



ENSEA

Beyond Engineering

COMPTE RENDU DE TP

Systèmes de communication sans fil

TP1 : Caractérisation d'un récepteur FSK

3^{eme} année

Année : 2025 - 2026

Camille LANFREDI, Valentin JOSSERON
Novembre 2025

Table des matières

1 Spectre d'un signal FSK	2
2 Carte en réception - Estimation de la sensibilité	3
2.1 Configuration	3
2.1.1 Frequency Error Indicator	3
2.2 Mesures	4
2.2.1 Signal reçu avec atténuation de 20 dB	4
2.2.2 Mesure du RSSI	4
2.2.3 Mesure de la sensibilité	4
3 Effet des brouilleurs	6
3.1 Configuration	6
3.2 Mesures avec un signal brouilleur de fort niveau	9
3.3 Mesures avec un signal brouilleur modulé	10

1 Spectre d'un signal FSK

Dans un premier temps, nous générions sur le synthétiseur une porteuse modulé en fréquence par un signal carré de niveau logique 1 (représentant les bits).

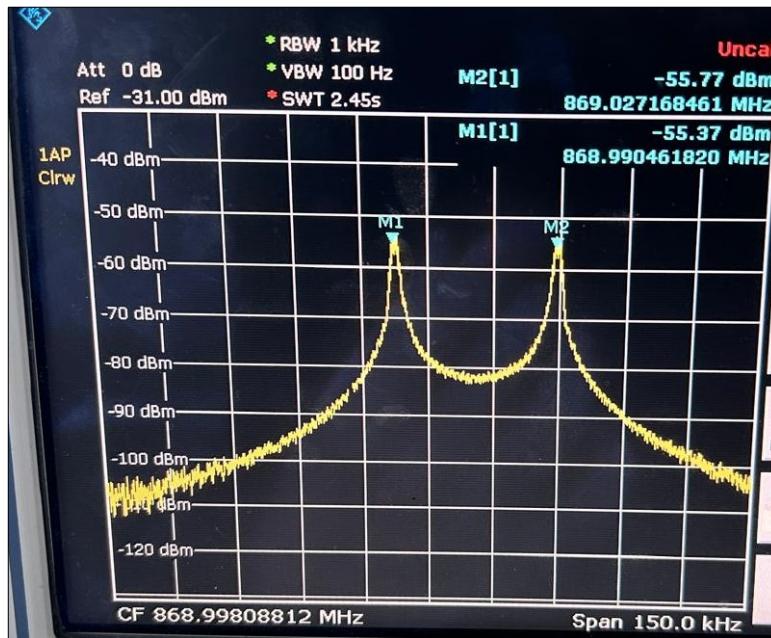


Figure 1: Spectre mesuré du signal FSK

On observe également la présence de bruit et de composantes intermédiaires entre les deux pics principaux ; celles-ci proviennent des transitions entre les deux états fréquentiels. Leur amplitude dépend directement du débit binaire : plus celui-ci est élevé, plus les transitions sont abruptes et plus l'énergie spectrale se répartit entre les deux raies, ce qui peut entraîner une diminution du SNR.

Cette visualisation est conforme à ce qui était attendu. En effet, nous nous attendions à observer des pics aux fréquences théoriques suivantes :

$$f_{1,\text{th}} = 869 \text{ MHz} - 40 \text{ kHz} = 868.96 \text{ MHz} \quad \text{et} \quad f_{2,\text{th}} = 869 \text{ MHz} + 40 \text{ kHz} = 869.04 \text{ MHz}.$$

D'après les marqueurs de mesure, nous relevons les fréquences expérimentales suivantes :

$$f_{1,\text{exp}} = 868.99 \text{ MHz},$$

et

$$f_{2,\text{exp}} = 869.03 \text{ MHz},$$

La dérivation de fréquence est de quasiment 40 kHz.

2 Carte en réception - Estimation de la sensibilité

On passe maintenant à la configuration d'une des deux cartes. Pour se faire, on se sert du logiciel XE1203 en mode Eval. Dans notre manipulation, nous avons ajouté un affaiblisseur SMA de 20 dB

2.1 Configuration

2.1.1 Frequency Error Indicator

Le FEI (Frequency Error Indicator) permet de mesurer l'écart de fréquence entre la porteuse reçue et la fréquence centrale configurée sur la carte. Pour le mesurer, nous faisons varier la fréquence du générateur RF autour de la fréquence centrale de 868.98 MHz, tout en observant la valeur du FEI sur le logiciel XE1203.

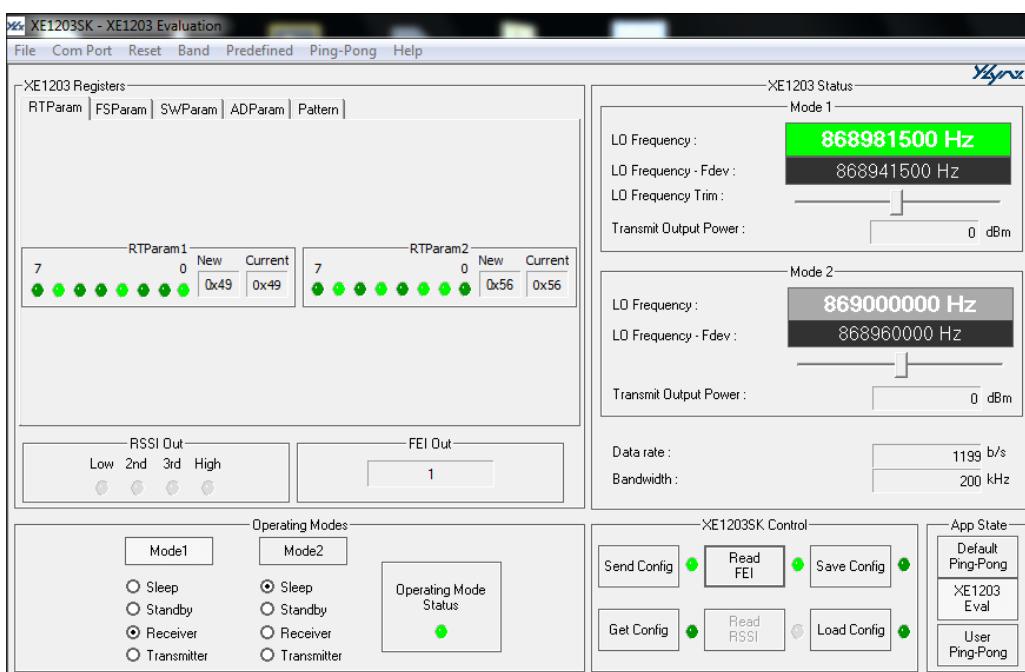


Figure 2: Mesure du FEI

On observe que le FEI est égal à 1, ce qui signifie que la fréquence de la porteuse reçue est bien centrée sur la fréquence configurée de la carte. Nous obtenons donc une bonne synchronisation en fréquence entre l'émetteur et le récepteur à $f=868,98$ Hz.

Une fois cette étape réalisée, nous pouvons passer à la mesure de la sensibilité de la carte en réception.

2.2 Mesures

2.2.1 Signal reçu avec atténuation de 20 dB

Voici le signal reçu par la carte avec l'atténuation de 20 dB :

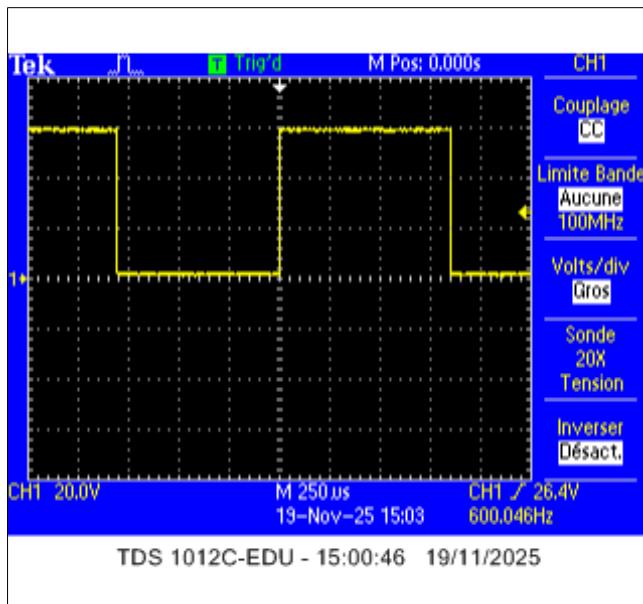


Figure 3: Signal reçu par la carte avec atténuation de 20 dB

2.2.2 Mesure du RSSI

La sensibilité d'une carte RF correspond à la puissance minimale à partir de laquelle le signal devient indétectable. Pour cela, nous avons relevé les valeurs de RSSI pour les différentes gammes de mesure proposées par la carte :

Gamme	High → 3rd	3rd → 2nd	2nd → Low	Plus de réception
Gamme haute	-48.8 dBm	-54.2 dBm	-60.2 dBm	-81 dBm
Gamme basse	-65 dBm	-69.4 dBm	-74.6 dBm	-94 dBm

Table 1: Mesures pour les différentes gammes et transitions, avec atténuation de 20 dB

On peut donc en déduire que la plage de RSSI mesurable par la carte s'étend de -48.8 dBm à -94 dBm avec atténuation de 20 dB, soit de -68.8 dBm à -114 dBm sans atténuation.

2.2.3 Mesure de la sensibilité

En conservant l'atténuation de 20 dB, nous avons mesuré la sensibilité pour deux modes de fonctionnement:

- **Mode A** : forte sensibilité
- **Mode B** : forte linéarité

Les mesures obtenues sont les suivantes :

Avec Atténuation de 20 dB, on mesure les sensibilités suivantes :

On en déduit les sensibilités réelles de la carte en soustrayant l'atténuation de 20 dB :

Mode	$\mathbf{Db = 1200 \text{ bit/s} \Delta f = 40 \text{ kHz}}$	$\mathbf{Db = 4800 \text{ bit/s} \Delta f = 80 \text{ kHz}}$
Mode A (forte sensibilité)	-91.2 dBm	-92.8 dBm
Mode B (forte linéarité)	-78.7 dBm	-81.1 dBm

Table 2: Sensibilités mesurées pour les modes A et B selon le débit et la déviation fréquentielle, avec atténuation de 20 dB

Mode	$\mathbf{Db = 1200 \text{ bit/s} \Delta f = 40 \text{ kHz}}$	$\mathbf{Db = 4800 \text{ bit/s} \Delta f = 80 \text{ kHz}}$
Mode A (forte sensibilité)	-111.2 dBm	-112.8 dBm
Mode B (forte linéarité)	-98.7 dBm	-101.1 dBm

Table 3: Sensibilités réelles pour les modes A et B selon le débit et la déviation fréquentielle, sans atténuation

On constate que le mode A, conçu pour une haute sensibilité, présente une meilleure capacité à détecter des signaux faibles par rapport au mode B, optimisé pour une haute linéarité. De plus, les débits faibles se révèlent plus sensibles que les débits élevés. Cette différence s'explique par la dégradation du rapport signal sur bruit (SNR), qui affecte davantage les débits rapides.

3 Effet des brouilleurs

Dans cette troisième partie du TP, nous avons étudié l'influence de différents brouilleurs sur le récepteur FSK, après avoir au préalable caractérisé le spectre du signal utile et la sensibilité des cartes. L'idée était de déterminer jusqu'à quel point une liaison FSK reste exploitable lorsque d'autres signaux, voulus ou non, viennent occuper la même bande de fréquences. Toutes les mesures ont été réalisées pour les deux configurations imposées : $D_1 = 1200 \text{ bit/s}$ avec une déviation de fréquence $\Delta f = 40 \text{ kHz}$, puis $D_2 = 4800 \text{ bit/s}$ avec $\Delta f = 80 \text{ kHz}$.

3.1 Configuration

Pour la mise en place de la liaison, une première carte a été configurée en émission à 869 MHz avec une puissance de sortie de 0 dBm. Le GBF appliquait la suite binaire sur l'entrée bidirectionnelle DataOut (0 V pour l'état logique 0 et 3,6 V pour l'état logique 1). La carte réceptrice a été réglée avec les mêmes paramètres de fréquence, de débit et de déviation afin d'assurer la compatibilité.

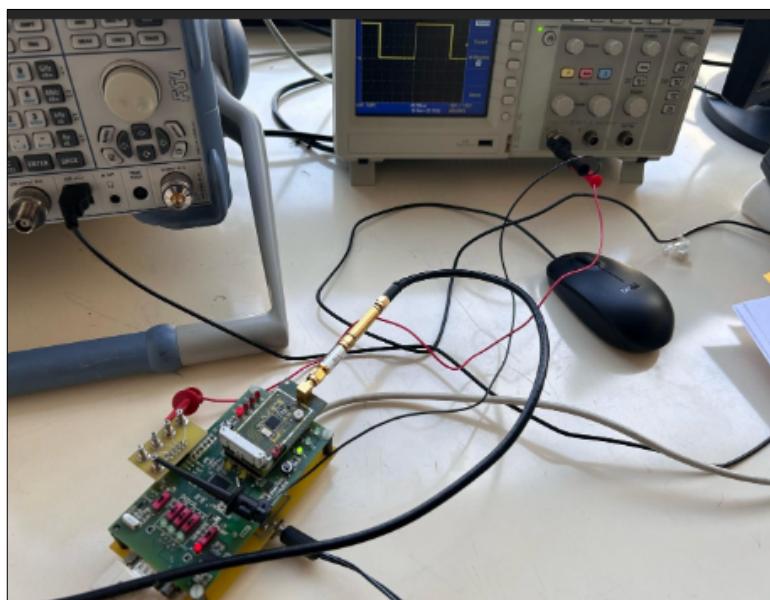


Figure 4: Configuration de la carte et vérification à l'analyseur de spectre

Dans un premier temps, nous avons relié la sortie RF de la carte d'émission à l'analyseur de spectre à l'aide d'un câble SMA. Cela nous a permis de vérifier le bon positionnement en fréquence autour de 869 MHz et d'observer le spectre FSK généré. On retrouve exactement la même forme de spectre que lors de la partie 1 du TP : deux raies principales de puissance similaire apparaissent de part et d'autre de la porteuse, séparées de Δf .

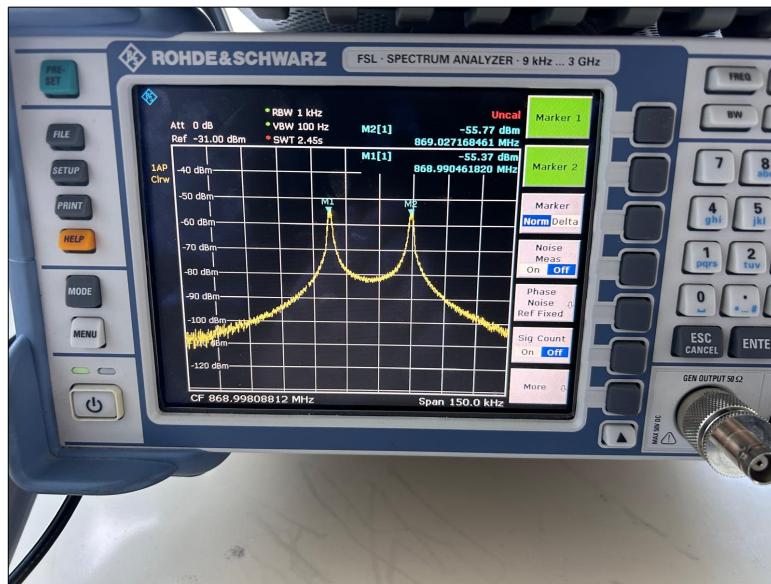


Figure 5: Spectre mesuré du signal FSK avec $\Delta f = 40 \text{ kHz}$ et $D = 1200 \text{ bit/s}$

La figure ci-dessus illustre bien cette structure en “double pic”. Une fois ce contrôle effectué, nous avons débranché le câble et connecté les antennes sur les deux cartes pour passer à l’étude des brouilleurs en propagation hertzienne.

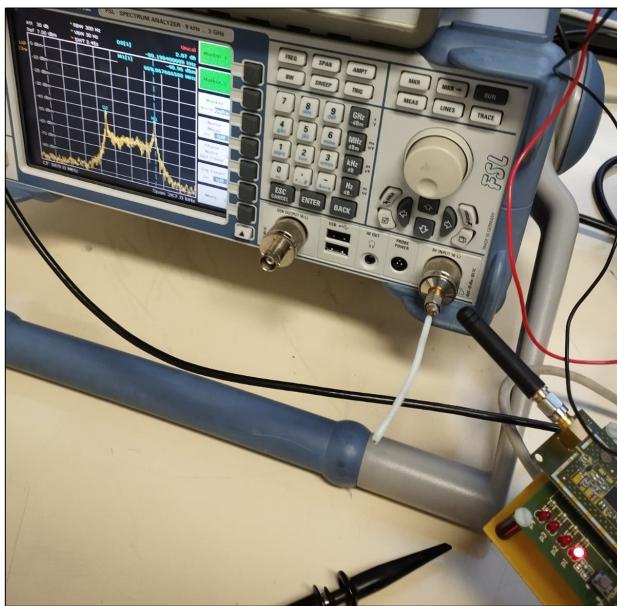


Figure 6: Visualisation de la liaison FSK sans brouilleur (proche)

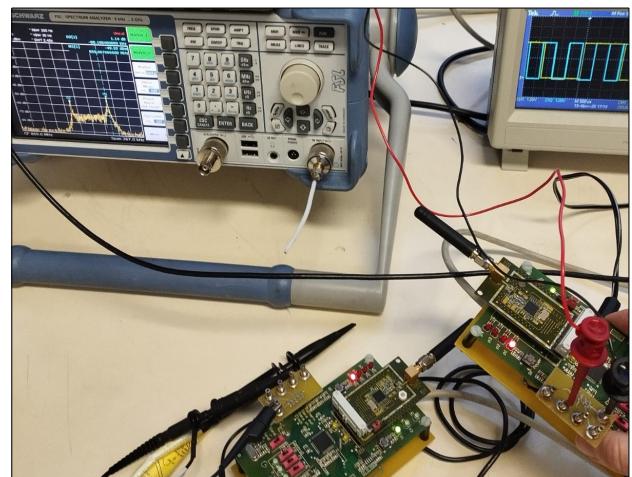


Figure 7: Visualisation de la liaison FSK sans brouilleur (loin)

Nous pouvons voir que la liaison fonctionne correctement sans brouilleur, que ce soit à courte ou longue distance.

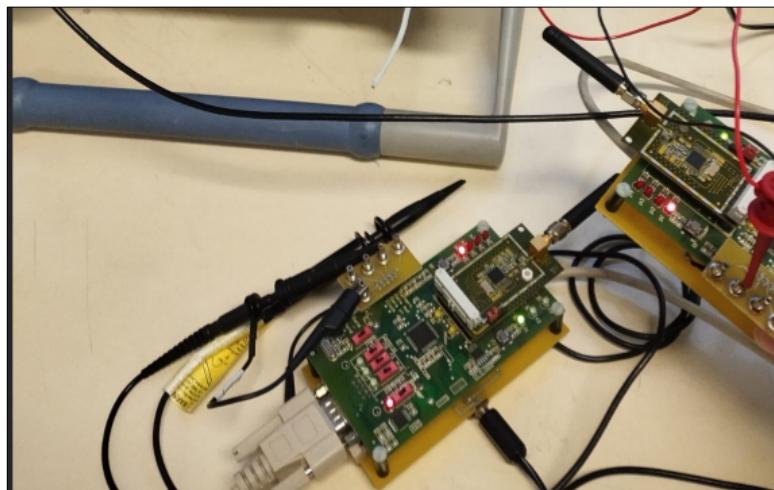


Figure 8: Montage avec deux antennes

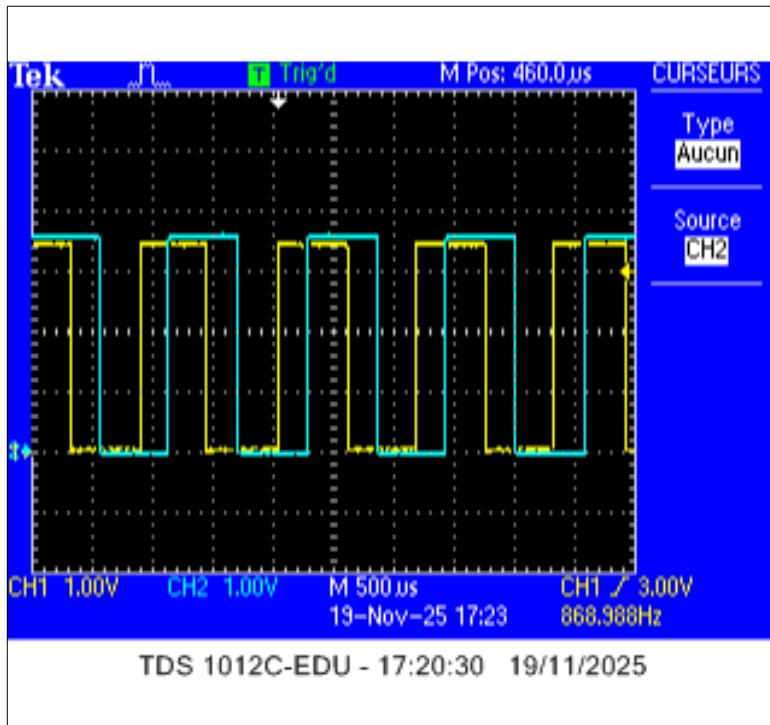


Figure 9: Oscilloscopogramme du signal reçu (jaune) et du signal envoyé (bleu) sans brouilleur

L'oscilloscopogramme ci-dessus montre que le signal reçu (en jaune) correspond bien au signal émis (en bleu), avec un léger décalage temporel dû au temps de propagation. Nous avons pu vérifier que la liaison FSK fonctionne correctement en l'absence de brouilleur, ce qui nous permet de passer à l'étude de l'effet des différents types de brouilleurs.

3.2 Mesures avec un signal brouilleur de fort niveau

Nous avons ensuite introduit un premier type de perturbation : un signal brouilleur non modulé de fort niveau. Pour cela, le générateur RF a été utilisé avec une quatrième antenne, de manière à injecter dans l'air un signal continu dont nous pouvions faire varier la fréquence dans le voisinage du spectre du signal FSK utile. Le niveau du signal utile restait fixe, et nous augmentions progressivement la puissance du brouilleur jusqu'à observer des erreurs de décodage sur la sortie DataOut du récepteur, c'est-à-dire une trame binaire qui ne correspondait plus à celle envoyée.

Numériquement, nous avons relevé qu'il suffisait d'environ 0,3 dBm de puissance de brouilleur pour dégrader la réception dans la configuration $D = 1200 \text{ bit/s}$, $\Delta f = 40 \text{ kHz}$, alors qu'il fallait monter jusqu'à 3 dBm pour commencer à perturber la réception en $D = 4800 \text{ bit/s}$, $\Delta f = 80 \text{ kHz}$.

Ces résultats sont logiques : lorsque le débit et la déviation augmentent, le signal FSK utile occupe une bande un peu plus large et les deux fréquences correspondant aux bits 0 et 1 sont plus écartées. Le signal bande étroite du brouilleur recouvre alors moins efficacement l'ensemble du spectre utile et il faut donc augmenter davantage sa puissance pour qu'il vienne masquer suffisamment l'énergie autour des deux raies FSK et perturber les décisions du démodulateur.

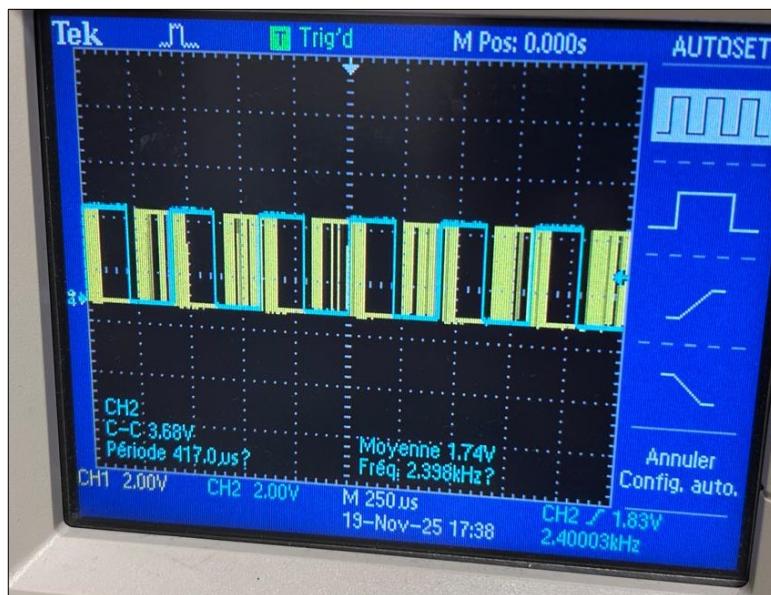


Figure 10: Oscilloscopogramme du signal reçu (jaune) et du signal envoyé (bleu) avec brouilleur de fort niveau, $D = 4800 \text{ bit/s}$, $\Delta f = 80 \text{ kHz}$

En faisant varier la fréquence du brouilleur, nous avons également observé qu'il est particulièrement efficace lorsqu'il est placé au milieu des deux raies FSK : dans cette zone, le démodulateur a du mal à trancher entre les deux états de fréquence et commet plus facilement des erreurs de décision.

La manipulation a également été réalisée pour deux niveaux de signal utile au récepteur, séparés d'environ 40 dB. Dans le premier cas, les antennes étaient correctement vissées, le couplage était bon et le signal reçu était largement au-dessus de la sensibilité. Dans le second cas, nous avons volontairement dévisé légèrement l'antenne d'émission, ce qui crée une forte désadaptation et réduit nettement la puissance effectivement rayonnée, donc le niveau reçu se retrouve proche du seuil de sensibilité. On constate alors que, lorsque le signal utile arrive déjà faible sur le récepteur, un brouilleur de puissance relativement modérée suffit à faire apparaître des erreurs ; la chaîne devient très vulnérable. Au contraire, lorsque le signal utile

dispose d'une bonne marge, il faut un brouilleur nettement plus puissant pour dégrader la réception.

Nous avons pris soin de comparer le comportement du récepteur en mode A et en mode B. Le mode A est optimisé pour la meilleure sensibilité possible, ce qui le rend plus facilement saturé lorsqu'un signal parasite de fort niveau est présent dans la bande. Le mode B, quant à lui, est plus linéaire : il tolère mieux les niveaux élevés et tarde légèrement l'apparition des erreurs lorsque l'on augmente la puissance du brouilleur.

3.3 Mesures avec un signal brouilleur modulé

Dans la dernière série de mesures, nous avons étudié un brouilleur cette fois modulé en FM, avec des caractéristiques proches du signal utile. Le générateur 8647A émettait toujours à 869 MHz, mais nous l'avons configuré pour qu'il soit modulé avec le même débit binaire et la même déviation de fréquence que l'émetteur FSK. Le brouilleur possède alors un spectre très similaire à celui de la transmission principale. Pour chacune des deux configurations ($D_1 = 1200 \text{ bit/s}$, $\Delta f = 40 \text{ kHz}$ puis $D_2 = 4800 \text{ bit/s}$, $\Delta f = 80 \text{ kHz}$), nous avons augmenté la puissance de ce brouilleur modulé jusqu'à ce que la trame reçue devienne erronée.

On constate que, pour un même niveau de puissance, ce brouilleur modulé est plus destructeur qu'un simple signal continu : comme il occupe les mêmes raies fréquentielles que le signal utile, le récepteur voit en quelque sorte deux signaux FSK superposés et ne sait plus lequel suivre. Le rapport entre la puissance utile et la puissance du brouilleur nécessaire pour maintenir une réception correcte devient donc plus sévère.