

fonction FFT des oscilloscopes

représentation du signal dans le domaine spectral avec les oscilloscopes à mémoire numérique

Alfred Rosenkränzer (Allemagne)

Après le multimètre et l'oscilloscope, l'analyseur de spectre (AS) occupe certainement la troisième place dans la liste des instruments de mesure désirés par l'électronicien. Quoique justifié, ce vœu se voit rarement réalisé ; un AS reste aujourd'hui encore assez cher, même si les prix évoluent sous l'impulsion de sociétés telles que Siglent, Rigol et Signalhound. Nous décrivons ici les fonctions spectrales dont sont équipés les oscilloscopes à mémoire numérique (DSO) modernes, de sorte que vous pourrez décider par vous-même si un tel succédané du « véritable » AS pourrait vous donner satisfaction.

Les DSO (*Digital Storage Oscilloscope*) même bon marché disposent désormais de la possibilité de représenter un signal dans le domaine fréquentiel en plus du domaine temporel. Ce n'est pas étonnant, car un DSO dispose, grâce à sa mémoire et ses capacités de calcul, des outils essentiels pour décomposer un signal par FFT (transformation de Fourier rapide). Certes cette fonction affichera le spectre en fréquences comme le ferait un AS, mais elle ne pourra pas vraiment tenir tête à un véritable AS. Il est nécessaire de bien comprendre les fonctions d'un analyseur de spectre et celles d'un oscilloscope à mémoire numérique afin de pouvoir déterminer si la fonction FFT de ce dernier peut suffire à vos besoins.

Analyseur de spectre

Il existe plusieurs principes pour évaluer le spectre en fréquences d'un signal. La méthode la plus simple, mais qui n'est

plus utilisée aujourd'hui, consiste à balayer le signal à l'aide d'un filtre passe-bande dans le domaine de fréquences qui vous intéresse, et à évaluer l'amplitude du signal en sortie du filtre. Une autre méthode sera privilégiée, car il est difficile de réaliser un tel filtre ajustable avec une bonne dynamique et une largeur de bande suffisamment étroite en regard de la bande de fréquences scrutée, généralement beaucoup plus large. Comme le montre la **figure 1**, après atténuation ou amplification (non représentée ici), le signal d'entrée est mélangé au signal d'un oscillateur commandé. Cet oscillateur est piloté par un microcontrôleur ou équivalent, de sorte qu'on obtient en sortie du mélangeur une fréquence intermédiaire constante pour la bande de fréquences souhaitée par l'utilisateur. Le principe s'apparente au circuit de base d'un récepteur radio superhétérodynie [1]. Le signal FI est alors débarrassé de toutes composantes spectrales indésirables grâce à un filtre de fréquence intermédiaire, fixe et de grande qualité. Après amplification et redressement, l'amplitude du signal est mesurée, ce signal est ensuite utilisé conjointement avec le signal de commande de l'oscillateur pour attaquer l'affichage à deux dimensions. On peut aussi par ce principe balayer une bande de fréquences extrêmement large, tout en conservant une excellente dynamique. Comme on va le voir ci-après, un véritable AS fonctionne donc de manière très différente d'un DSO avec FFT.

DSO avec fonction FFT

N'importe quel oscilloscope numérique amplifie son signal d'entrée puis effectue une conversion A/N ; les données résultantes sont mises en mémoire pour un traitement numérique ultérieur. Certes le microcontrôleur, SoC ou FPGA d'un tel appareil peut représenter ces données numériques sous forme d'une courbe d'amplitude en fonction du temps, mais il peut faire bien plus

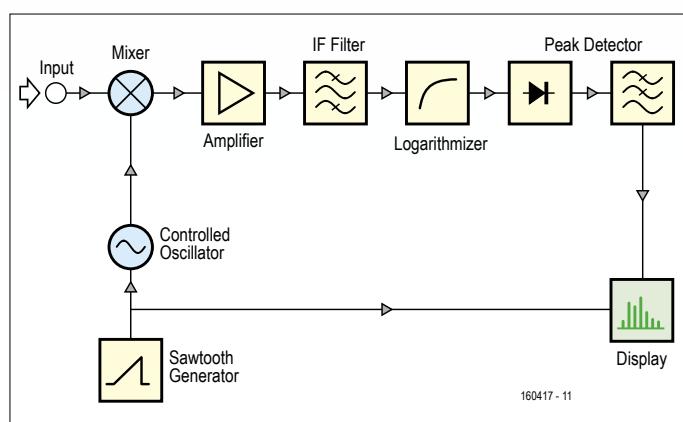
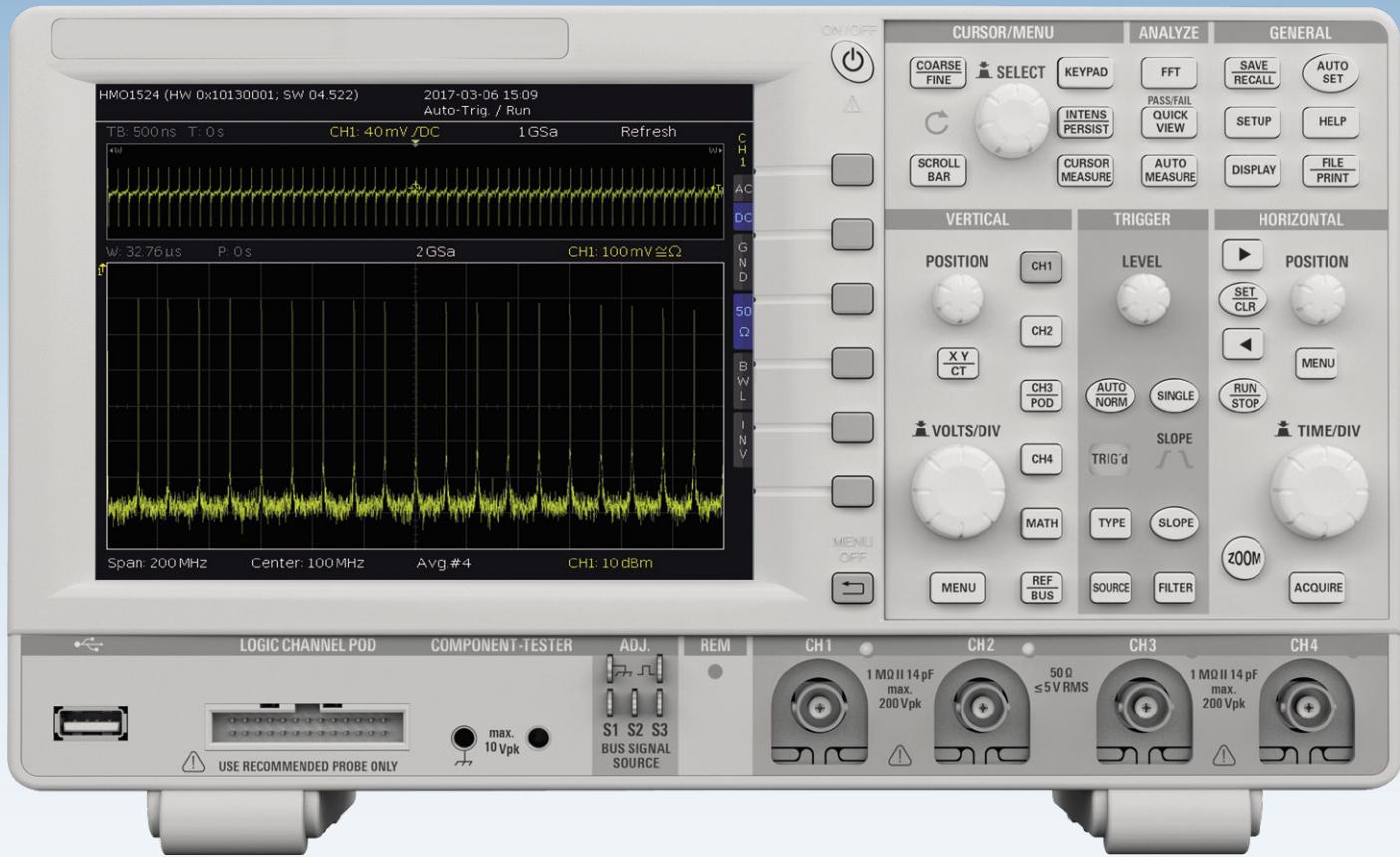


Figure 1. Synoptique simplifié d'un analyseur de spectre traditionnel.



avec ces données. Les DSO même bon marché peuvent généralement calculer et afficher les valeurs crêtes, valeurs moyennes ou efficaces, ainsi que les temps de montée, de descente ou autres durées de transitions, d'impulsions, etc. La fonction intégrée de fréquencemètre ne requiert par ailleurs que peu de ressources de calcul. L'affichage du signal dans le domaine fréquentiel est au moins tout aussi intéressant.

Le principe de base de l'affichage spectral par un DSO est illustré à la **figure 2**. Les données sont mémorisées après ajustage, amplification, filtrage passe-bas et conversion A/N. Les données FFT calculées sont affichées en amplitude par rapport à la fréquence. À cet effet, un nombre prédéfini d'échantillons du signal est d'abord écrit en mémoire à la fréquence d'échantillonnage du DSO, ou bien seule une certaine partie des données mémorisées est sélectionnée pour être analysée. Le nombre d'échantillons à analyser est généralement une puissance de deux pour un calcul de FFT le plus rapide possible. Les FFT peuvent travailler aussi avec un nombre différent d'une puissance de deux, mais elles requièrent alors une plus grande puissance de calcul, ou plus de temps.

À partir des 2^n échantillons, la FFT produit $2^{(n-1)}$ sections spectrales, ou canaux de fréquences. Par exemple $2^{16} = 65.536$ échantillons produiront 32.768 canaux de fréquences. La fréquence maximale obtenue correspond à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Avec un oscilloscope de relativement bonne qualité affichant une fréquence d'échantillonnage de 2 Géch/s, le spectre résultant atteint 1 GHz (voir aussi le théorème de Nyquist). La largeur de spectre d'un canal se calcule avec $1 \text{ GHz}/32.768 = 30.5 \text{ kHz}$. Le canal le plus inférieur inclut la composante continue. Tout cela est bien beau, mais venons-en à présent aux limitations.

Tout d'abord, la largeur de spectre affichable est limitée non seulement par la fréquence d'échantillonnage, mais aussi par

la bande passante inférieure de la partie analogique du DSO. Bien plus décisif : un tel spectre est parfait seulement si les fréquences respectives du signal et d'échantillonage sont cohérentes (ont un rapport stable). La mémoire doit contenir un nombre entier de périodes du signal. De plus, la fin de la forme d'onde doit correspondre parfaitement à son début.

▶ Spectres par FFT d'un DSO

Généralement ce n'est pas le cas. On utilise alors des « fenêtres » pour résoudre ce problème. À cet effet, on insère artificiellement le signal dans un genre d'enveloppe atténuant le début et la fin du signal selon un modèle défini, de sorte que l'on n'observe plus de (grands) sauts d'amplitude grâce à ces atténuations. Il existe différents types de fenêtres ou d'enveloppes ayant chacune une incidence différente sur le spectre résultant.

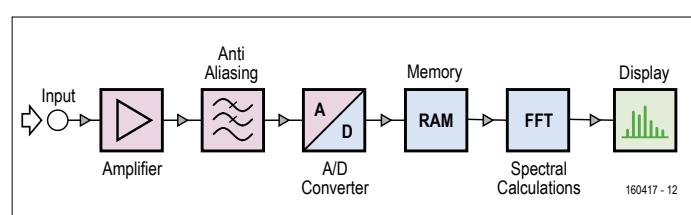


Figure 2. Schéma de principe de la fonction FFT d'un oscilloscope numérique.

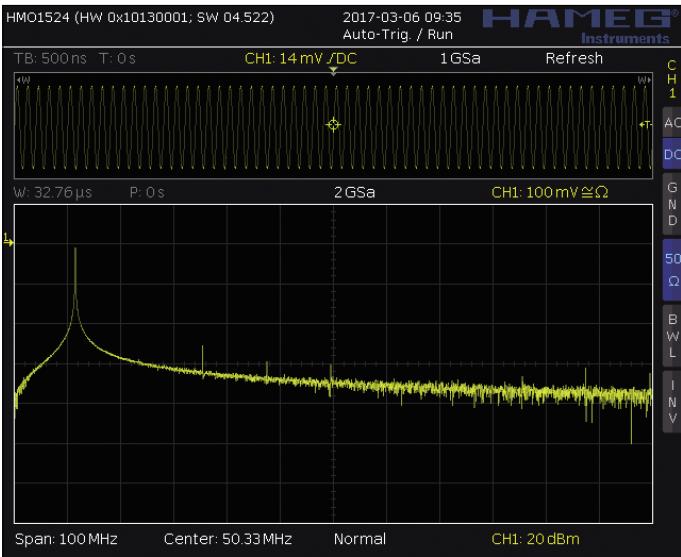


Figure 3. Spectre avec fenêtre rectangulaire. On notera les « jupes » larges (en anglais « skirt »). Ce spectre est inexploitable en tant que critère d'évaluation.

Vous trouverez sur l'internet des informations détaillées sur le « fenêtrage ».

La FFT en pratique

Avertissement : toutes les captures d'écran de DSO suivantes ont été faites avec un oscilloscope Hameg de type HMO1524. L'un ou l'autre détail pourra être différent avec un autre appareil. La partie supérieure de la **figure 3** montre la courbe d'amplitude en fonction du temps (affichage classique d'un oscilloscope) d'un signal sinusoïdal ; la partie inférieure, son spectre. Ce type d'affichage simultané d'un signal en fonction du temps et de la fréquence est un véritable avantage d'un DSO par rapport à un AS. Alors que la figure 3 montre un spectre plutôt inexploitable en raison de l'utilisation d'une fenêtre rectangulaire, la **figure 4** illustre l'effet de la fenêtre de type Hanning. La **figure 5** montre le spectre d'un signal carré avec une fenêtre de Hanning.

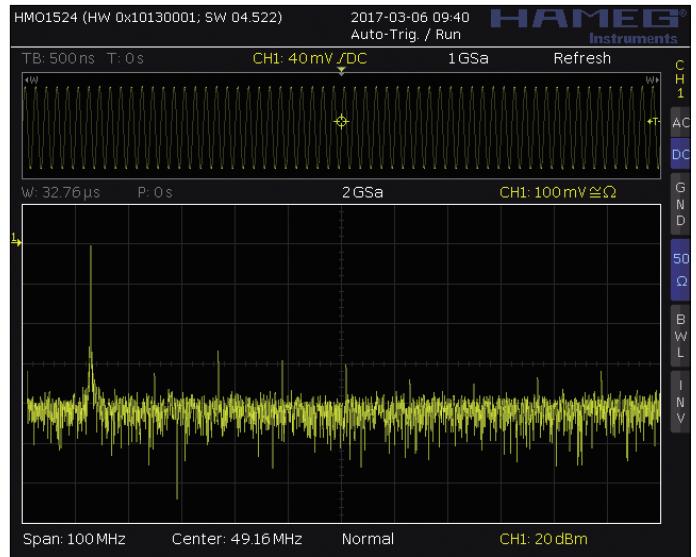


Figure 4. Ce même signal sinusoïdal avec une fenêtre de Hanning.

Les deux figures suivantes permettent d'effectuer une comparaison pour un signal composé de vingt fréquences de 10 à 200 MHz au pas de 10 MHz. La **figure 6** est la réponse d'un véritable AS d'Agilent. La largeur des composantes spectrales du signal à multiples fréquences est définie par « resolution bandwith », qui à son tour agit sur le temps de balayage (pour mettre en évidence une zone de fréquences intéressante).

La **figure 7** montre ce même signal avec le DSO de Hameg. Les fréquences élevées sont certes atténées (à tort), mais pour un oscilloscope à 150 MHz le spectre s'étendant jusqu'à 200 MHz est plutôt bien représenté. La largeur des canaux de fréquences est déterminée par le rapport fréquence d'échantillonnage / nombre d'échantillons. Pour les deux appareils, il est possible de réduire le niveau de bruit en calculant la moyenne de mesures effectuées plusieurs fois.

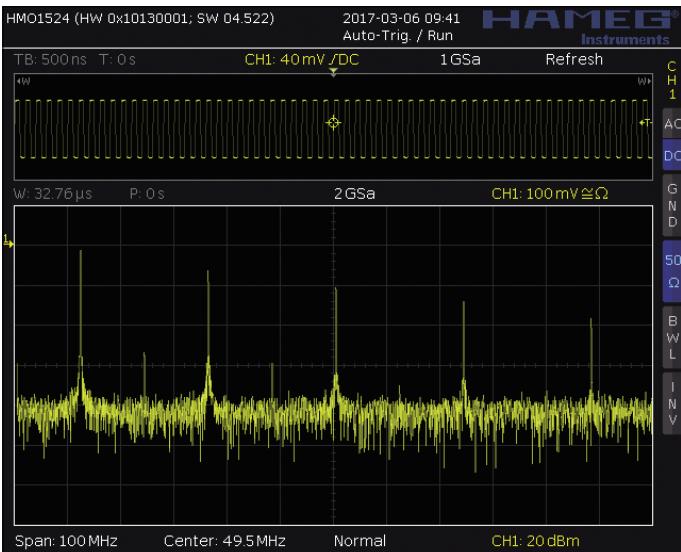


Figure 5. Spectre d'un signal carré avec son contenu harmonique bien connu.

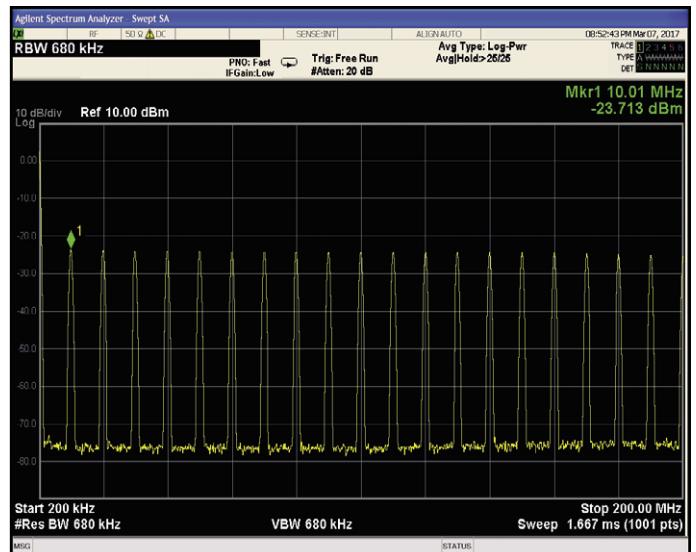


Figure 6. Spectre d'un signal à multiples fréquences, mesuré avec l'analyseur de spectre Agilent N9030 SA.

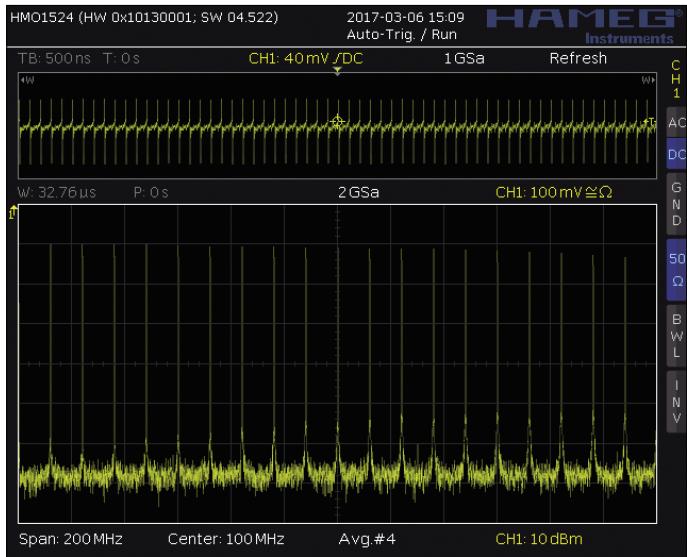


Figure 7. Spectre de ce même signal, mesuré avec le DSO HMO1524.

Selon le théorème d'échantillonnage, le signal d'entrée ne devrait comporter que des fréquences inférieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Cela nous donne 1 GHz pour le DSO à 2 GHz de Hameg. Avec un oscilloscope qui présente une bande passante nominale de 150 MHz, cela ne devrait pas poser de problèmes, car cette bande passante agit quasiment comme un filtre anti-repliement en atténuant plus ou moins fortement les composantes du signal au-delà de 150 MHz. Mais la prudence est de rigueur si l'on s'aventure à réduire la fréquence d'échantillonnage de sorte que des fréquences au-delà de la fréquence de Nyquist parviennent au convertisseur A/N. Ces fréquences apparaissent alors par miroir en deçà de la fréquence de Nyquist, et simulent ainsi des composantes de fréquences qui ne sont pas présentes en réalité dans le signal d'entrée (voir **fig. 8**). Une solution est un filtre approprié d'anti-repliement à l'entrée de l'oscilloscope. Néanmoins, un tel filtre passe-bas réglable est en général très peu présent sur les DSO. Mais la connexion en amont d'un filtre supplémentaire empêche une mesure en haute impédance à l'aide d'une sonde, ce qui constitue bien un avantage de plus du DSO sur l'AS. En pratique : en mode FFT, le bouton « Time/Div » permet le réglage du « span » (gamme de fréquences). La valeur minimale est donnée approximativement par le produit du nombre de canaux affichables par la largeur des canaux. Le bouton « Position » décale le spectre (définit le milieu ou le « Center » de la gamme de fréquences). « dB/Div » se règle à l'aide de « Volts/Div » et le niveau de référence avec le bouton « Position ». Avant de procéder à des mesures sérieuses, il n'est certainement pas inutile de procéder à diverses expériences et de « jouer » avec un signal connu et différents réglages possibles. Ce n'est qu'ainsi que l'on pourra se forger une impression pratique des différentes options et de leurs effets.

Finalement, la **figure 9** représente un extrait du spectre du signal fourni par Unitymedia/KabelBW (opérateur de téléphonie/télévision/internet). On peut voir à gauche un canal de télévision numérique, et à droite un signal vidéo analogique avec sa porteuse couleur et les deux porteuses audio.

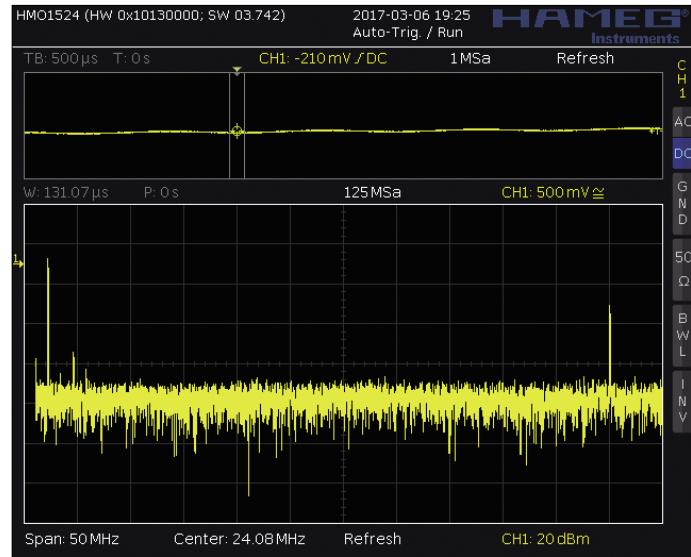


Figure 8. Spectre d'un signal composite à composantes réelles de 1 MHz et 80 MHz avec une fréquence d'échantillonnage de 125 Méch/s. Le signal de 80 MHz apparaît en miroir de la fréquence de Nyquist.

Conclusion

La fonction FFT d'un DSO ne remplace pas complètement un « véritable » AS, car non seulement la bande passante, mais aussi la dynamique restreinte due à une conversion numérique typiquement sur 8 bits limitent la résolution de l'affichage. En revanche, par une utilisation adéquate, il est tout à fait possible d'extraire des informations exploitables du spectre d'un signal. ▶

(160427 – version française : Xavier Pfaff)

Lien

[1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Récepteur_superhétérodyne

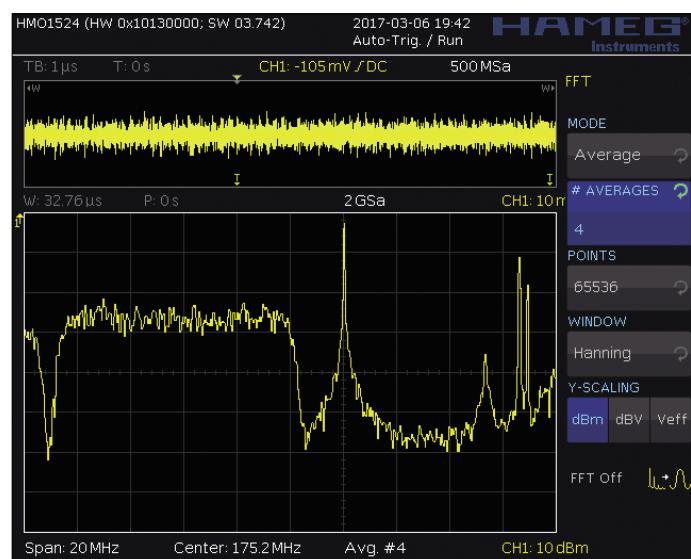


Figure 9. Extrait du spectre du signal de ma connexion au câble.