

# Manip 1 : Ondes EM dans câble coaxial (+ Fabry-Perrot)

Référence : Polycopié de TP - Série 2 - Ondes II

On choisit un câble le plus long possible, entre 20 et 100 mètres car :

- la résolution temporelle des oscilloscopes est limitée
- permet aussi, malgré des capacité et inductance linéiques faibles, d'atteindre des capacité et inductance totales raisonnablement mesurables.

**Attention** : il faut lier le GBF et l'oscillo par un câble pour faire le trigger. Il y a une place exprès pour cela derrière les 2 machines. Par bouton "Trigger" dans oscillo, choisir "source externe" et dans GBF il faut faire quelques étapes aussi pour dire d'envoyer le trigger à l'extérieur. Pour l'oscillo, on peut aussi relier le trigger devant à l'entrée 1 et dire au "Trigger" de choisir source 1. Et c'est ce qu'on a fait.

## Protocole 1 : Caractéristiques du câble

- Par **LCR-mètre** j'utilise **100Hz** car par la grande longueur du câble on sort de l'ARQS si on a des grandes fréquences.
- On branche le coaxial au LCR-mètre par un BNC-banane mais ceci ajoute une longueur au câble (+1m) en plus de connexions mal maîtrisées. Donc à la place on utilise un **connecteur coaxial/double bananes**.
- On mesure la **capacité en circuit ouvert** (une extrémité du câble libre, l'autre reliée au LCR-mètre).

On mesure là la **capacité totale du câble (+ le raccord au LCR-mètre + connexions, etc.)**. La **capacité linéique** s'obtient en divisant cette quantité par la longueur.

- On mesure l'**inductance** en court-circuit (relier l'âme à la gaine par un cavalier au niveau de l'extrémité du câble non branchée au LCR-mètre).

On mesure là l'**inductance totale du câble (+ le raccord au LCR-mètre + connexions, etc.)**. L'**inductance linéique** s'obtient en divisant cette quantité par la longueur.

On calcul l'**impédance** d'une onde électrique linéaire progressive par :  $Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$

avec  $L_0, C_0$  des **valeurs linéiques**. La valeur attendue est  $50\Omega$ .

Certains câbles utilisés pour la vidéo ont une impédance caractéristique de  $75\Omega$

- J'obtiens  $L=0.034\text{mH}$  et  $C=10.27\text{nF}$  donc  $Z=57\Omega$ .

**Attention** : Cette mesure simple peut donner des valeurs significativement différentes de celles annoncées par le constructeur sans que l'on soit tout à fait capable d'en quantifier l'erreur. Les méthodes de mesure de l'impédance du câble présentées ci-après sont plus précises et permettent de trouver des valeurs plus fiables.

L'impédance caractéristique d'un milieu est, avec la célérité  $c$ , un élément majeur de la théorie des ondes progressives linéaires puisqu'elle quantifie précisément le rapport entre les grandeurs couplées (ici  $u$  et  $i$ , mais parfois  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ , ou  $\vec{v}$  et la pression). À l'interface entre deux milieux d'impédance différente ce rapport entre  $u$  et  $i$  doit prendre une autre valeur et par continuité cela impose l'existence d'une onde réfléchie.

## Protocole 2 : Propagation d'un pulse

Là on branche 2 câbles : un petit (50cm) et un long (100m) du GBF (par un T) vers oscillo (Voie1 et Voie2). **On ne met pas la résistance  $1k\Omega$**  au bout du câble 100m.

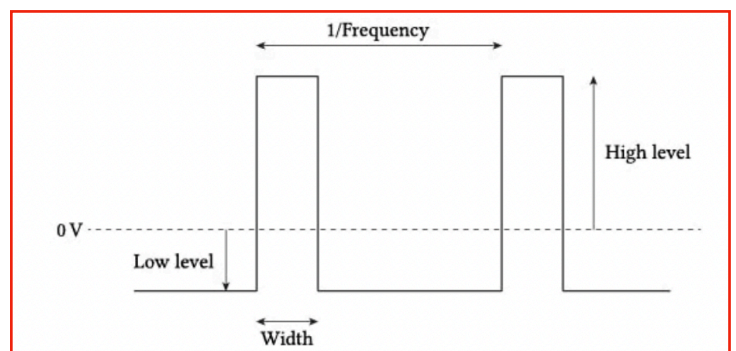
- Pour **le pulse**, il faut que  $L \text{ câble} / c$  ( $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) soit  $<$  temps caractéristique donc temps du pulse doit être  $< \mu s$ . Donc je choisis une largeur pulse **(width) de 200ns**. Pour la **fréquence**, peu importe donc là je choisis **5kHz** car c'est joli. Pour l'**amplitude** je choisis **5V** (ça change rien). Il faut choisir un **LowLevel de 0V**.

### Explication :

- Le **GBF envoie 5V** vers le petit câble (50cm) et le long (100m) donc **chacun aura 2.5V** (le T est équivalent à un pont diviseur de tension).
- Dans **le petit câble** (50cm) l'onde prend 2.5ns (car  $c=2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) alors le signal est lent (largeur pulse = 200ns) par rapport au temps de propagation donc on **est en ARQS** ( $\tau_{\text{signal}} \gg \frac{L}{c}$ )
- En ARQS il n'y a pas de propagation d'onde donc dans le petit câble et ainsi l'oscillo ils voient la tension directement qui est la moitié de celle envoyée par le GBF (c'est comme si l'information allait instantanément partout) = **1er pulse affiché (2.5V)**
- En plus il n'y a pas de réflexion à l'arrivée à l'oscillo (car en ARQS pas de propagation donc pas de réflexion) donc juste un seul pulse affiché.
- Si on branche juste le petit câble seul donc on a les 5V. Si on branche T dans le GBF avec juste une **sortie vide de résistance  $50\Omega$**  (à la place du câble 100m) on voit 1 pulse 2.5V. Car là le courant il voit une voie vers l'oscillo (en ARQS) et une autre avec une résistance  $50\Omega$  et c'est le même comportement qu'il aura en remplaçant cette sortie vide par le câble 100m de résistance  $50\Omega$ .
- Le **long câble n'est pas en ARQS** donc il y a une onde se propage. L'onde incidente arrive à l'oscillo de résistance  **$1M\Omega$  donc réfléchit**. Au point de réflexion, il y a 2 ondes donc l'**amplitude est doublée = 2e pulse** (je trouve 4.8V). Ce 2e pulse est affiché avec une déformation due à l'atténuation par la propagation dans les 100m.
- Cette **déformation** est au début du pulse (en haut) et à toute fin (en bas) donc dans les endroits de changements brutaux (liés aux hautes fréquences). Car le coaxial n'est pas parfait et agit comme **un filtre passe bas** donc coupe les hautes fréquences.

Le coaxial a donc une  $R$  qui augmente avec la fréquence. L'isolant diélectrique n'est pas parfait non plus.

- L'**onde réfléchie** revient au GBF (d'entrée  $50\Omega$ ) donc elle est absorbée par ce GBF. Mais vu que le petit câble est très rapide (en ARQS) donc il voit dans le T une nouvelle tension (celle de l'onde réfléchie) et affiche donc le **3e pulse** (avec moitié de l'amplitude et déformation du signal liée au 100m).



**Le coefficient de réflexion** en tension à l'extrémité d'un câble long se terminant sur une résistance  $R_f$  :  $r = \frac{R_f - Z}{R_f + Z}$  alors si :

- $R_f \gg Z$  : le signal est complètement réfléchi, avec une amplitude réfléchie identique à l'amplitude incidente. On observera à l'endroit de la réflexion la somme des pulses reçu et réfléchi et donc une tension deux fois plus grande que le pulse reçu. Cette situation se passe en circuit ouvert ( $R_f \rightarrow \infty$ ) ou avec un oscilloscope ( $R_f \sim M\Omega$ ).
- $R_f \ll Z$  : Le signal est complètement réfléchi, avec une amplitude réfléchie opposée à l'amplitude incidente. On observera à l'endroit de la réflexion la somme des pulses reçu et réfléchi et donc une tension nulle. Cette situation arrive quand l'extrémité du câble est en court-circuit (cas où  $R=0$ )
- $R = Z$  : le signal est complètement transmis (et dissipé dans la résistance). D'un point de vue électrique, il n'y a aucune différence entre envoyer une onde dans un câble coaxial de longueur infini ou dans une simple résistance de valeur  $50 \Omega$

### Mesure quantitative (vitesse de groupe) :

- J'ai 3 pulses sur l'oscillo. Par le curseurs on mesure temps au début de chaque pulse (puisque à cet endroit la variation du signal est verticale et peut être bien repérée). On peut faire 3 mesures ( entre 1-2 [100m] / entre 2-3 [100m] / entre 1-3 [200m] )
- Je mesure 510ns entre les 1er 2 pulse, et 1020ns entre 1er et 3e.
- Donc  $v = 100\text{m} / 510\text{ns} = 1.96 \times 10^8 \text{ m/s}$

- On compare par les valeurs du câbles :  $v = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}}$  avec  $L_0, C_0$  les valeurs linéiques

donc on divise chacun par 100m (longueur du câble) alors  $v = 1.69 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Il faut regarder les incertitudes du LCR-mètre car elles sont énormes.

**Attention :** La vitesse du pulse que nous avons mesurée est une vitesse de groupe

Le protocole adéquat aurait été de repérer à tout instant le centre du paquet d'onde, ce qui n'est pas réalisable ici. Mais la mesure est quand même valide dans la mesure où la propagation n'est pas dispersive : toutes les composantes du paquet d'onde se propagent à la même vitesse et il n'est pas déformé (à part l'atténuation des hautes freq). Ainsi, quel que soit le point pris pour référence il se propage bien à la vitesse  $v_g$

- On peut aussi mesurer la constante diélectrique de l'isolant  $\epsilon_r$  situé entre les deux conducteurs du câble coaxial (sachant que  $\mu_r = 1$  car c'est un matériau non magnétique) :  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$  avec  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

### Selon le Handbook :

$\epsilon_r = 2, 3$  pour le polyéthylène (1kHz, 23°C) et le poly propylène (1kHz, 25°C)

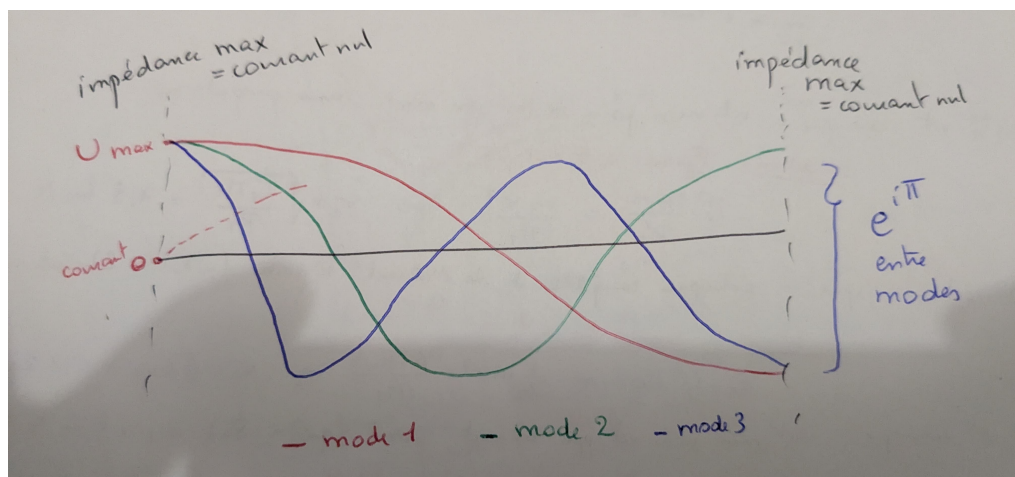
### Protocole 3 : Fabry-Perrot + Sweep (Balayage en fréquence)

Là on branche le câble 100m avec une **résistance 1kΩ** à la sortie GBF

**Attention :** Il faut utiliser un autre câble, court, entre le GBF et la résistance

- Avec la résistance 1kΩ on permet à l'onde de rentrer dans la cavité tout en gardant un facteur de réflexion important. Donc peu de signal rentre dans le long câble de 100m. Puis réfléchi à l'oscillo (1MΩ) et reste confiné entre ces 2 résistances. A chaque fois il y a une petite fuite à 1kΩ (comme dans un vrai laser).
- On travaille ici avec des fréquences de l'ordre de MHz.
- **En théorie, le 1er mode se trouve à 930 kHz pour un câble de 100m.**
- On prend plusieurs valeurs de fréquences pour différents mode (on peut atteindre 10).
- On voit que la phase change 1 fois sur 2 (voir schéma explication) donc c'est un indicateur des modes.
- On cherche les modes par la résonance donc on affiche "mesure max" par exemple et on "zoom" pour surveiller le déphasage.

On voit les amplitudes des modes diminuer à grandes fréquences et c'est probablement car la résistance dans le câble coaxial lui même augmente à grande fréquence donc le signal diminue.



#### **Wobulation :**

- On peut aussi faire un **sweep** (balayage en fréquence) à **intervalle de 2s de 100kHz à 20MHz** par exemple et voir tous les modes.
- Le 1er pic n'est pas un mode c'est juste la queue (la fin) d'un pic du signal continu (donc à fréquence nulle). On peut zoomer et on verra ça. On peut le voir si on fait sweep de 10Hz à 10MHz donc on verra mieux ce signal continu (car on se rapproche du zéro). C'est comme si on prend le mode  $n=0$  donc  $f=0$  donc mode continu (sans oscillations). **On commence à compter les modes à partir du pic d'après.**
- On détermine par le curseurs le  $t$  aux positions des pics (en ms et on transforme en s) puis sur QtiPlot on détermine la fréquence par :

$$f = \frac{20MHz - 100kHz}{2s} t[s] + 100kHz$$

Par  $L = n \frac{\lambda}{2}$  on a :  $f = \frac{nc}{2L}$  donc  $f(n)$  nous donne  $c = v_\phi$

- On trouve vitesse de phase par ajustement. Si c'est une constante donc elle ne dépend pas de la fréquence (ni de la pulsation  $k$ ) donc onde pas dispersive. On vérifie que cette vitesse de phase est la même que la vitesse de groupe qu'on a trouvé avant.

### Pour trouver les fréquences du mode :

1. soit on utilise curseur
2. soit mode XY
3. soit par le sweep on change freq initiale et finale et se mettre autour d'un pic d'un mode pour "zoomer" ce mode et plus on zoom plus on aura sa fréquence précise

### Je trouve

1er mode :  $935 \pm 5$  kHz / 2e :  $1890 \pm 5$  kHz / 3e :  $2868 \pm 8$  kHz / 4e :  $3845 \pm 7$  kHz /

5e :  $4813 \pm 8$  kHz / 6e :  $5795 \pm 8$  kHz / 7e :  $6777 \pm 10$  kHz

### Pourquoi le 2e protocole nous donne $v_g$ et le 3e $v_\phi$ ?

1. La vitesse de phase  $v_\phi = \frac{\omega}{k}$  est la vitesse à laquelle se déplace une surface de phase

constante d'une onde sinusoïdale pure  $\sin(kx - \omega t)$ . Donc :

- la vitesse de propagation d'une sinusoïde "idéale"
- Elle ne transporte pas d'énergie, juste la forme d'onde
- C'est ce qu'on mesure dans les résonateurs (ondes stationnaires)

2. La vitesse de groupe  $v_g = \frac{d\omega}{dk}$  est la vitesse de propagation de l'enveloppe d'un

signal modulé, comme un pulse (superposition de plusieurs sinusoïdes). Donc :

- Elle donne la vitesse à laquelle l'information ou l'énergie se propage
- C'est ce qu'on mesure quand on envoie un pulse dans un câble et qu'on observe le temps de vol.

Car un pulse est une superposition d'un grand nombre de fréquences (fourier). Chaque composante sinusoïdale a une fréquence  $\omega$  / un vecteur d'onde  $k$  / une vitesse de phase propre  $v_\phi$ . Mais c'est l'enveloppe globale du pulse (interférence constructive de toutes les composantes) qui se déplace à la vitesse de groupe  $v_g$ .

3. Dans un câble coaxial faiblement dispersif, comme ceux en TP :  $v_\phi \approx v_g$

Si le câble est dispersif donc les différentes fréquences se propagent à des vitesses différentes, ce qui déforme les signaux (l'information).

Effets responsables de la dispersion :

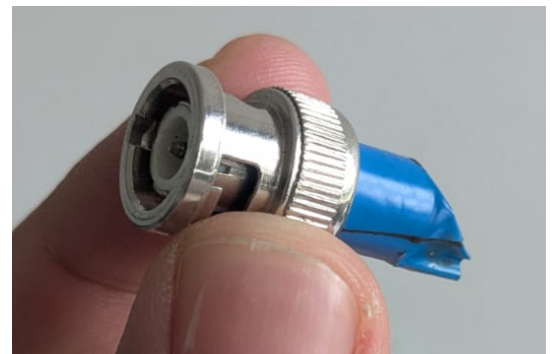
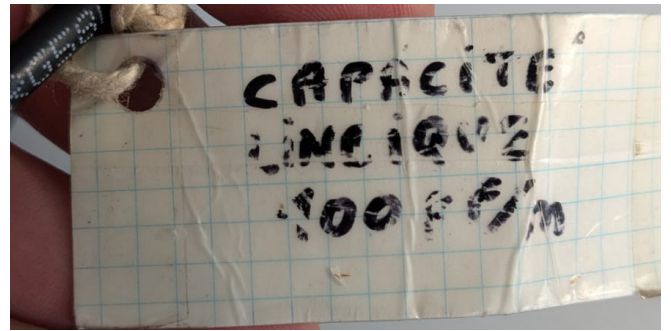
- Effet de peau : l'impédance du conducteur varie avec la fréquence donc  $L$  change
- Diélectrique réel :  $\epsilon_r$  dépend de la fréquence donc  $C$  change
- Structure non idéale : géométrie légèrement imparfaite, effet de surface

Puisque  $L$  et  $C$  changent avec la fréquence donc la vitesse aussi change.

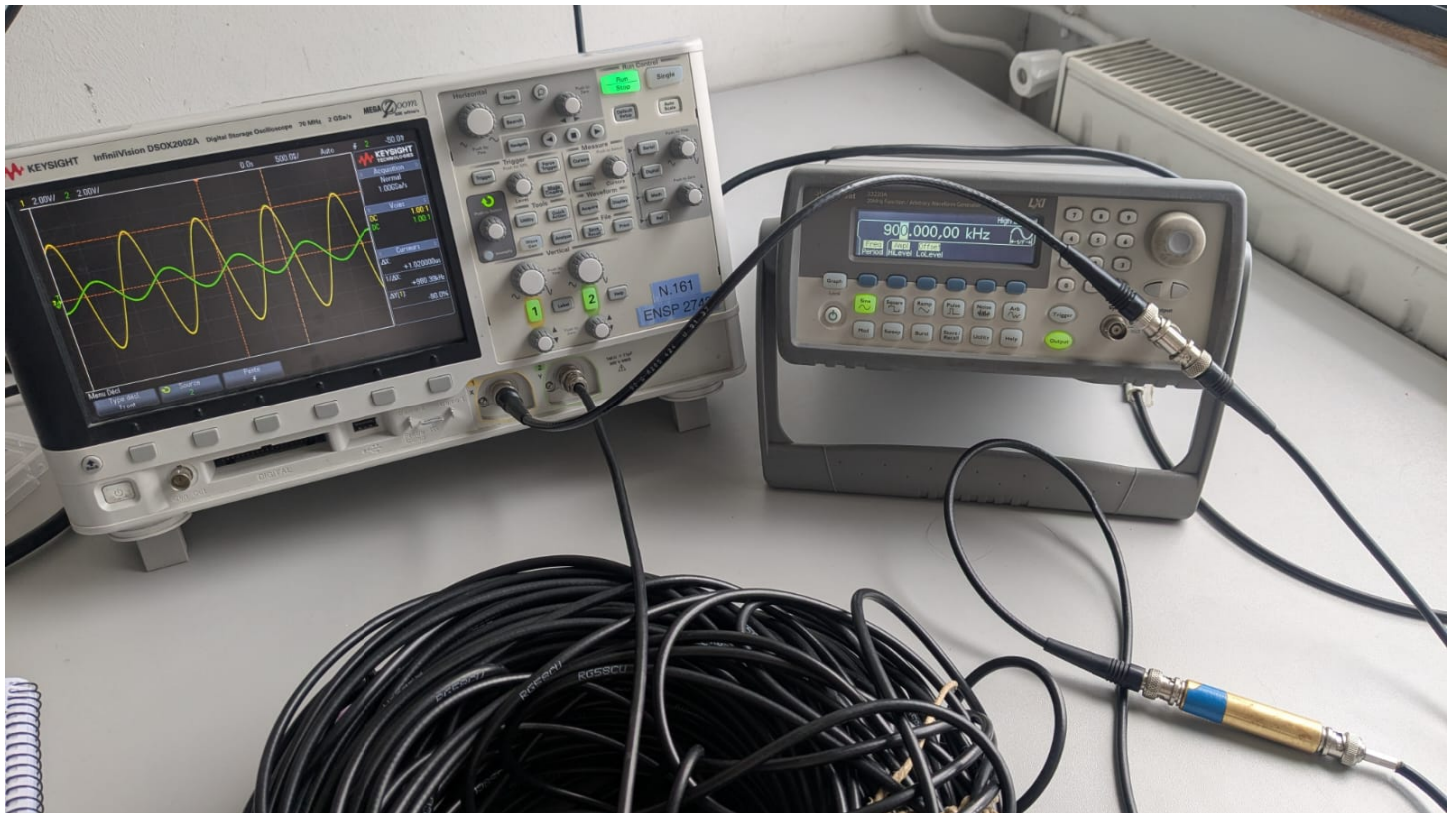
En pratique pour savoir si le câble est dispersif ou pas, on envoie un pulse et on mesure la réponse impulsionnelle. Si le pulse devient étalé donc il y a dispersion.



## Caractéristiques du câble

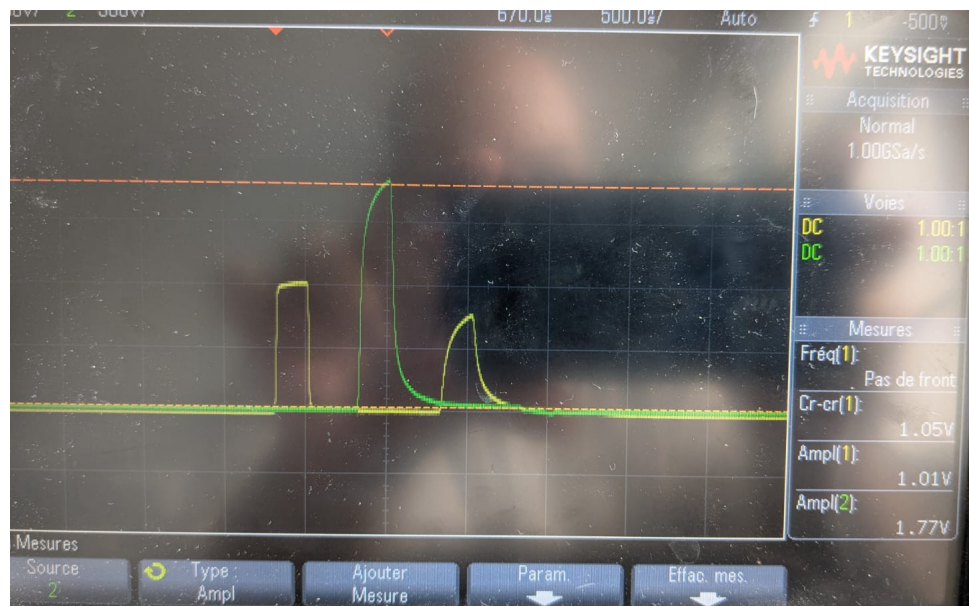
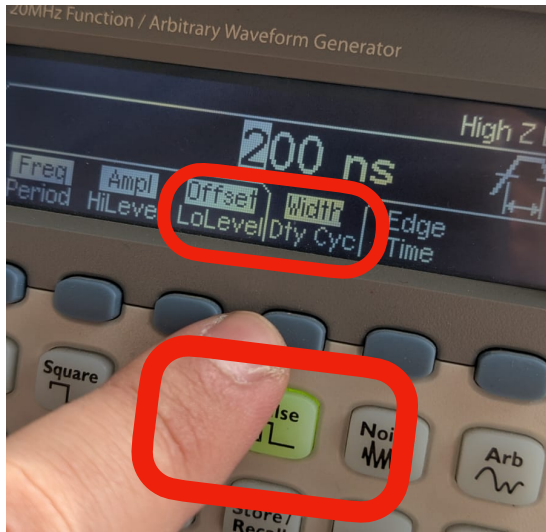


**La sortie vide  
À  $50\ \Omega$**





## Le Pulse



## Le Sweep



**1er pic = signal continu**

