

Séminaire des doctorants

Amélioration des techniques de conditionnement du signal et de traitement de données pour les détecteurs supraconducteurs à inductance cinétique

Mounir Abdkrimi

Plan

- Contexte et cadre
- Travail réalisé
- Perspectives

Introduction

Astronomie millimétrique

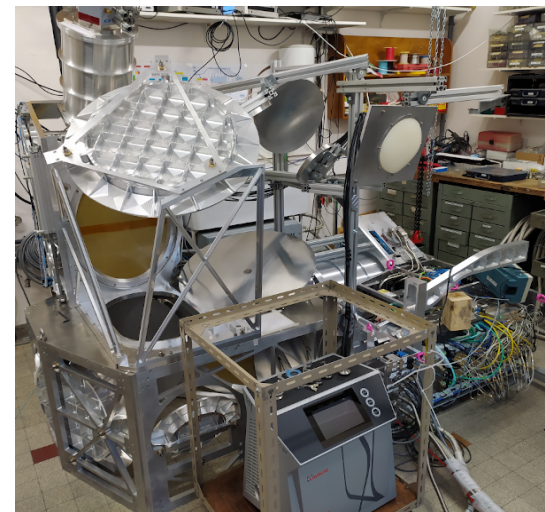
- Observation de l'univers de [30 GHz – 330 GHz] :
 - Étude : CMB, effet SZ.
- Des instruments réalisés au laboratoire via des collaborations : NIKA, NIKA2 et CONCERTO.
- Détecteur : Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKIDs).
- Plusieurs défis pour la détection :
 - Le bruit électronique.
 - Nécessité de multiplexer des milliers de pixels.



www.eso.org



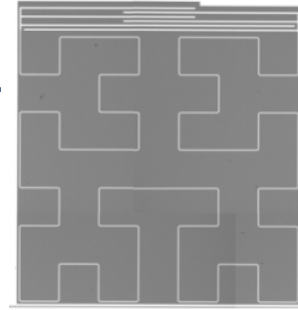
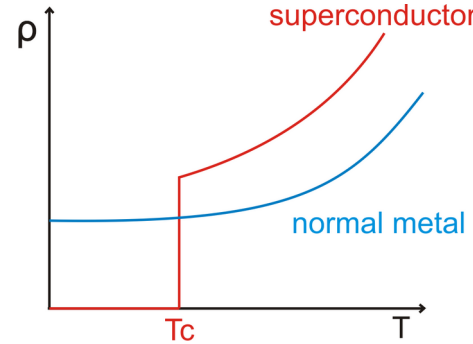
APEX antenna



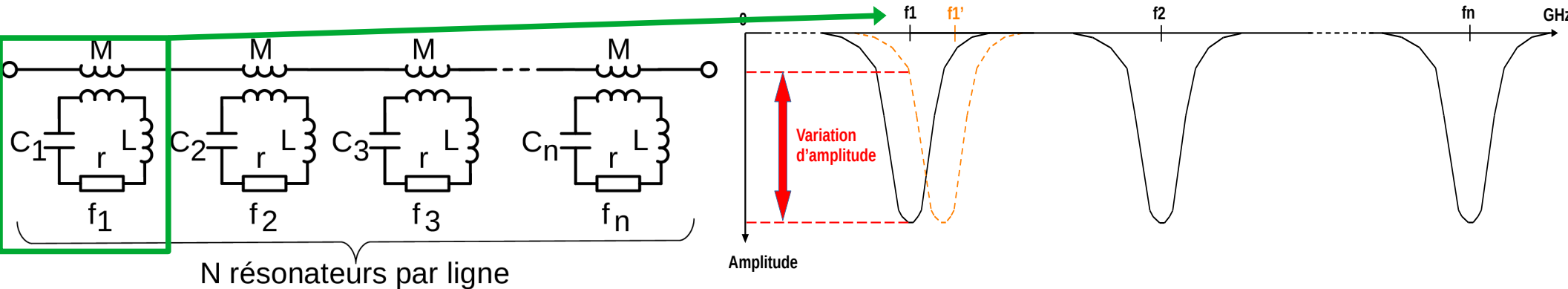
CONCERTO

Introduction

Physique des supraconducteurs et modèle MKID



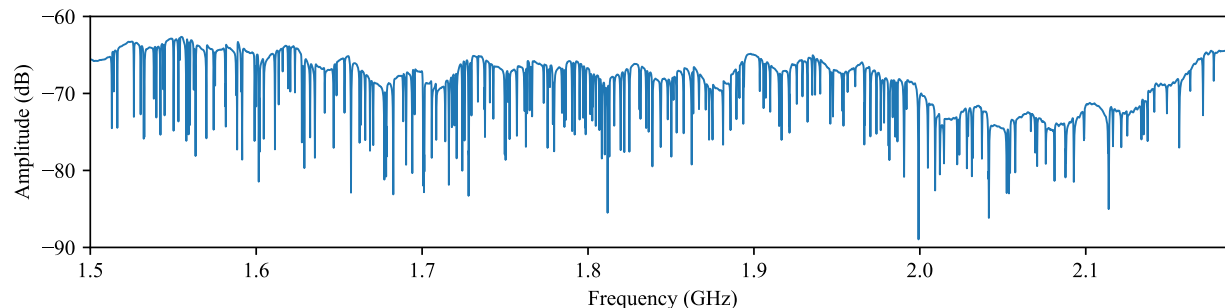
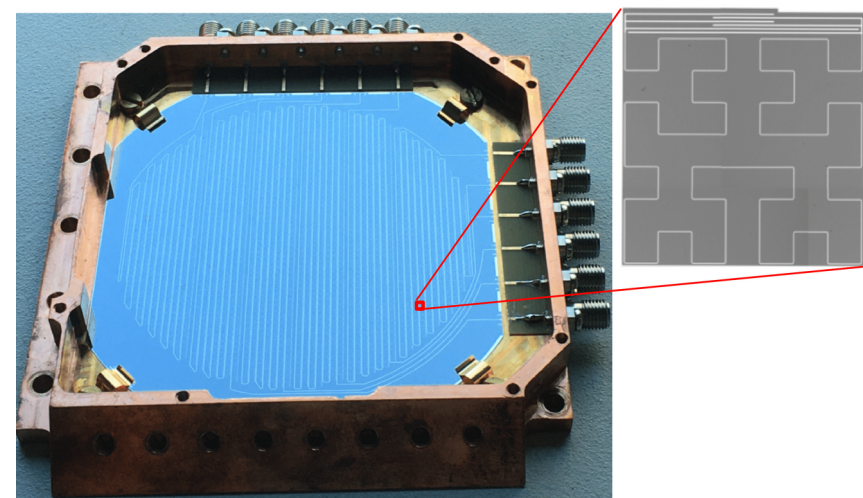
- Les MKIDs utilisent un film supraconducteur en tant que dispositif de détection.
- Lumière \rightarrow Variation de l'inductance cinétique \rightarrow Variation de la fréquence de résonance.
- Méthode: Mesure de la variation d'amplitude et de phase.



Introduction

Matrice de MKIDS : Quelques chiffres de CONCERTO

- Matrice de 2160 MKIDS.
- Répartie en 6 lignes de transmission. Chaque ligne :
 - Comprend 360 MKIDs en série,
 - Couvre une bande de 1 GHz.
- Moins de traversées de câbles → meilleure efficacité énergétique.

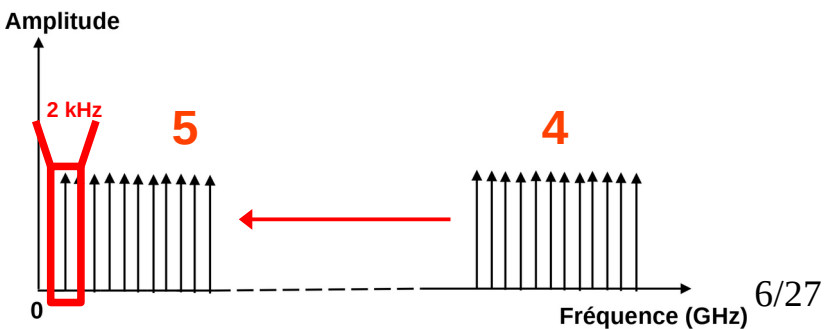
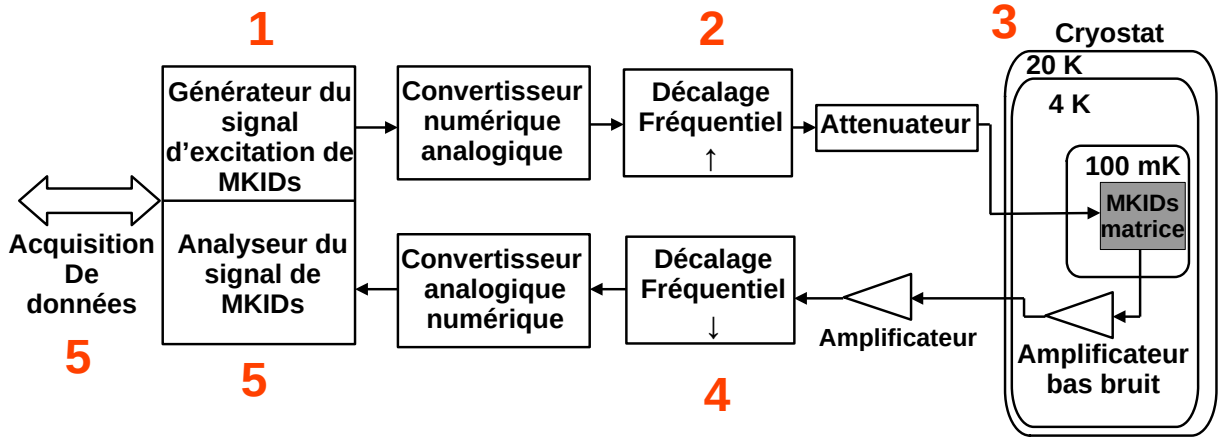
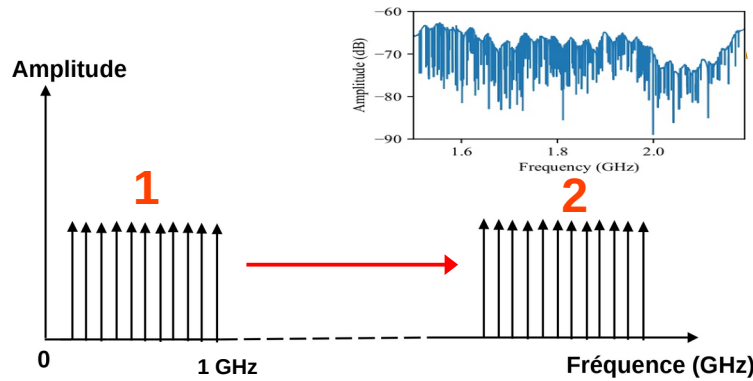


Instrumentation du détecteur

Principe de lecture

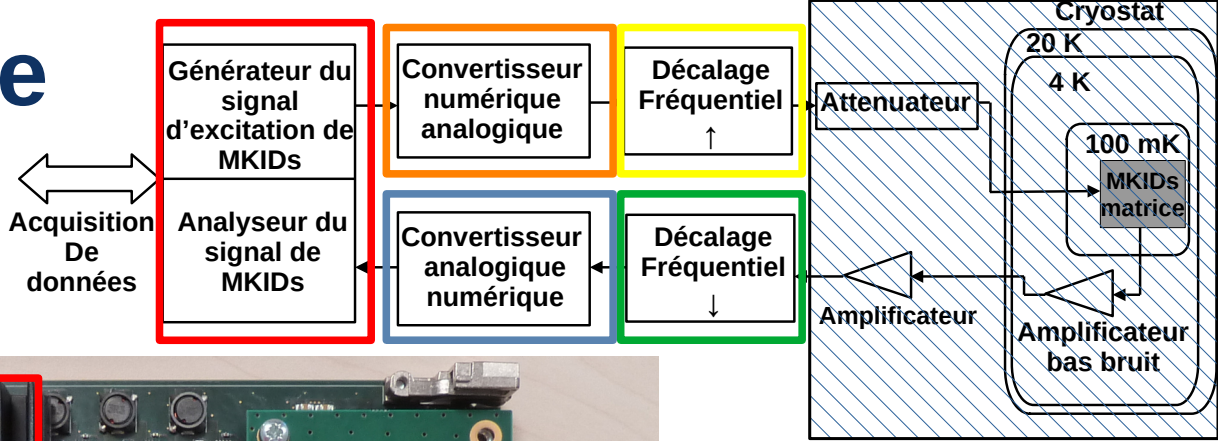
- 1. Génération du peigne de fréquences (multiplexage de fréquences).
- 2. Décalage fréquentiel vers la bande de résonance.
- 3. Propagation du signal à travers le cryostat et interaction avec la matrice.
- 4. Décalage fréquentiel vers la bande de base.
- 5. Traitement du signal :
 - Prétraitement.
 - Extraction de la variation de phase et amplitude.

Ton = sinusoïde

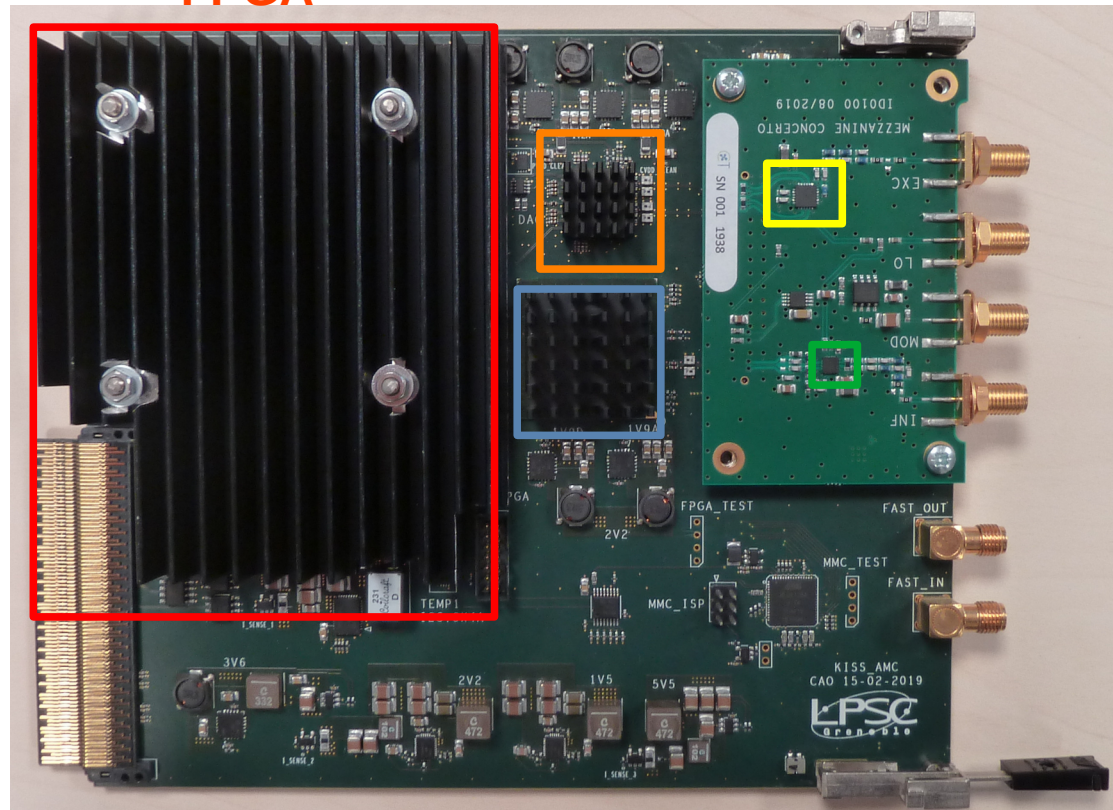


Électronique étudiée

KID_READOUT

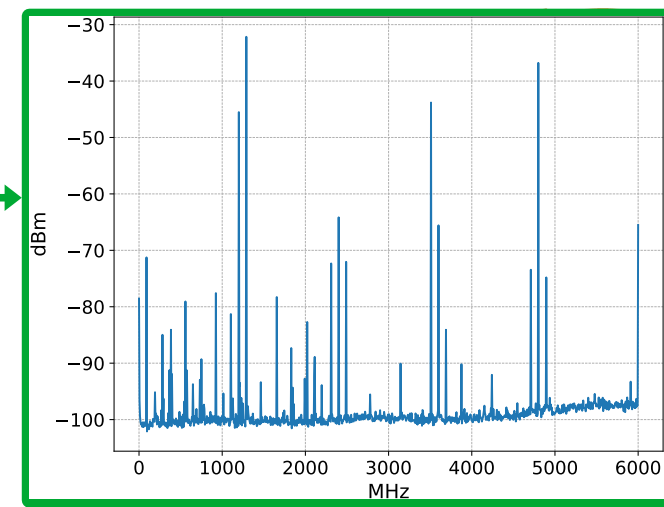
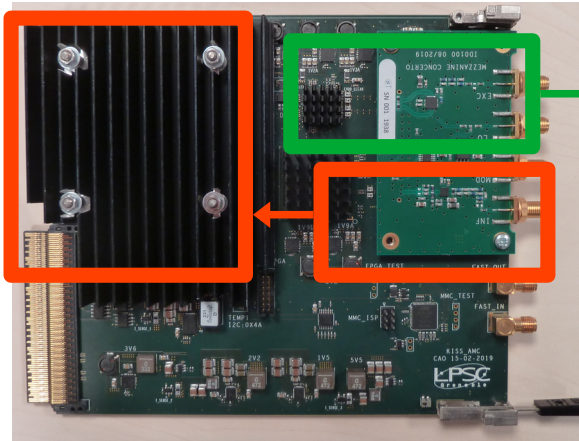
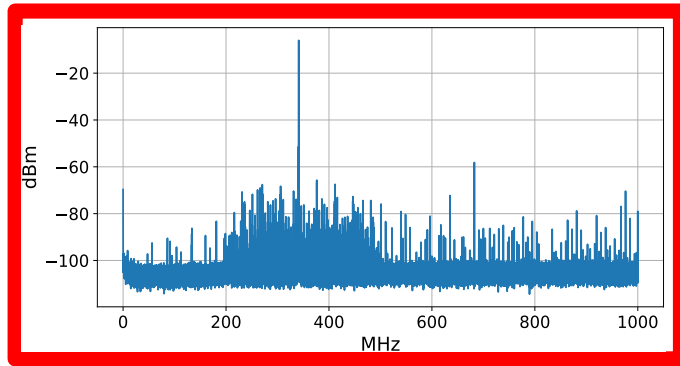


FPGA



- Contexte et cadre
- Travail réalisé : Caractérisation de la chaîne analogique
- Perspectives

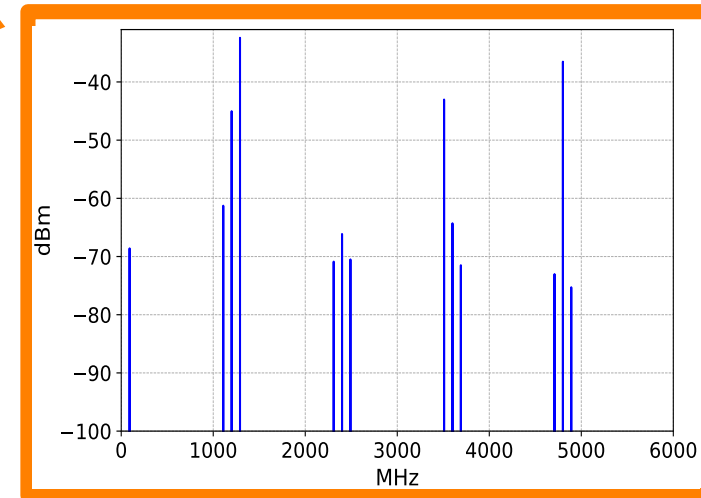
Méthodologie de caractérisation



Analyseur de spectre

Acquisition et calcul de FFT

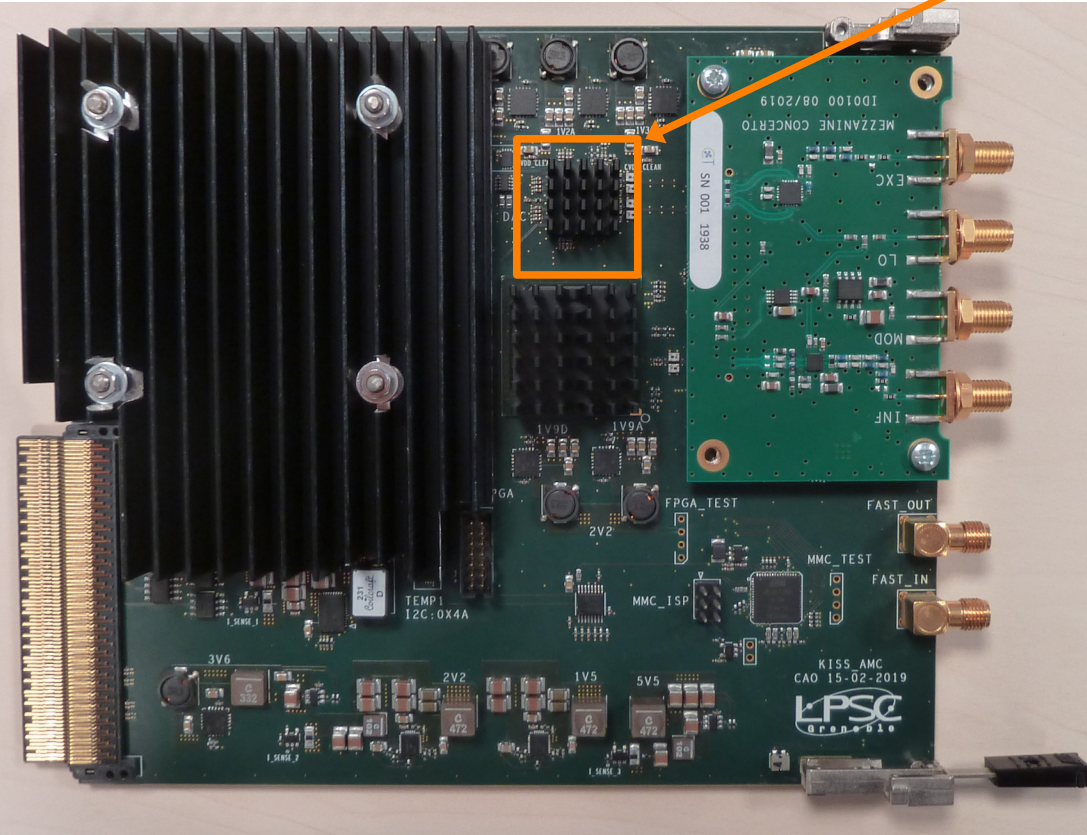
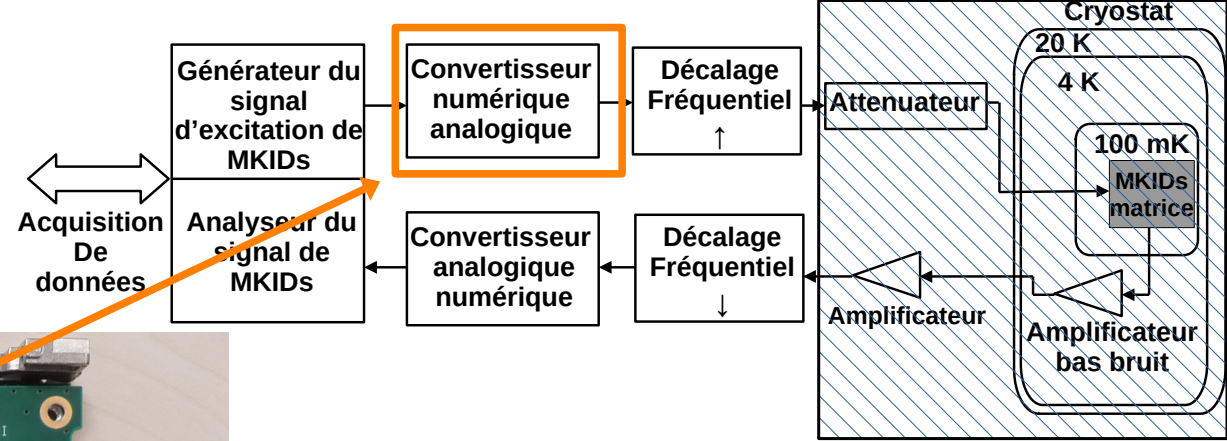
- 1- Mesures (Analyseur de spectre ou acquisition).
- 2- Identification des imperfections réduisant le rapport signal/bruit.
- 3- Modélisation et comparaison avec les mesures.



Résultat de simulation d'un modèle

DAC

Mesures



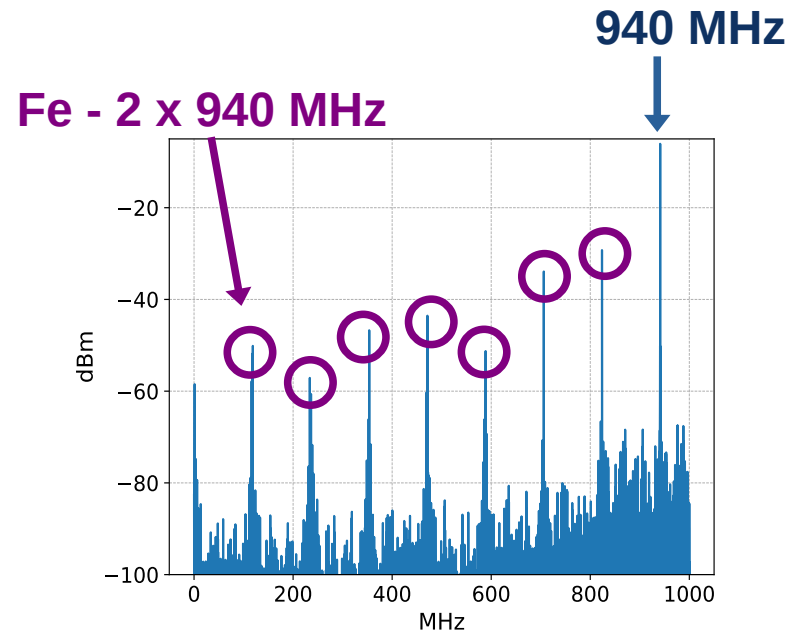
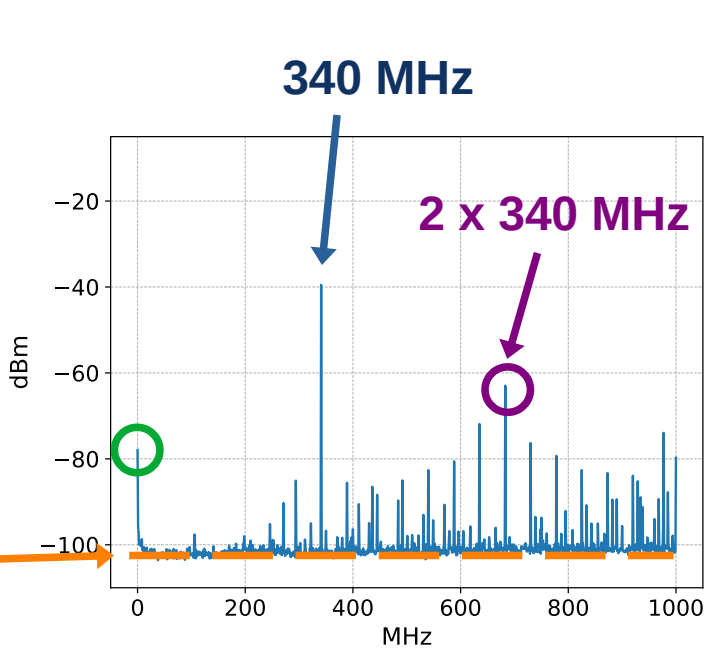
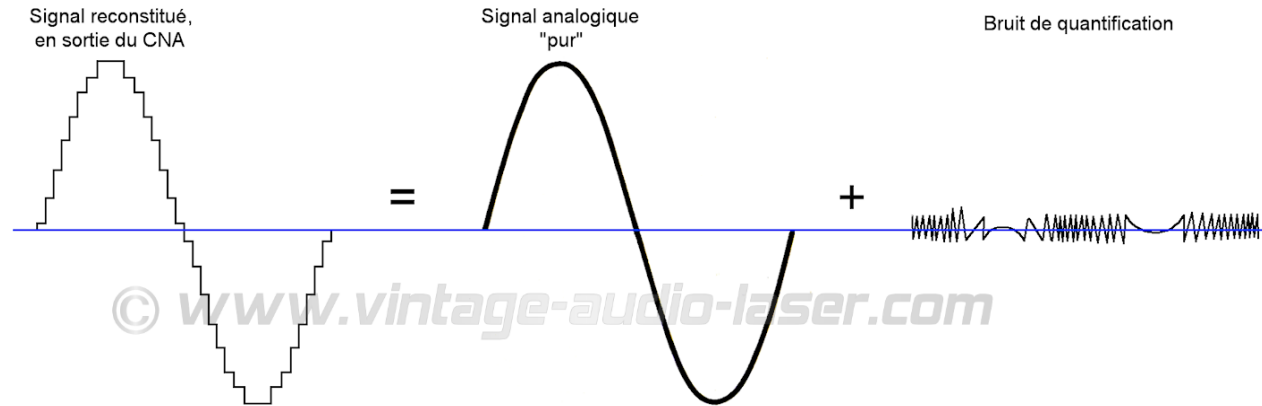
- Remplacement de la carte RF.
- Génération d'un seul ton à la fois.
- Variation de la fréquence et d'amplitude.
- **Caractéristiques du DAC :**
 - Résolution : 16 bits,
 - Fréquence d'échantillonnage (F_e) : 2 GHz.

DAC

Identification des imperfections

- **Bruit de quantification.**
- **Offset de tension.**
- **Distorsion harmonique.**
- **Repliement spectral.**
- **↑ puissance ou ↑ fréquence :**
 - Distorsion harmonique plus importante → Slew-rate

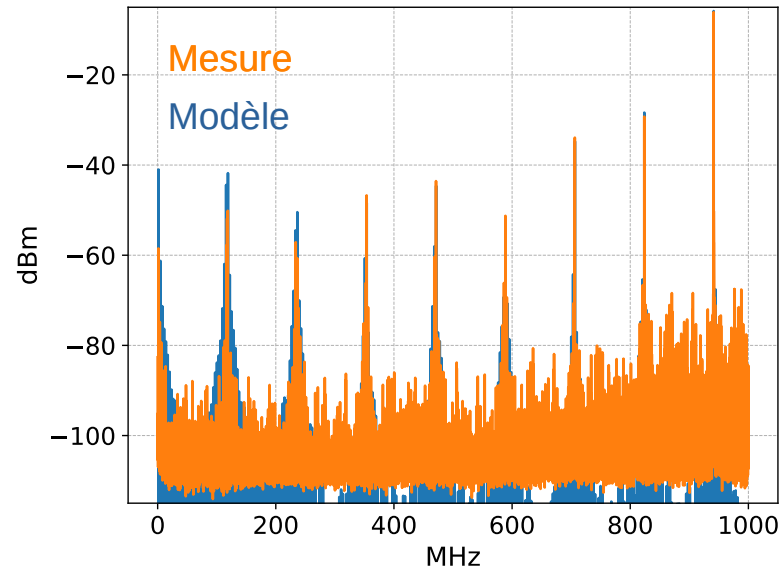
L'effet de la quantification



DAC

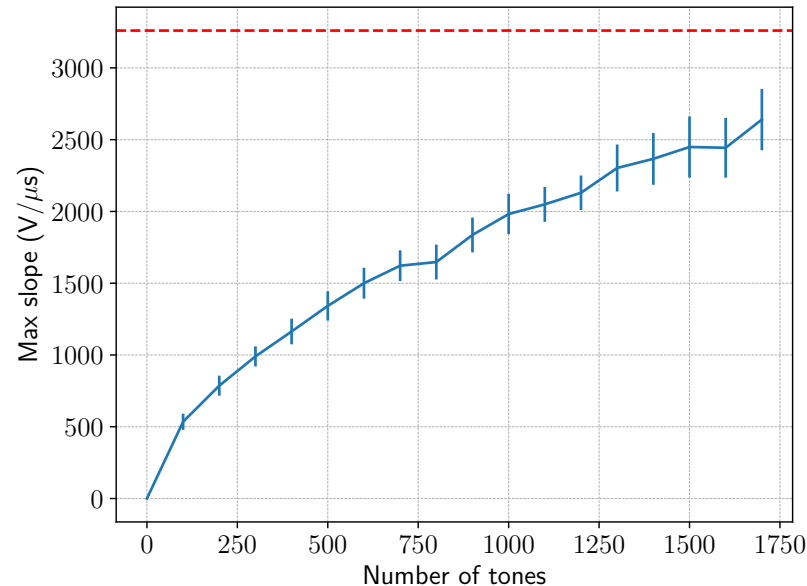
Modélisation de Slew-rate

- Vitesse de changement de la tension en fonction du temps ($V/\mu s$).
- Pas documenté.
- Non mesurable.
- Développement de modèle.
 - Slew-rate : $3260 V/\mu s$.



Conclusion

- Recherche du facteur de multiplexage fréquentiel maximal.
- Possibilité de multiplexage de plus de 1750 tons.



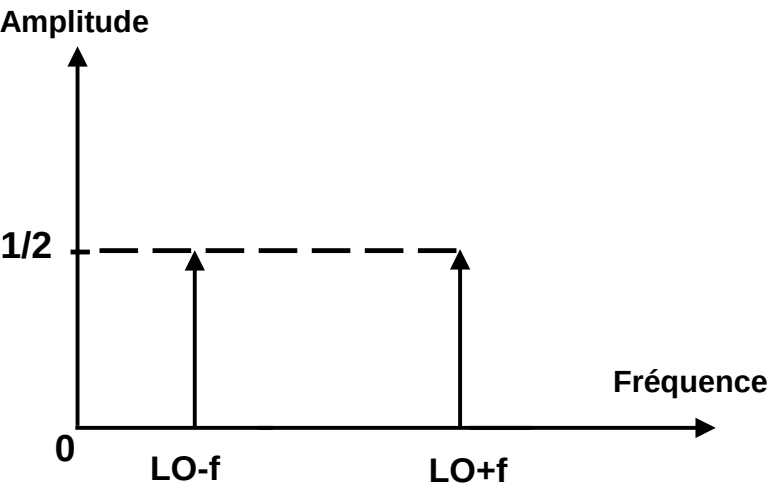
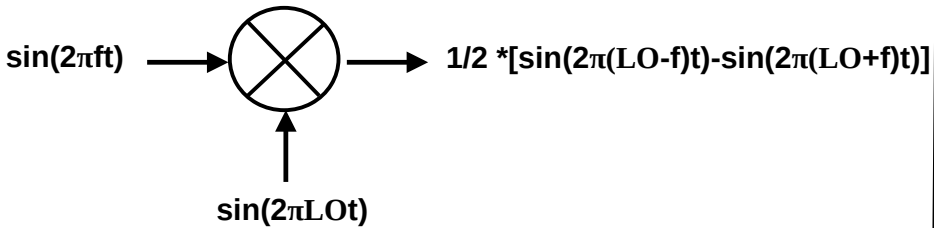
- Publication du travail dans 28th IEEE Workshop on Signal and Power Integrity - 2024.

Décalage fréquentiel

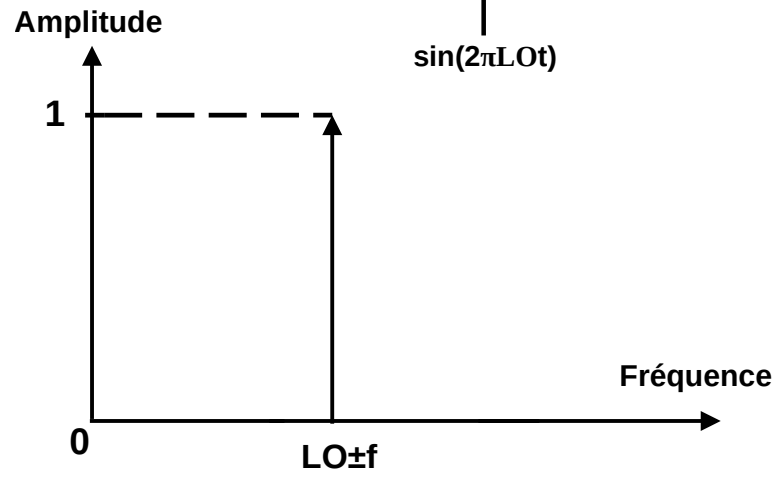
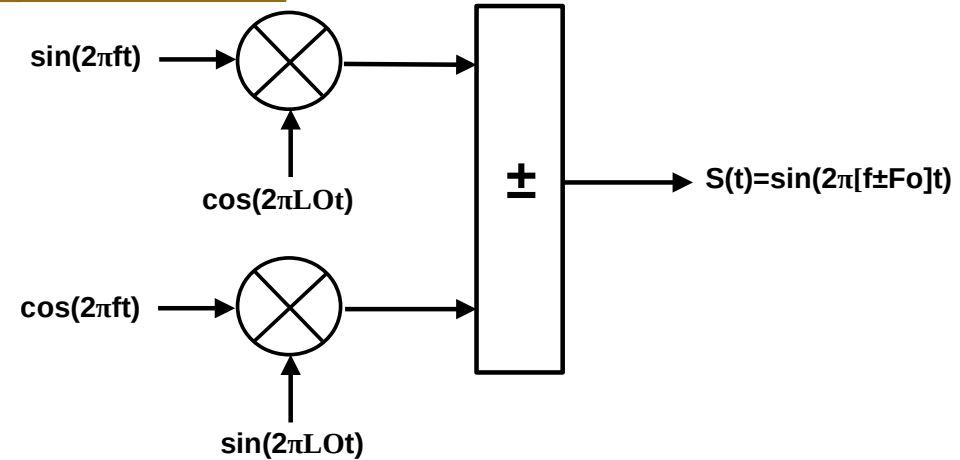
Principe

- Multiplication de deux sinusoïdes : $\sin(2\pi f_1 t) \times \sin(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2}[\sin(2\pi(f_1 - f_2)t) - \sin(2\pi(f_1 + f_2)t)]$

Mélangeur (idéal)

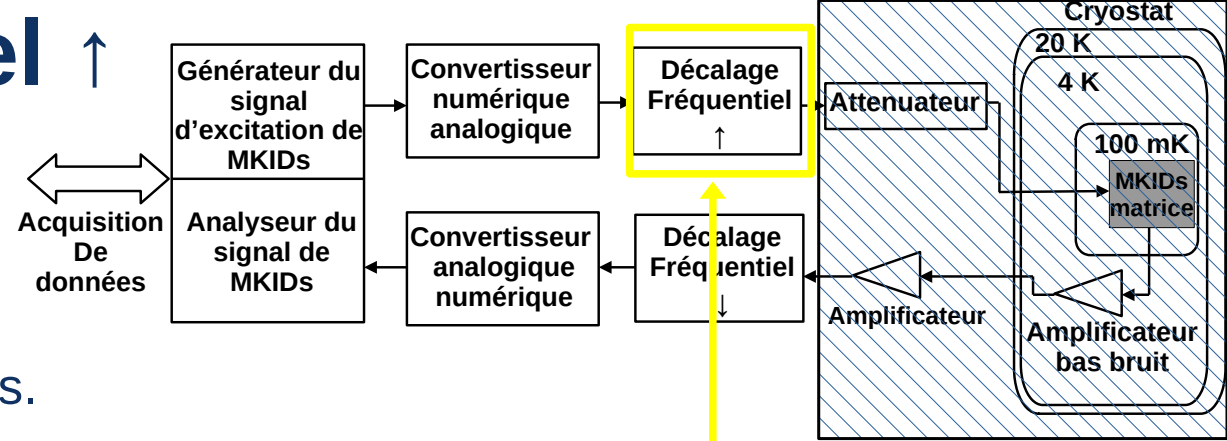


Modulateur IQ (idéal)



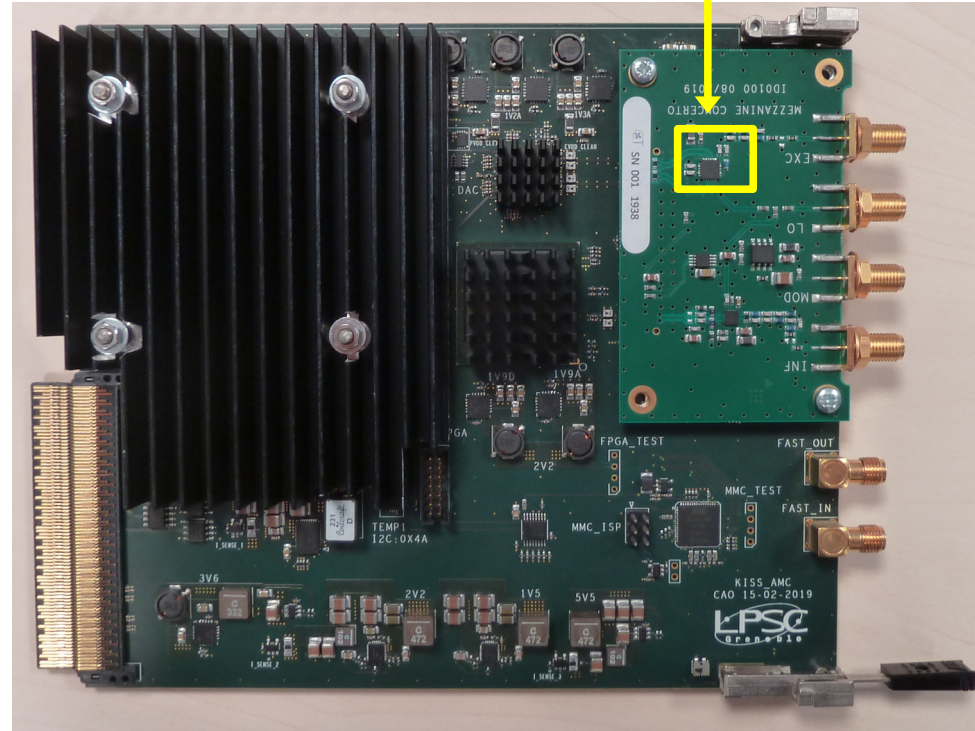
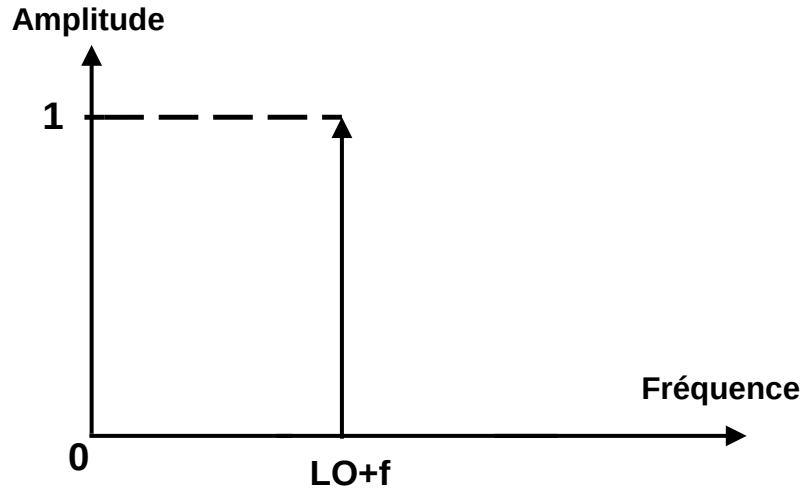
Décalage fréquentiel

Modulateur IQ



- Mesure :
 - Génération d'un seul ton à la fois.

Cas idéal :



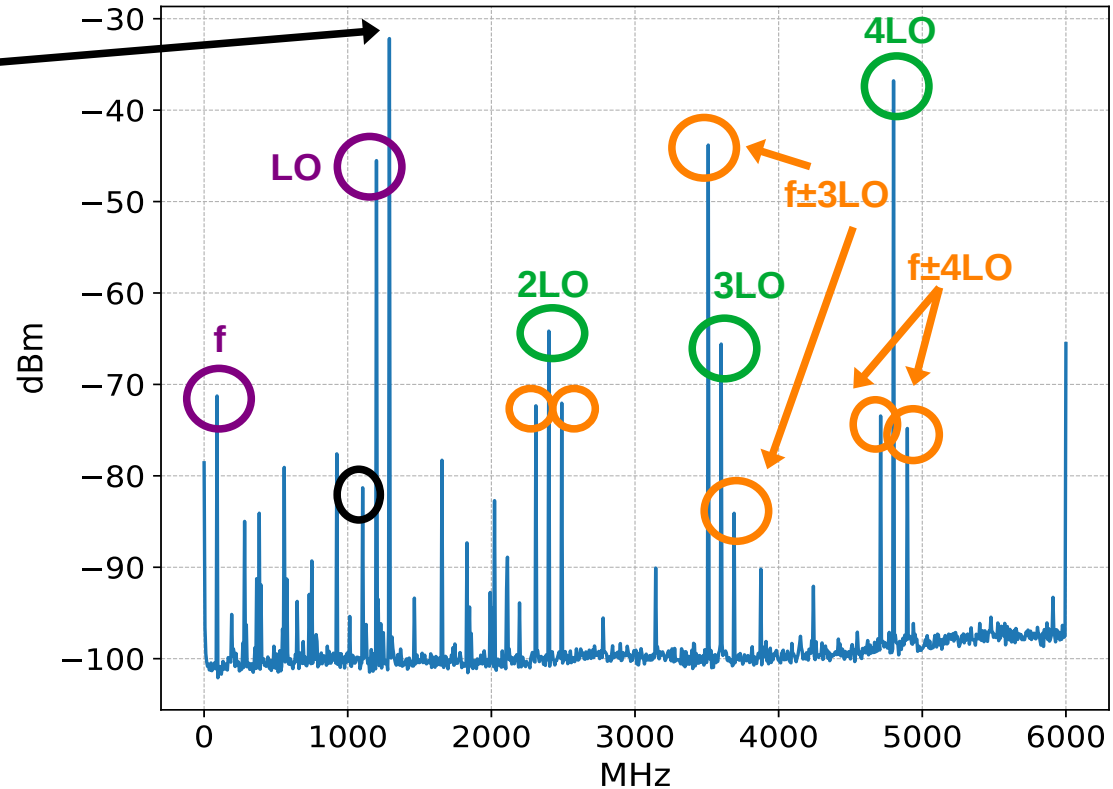
Modulateur IQ

Identification des imperfections

Signal modulé

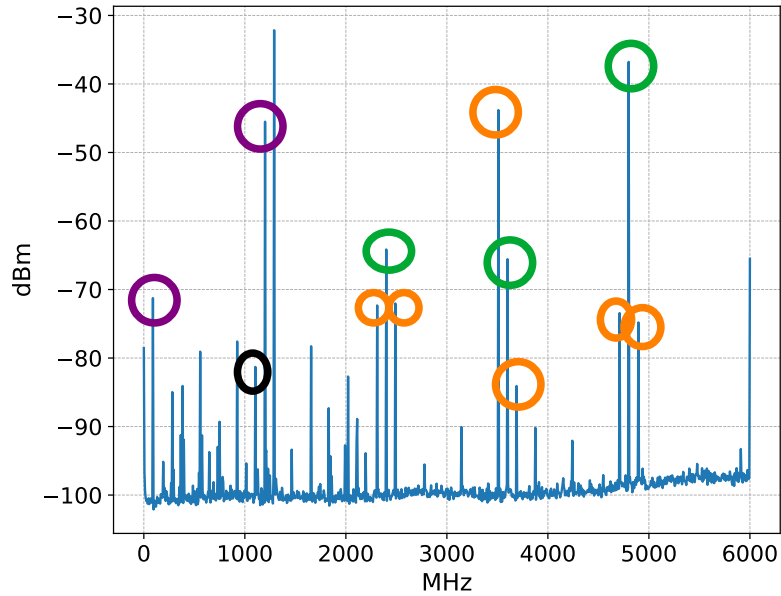
$$f + \text{LO} = 90 \text{ MHz} + 1200 \text{ MHz}$$

- **Feed-throughs** : Fuite des signaux d'entrée à la sortie (f et LO).
- Image à $f - \text{LO}$.
- **Harmoniques du LO** : Multiples du LO.
- **Produits d'intermodulations** : combinaison linéaire de f et LO.
- Composants RF utilisés pour des larges bandes de fréquence.

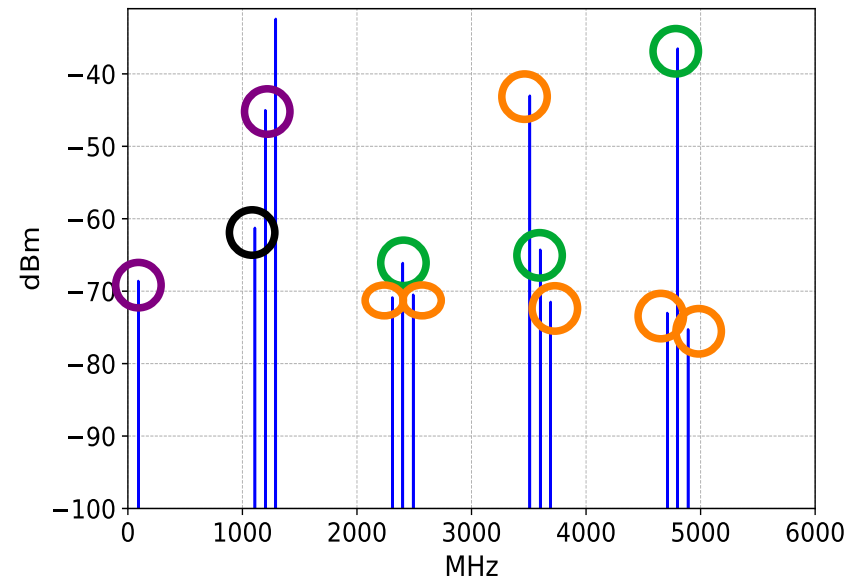


Modulateur IQ

Modélisation et conclusion



Mesure

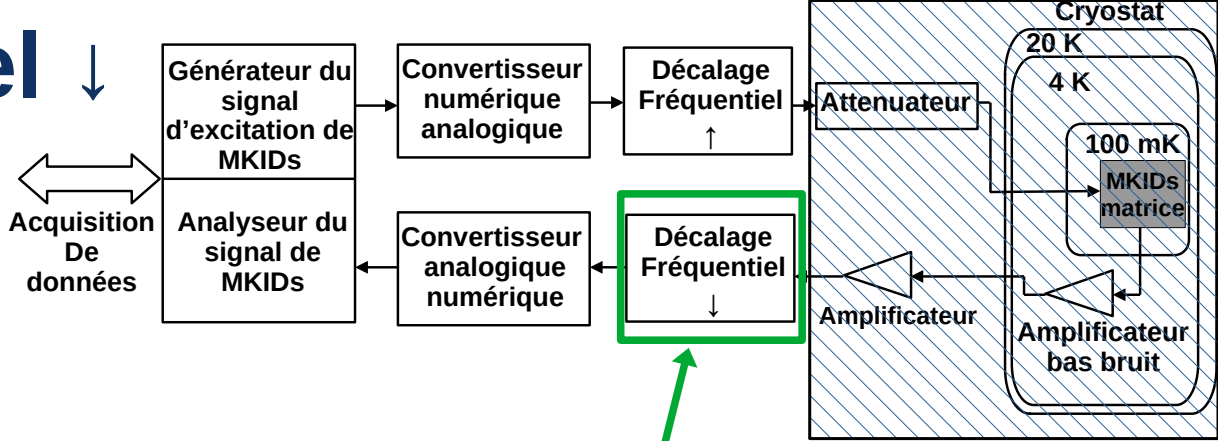


Modèle

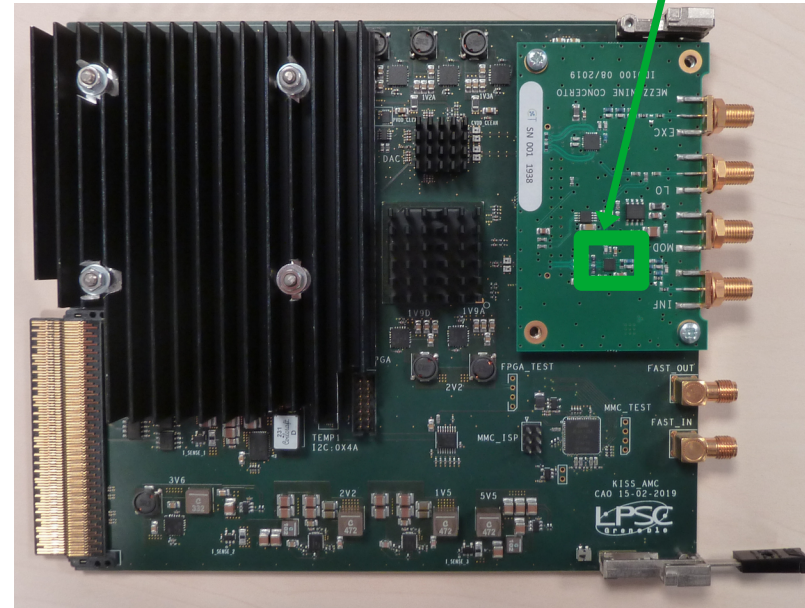
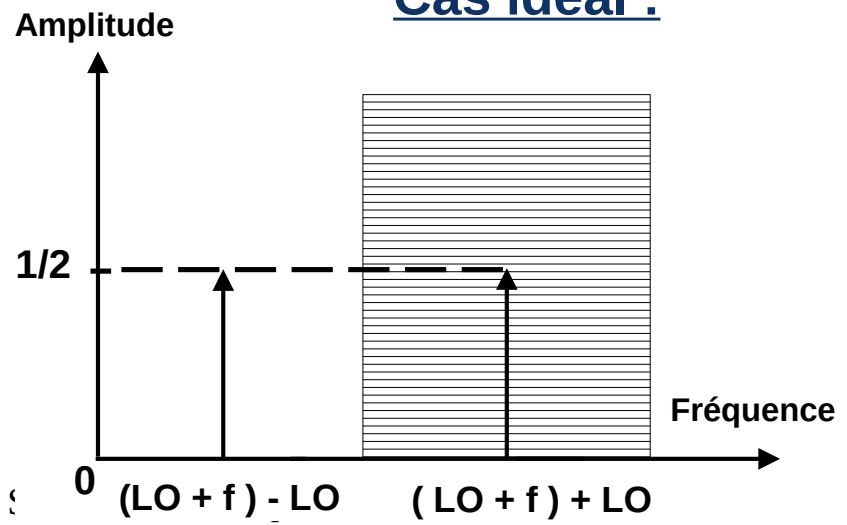
- Développement d'un modèle du modulateur IQ.
- Ce modèle servira quand la chaîne numérique sera modélisée.

Décalage fréquentiel

Mélangeur

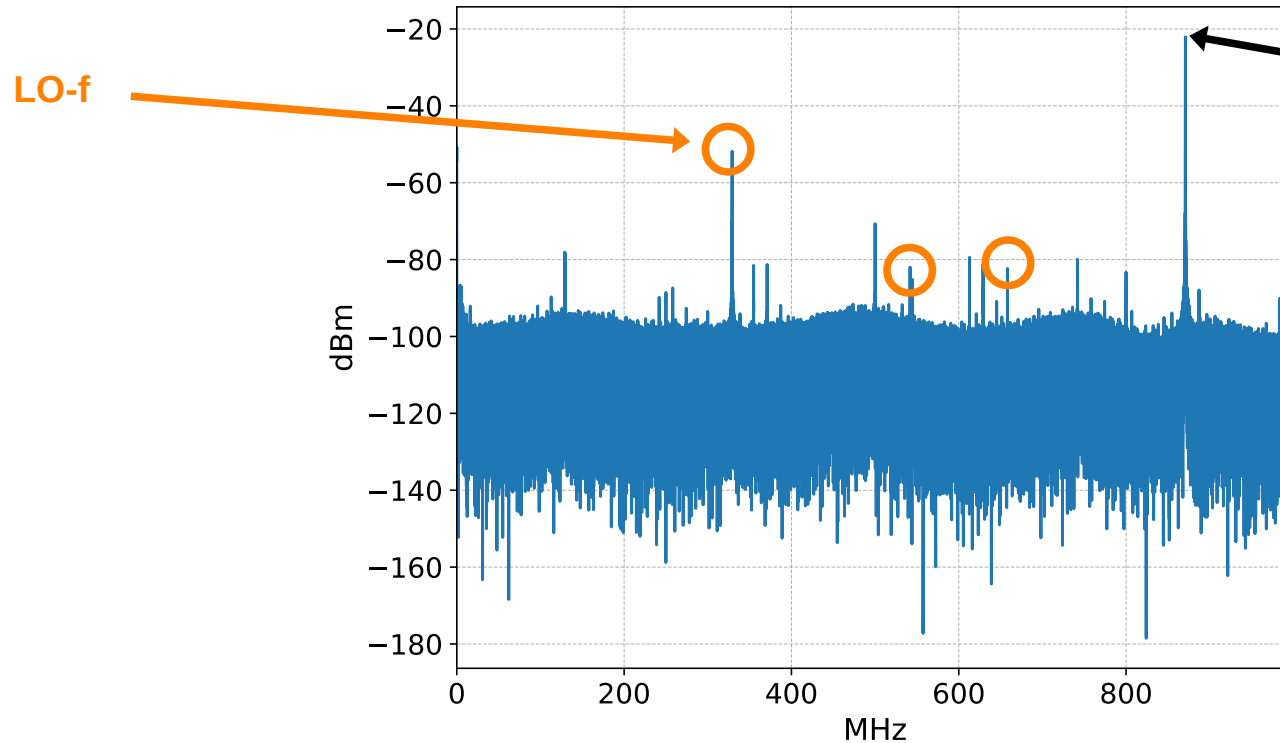


Cas idéal :



Mélangeur

Identification des imperfections



f = 870 MHz
Signal démodulé

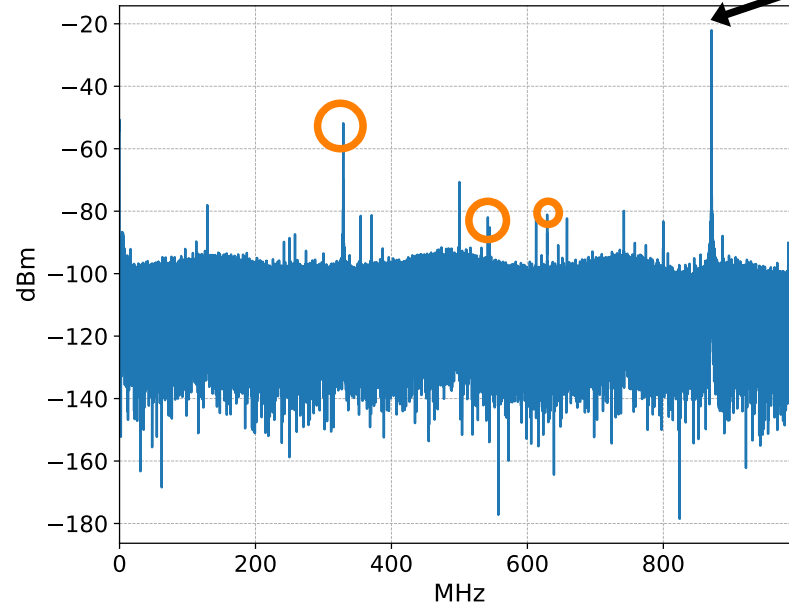
- **Produit d'intermodulation.**

Mélangeur

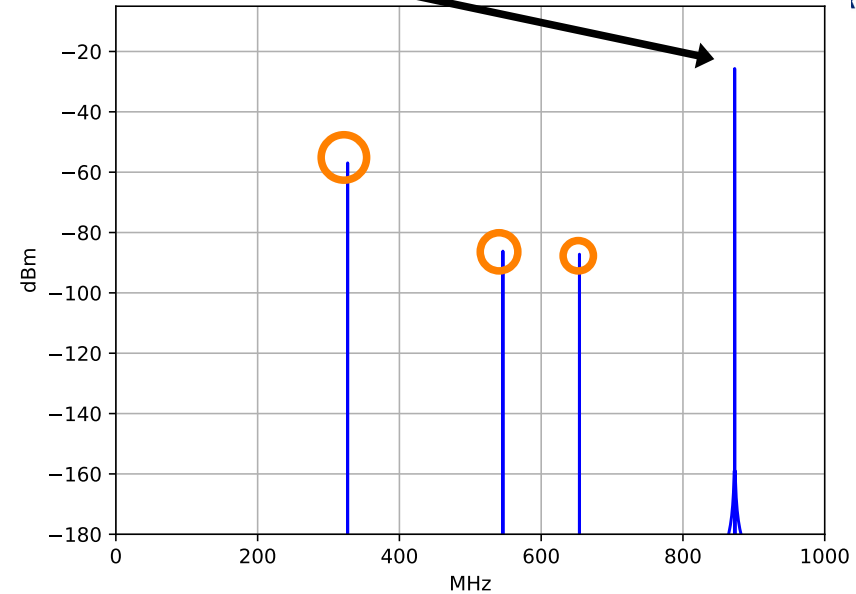
Modélisation et conclusion

Signal démodulé

870 MHz



Mesure

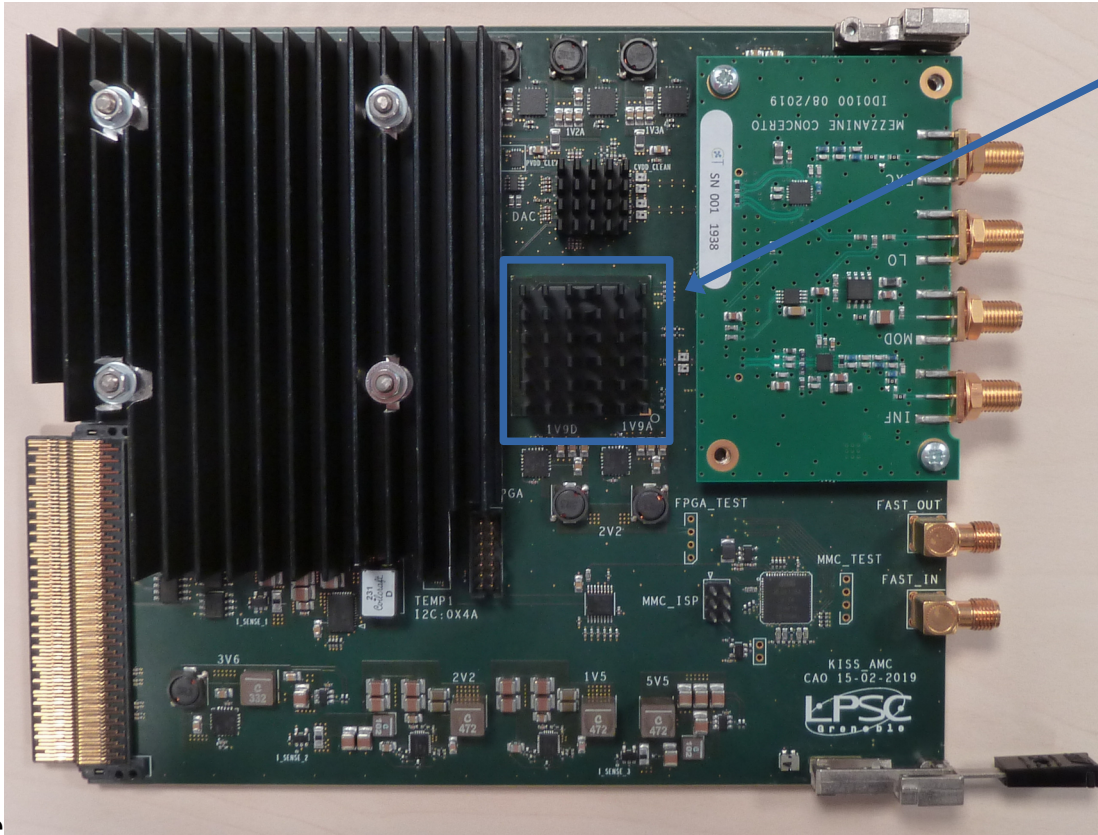
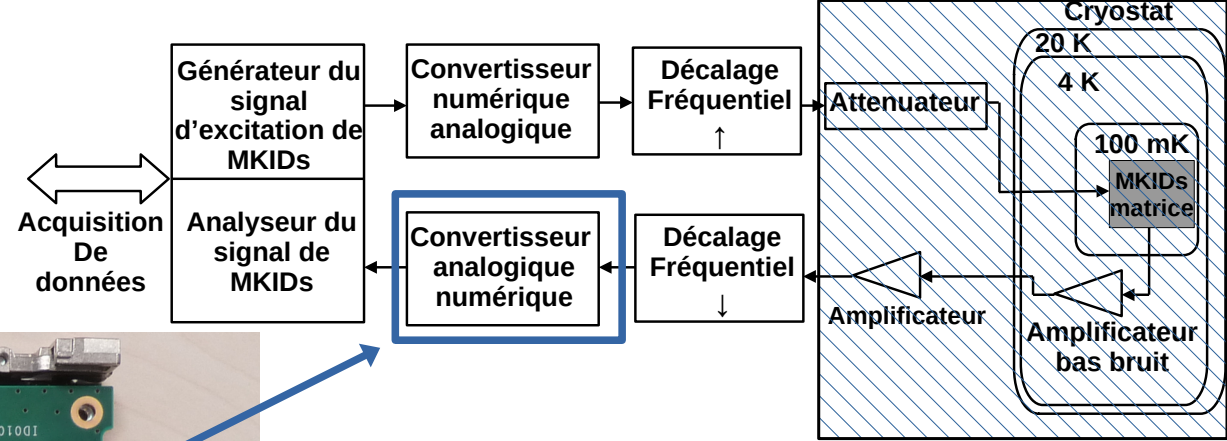


Modèle

- Développement du modèle.
- Ce modèle servira quand la chaîne numérique sera modélisée.

ADC

Mesures et caractéristiques



Mesures :

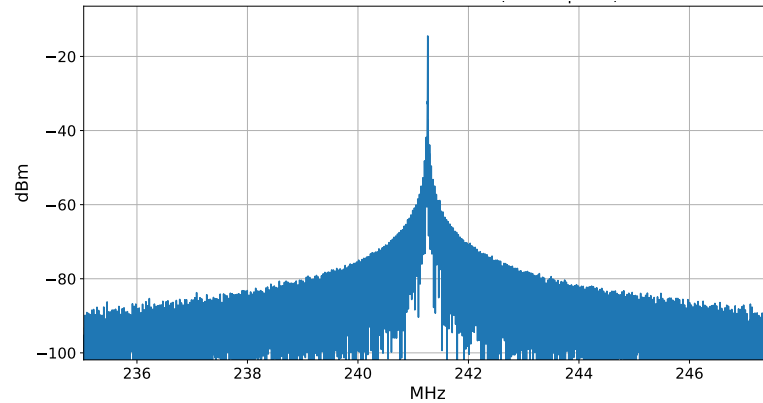
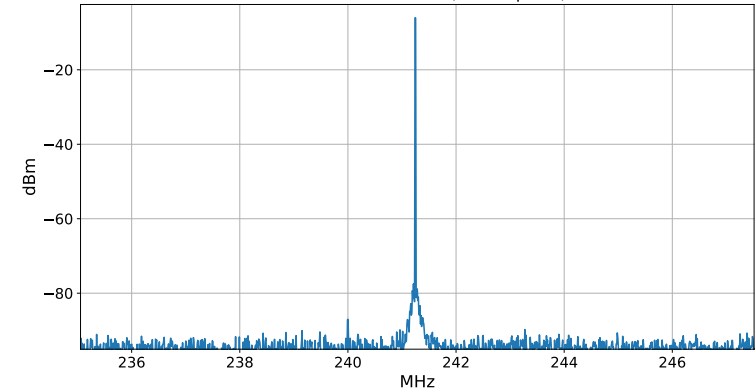
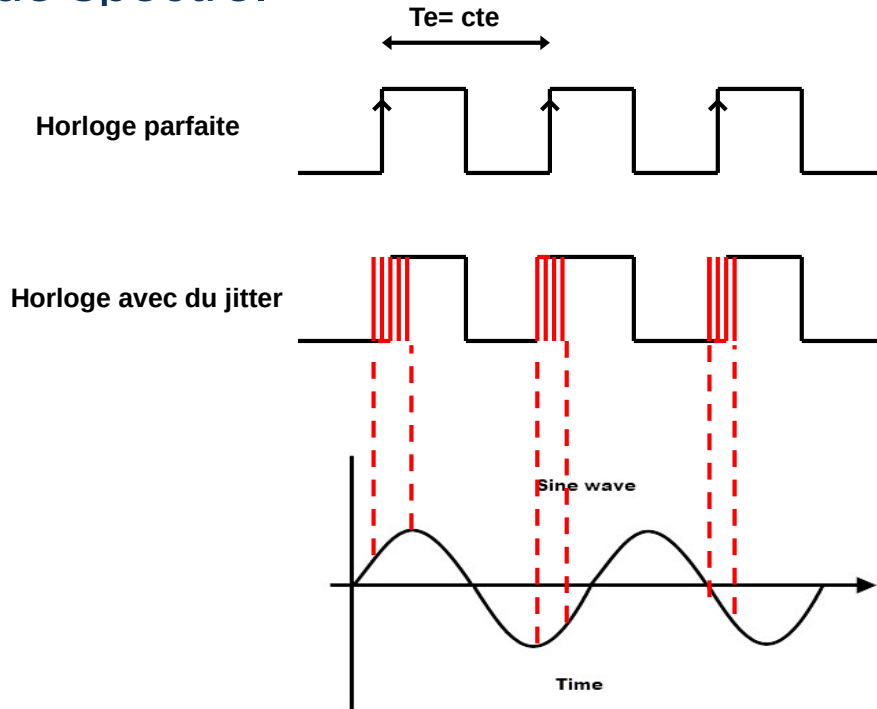
- Remplacement de la carte RF.

Caractéristiques d' ADC :

- Résolution : 12 bits,
- Fréquence d'échantillonnage (F_e) : 2 GHz.
- Architecture : 2 ADC 1GHz entrelacés.

ADC - Jitter

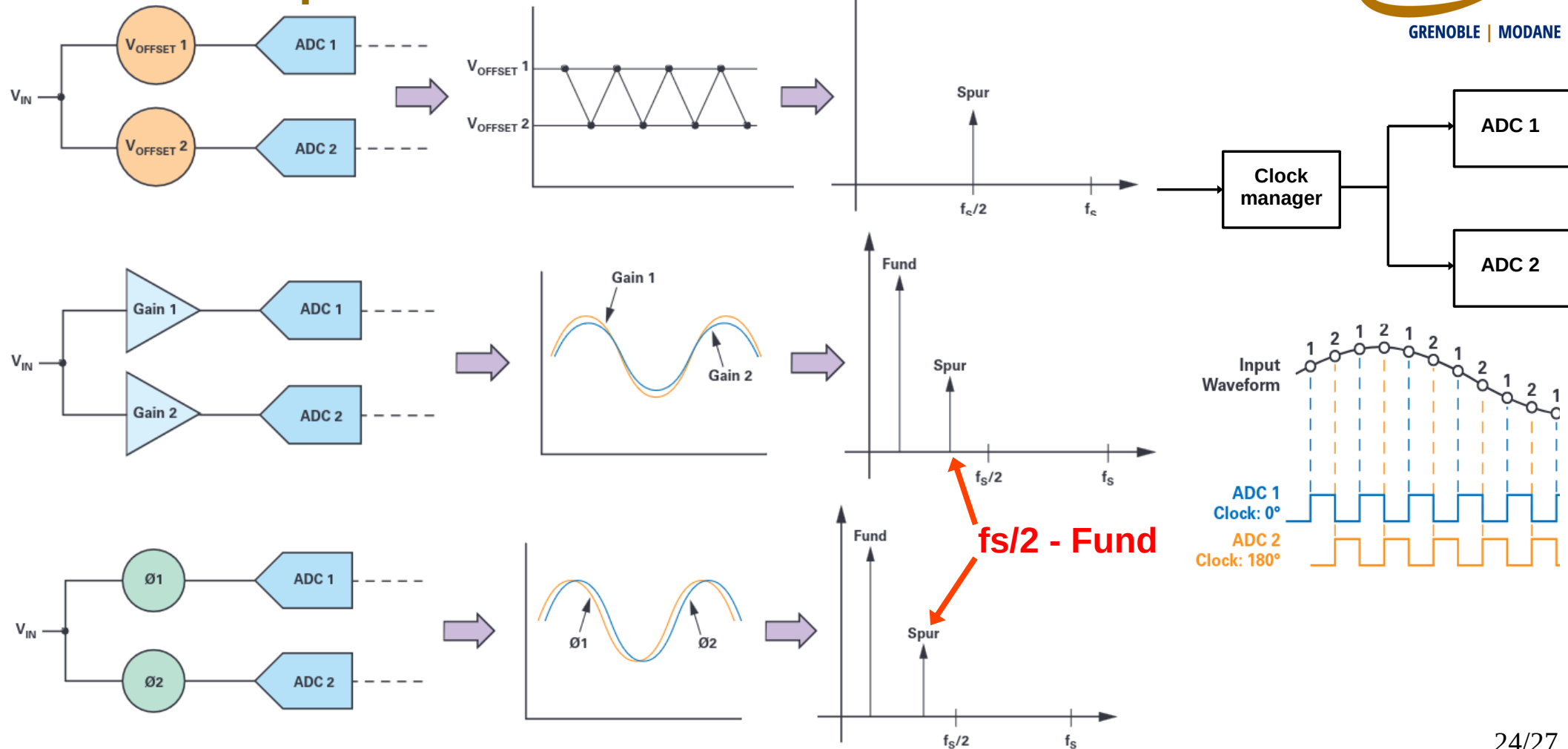
- Instabilité d'horloge $\rightarrow \epsilon(t)$ d'échantillonnage \rightarrow Étalement de spectre.



- Développement d'un modèle.
- Jitter estimé de 1,85 ps rms.

ADC

Caractéristiques et limitations

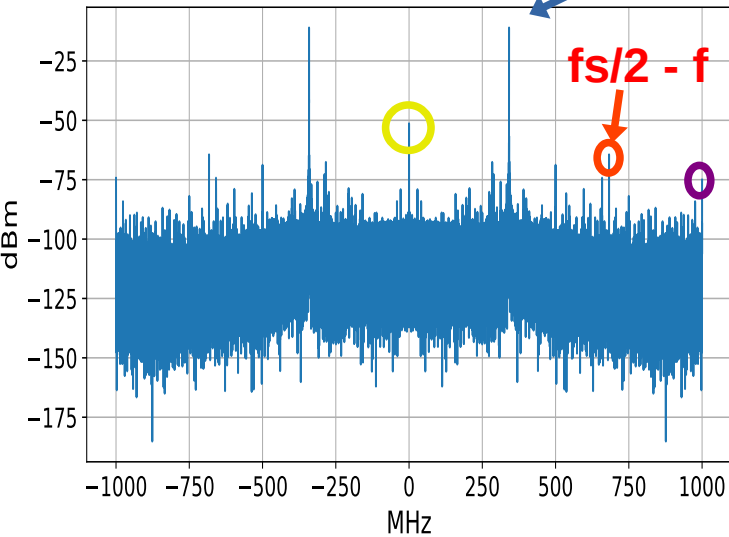


ADC

Mesure et modèle

$f = 350 \text{ MHz}$

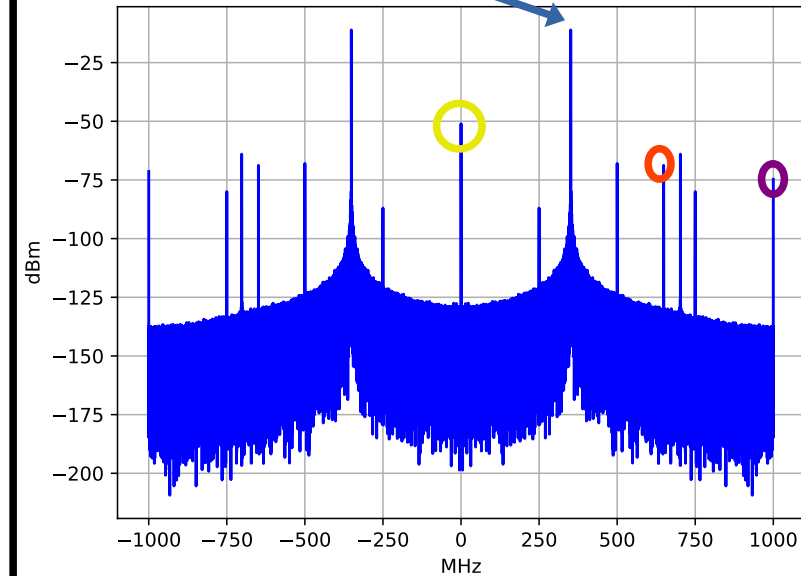
Mesure



Paramètres utilisés dans le modèle

- $\Delta\text{Offset} : 85 \mu\text{V}.$
- $\Delta\text{Gain} : 0,9995.$
- $\Delta\text{Temps} : 1,15 \text{ ps}.$
- Offset des 2 ADC : $400 \mu\text{V}.$

Modèle

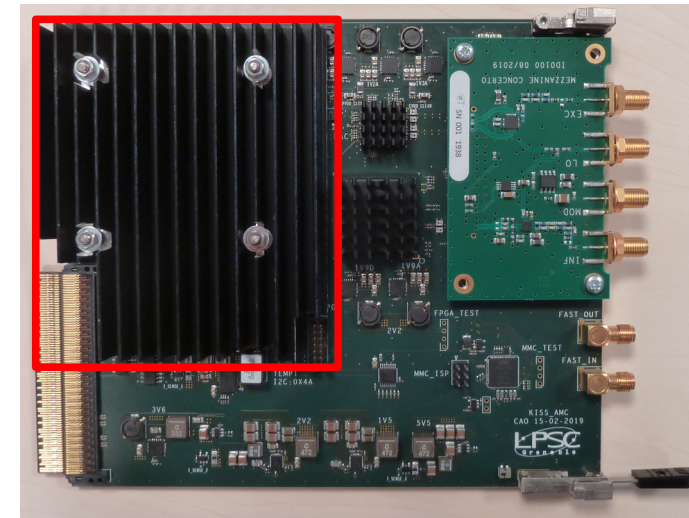
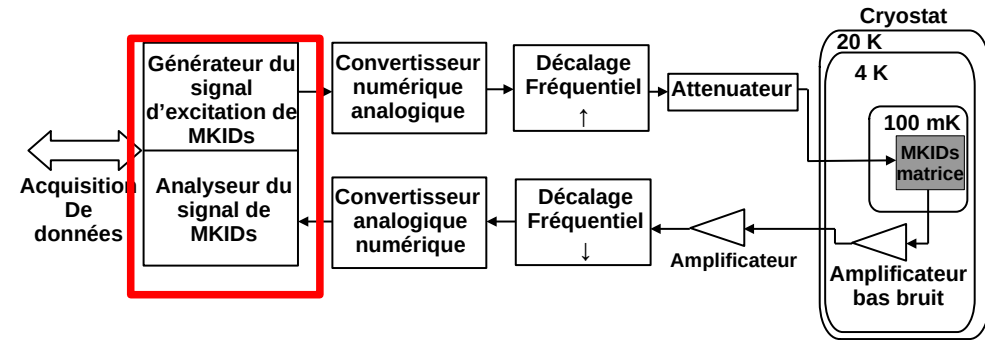


Bilan

- Modélisation de la chaîne analogique.

Perspectives

- Modélisation de la chaîne numérique.
- Combinaison des deux chaînes.
- Optimisation des calculs numériques (Bruit et ressources).



MERCI POUR VOTRE ATTENTION