régler et appliquer en entrée « AI0 » un signal sinusoïdal de fréquence de $f_1=1\text{kHz}$ et une amplitude 5V. Vérifier le réglage à l'aide d'un oscilloscope.
- ☐ Sur le panneau de contrôle de Labview, appliquer un parasite de fréquence $f_p=6\text{kHz}$ ☐

Relever et analyser le spectre du signal échantillonné.

Pour remédier au problème rencontré, on peut utiliser un filtre anti-repliement avant d'échantillonner.

- ☐ Rappeler la fonction du filtre anti-repliement. Quelle doit être sa fréquence de coupure ici ?
- ☐ Activer le filtre anti-repliement sur le logiciel.
- ☐ Relever et analyser le résultat.

V.2 / Repliement d'un signal audio

- ☐ Appliquer à nouveau le signal « musique.mp3 » en entrée AI0.
- ☐ Régler la fréquence d'échantillonnage à 16kHz sous LabVIEW.
- ☐ Observer le spectre du signal échantillonné sans filtre anti-repliement puis un filtre antirepliement de fréquence de coupure 6KHz.
- ☐ Analyser.

Annexe : Echantillonnage et PAM

L'échantillonnage d'un signal analogique, $e(t)$, consiste à prélever la valeur de ce signal à des instants précis uniquement. Ces prélèvements sont appelés des échantillons et sont en général pris à intervalle régulier. La fréquence de ces prélèvements est la fréquence d'échantillonnage ($f_{ech}=1/T_{ech}$). Le signal obtenu est dit discret. On note $e^*(nT_{ech})$ le $n^{ième}$ échantillon.

Théoriquement l'échantillonnage consiste à multiplier le signal analogique $e(t)$ par un signal appelé fonction « peigne de Dirac » représenté ci-dessous (notée ici $Sha(t)$) :

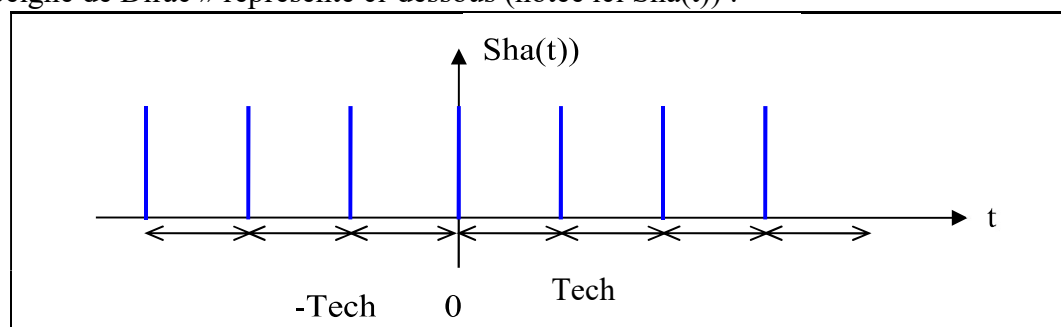


Figure 1: échantillonnage idéal

Cependant, l'échantillonnage réel aura nécessairement une durée non nulle car :

- ☐ Un peigne de Dirac n'existe pas physiquement (impulsion de durée nulle impossible à réaliser).
- ☐ Il faut laisser le temps, au CAN qui suit, de faire sa conversion.

Le signal sera donc, en réalité, multiplié par une fonction, appelée « Commande Ech(t) », ayant l'allure suivante :

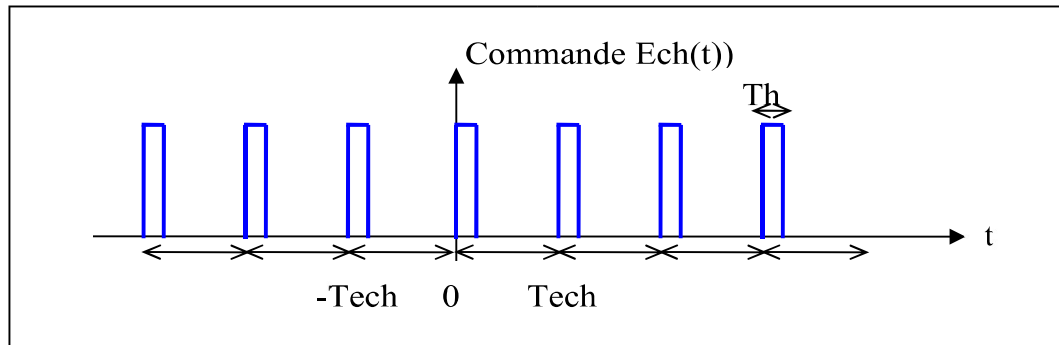


Figure 2:échantillonnage réel

Une grandeur caractéristique de ce signal est le rapport cyclique R_c (sampling duty cycle). Sa définition est la suivante :

$$R = \frac{T_h}{T_{ech}}$$

Le signal issu de cet échantillonnage réel sera appelé signal **PAM** pour Pulse Amplitude Modulation.