

# Modulation

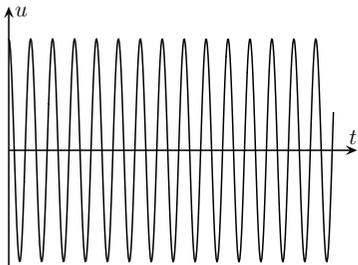
L'objectif de ce TP est de mettre en œuvre diverses techniques de modulation et démodulation de tension pour en étudier certaines limites et caractéristiques.

Ce TP s'appuie principalement sur le travail effectué lors des chapitres §ELCT6 Filtres et §ELCT7 Circuits non linéaires. Les relations notées (\*) sont celles qu'il faut savoir retrouver et les heures mentionnées sont données à titre purement indicatif de façon à permettre l'évaluation de l'importance relative des différentes parties.

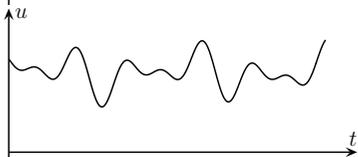
## I) Modulation d'amplitude

### 1°) Qu'est-ce qu'une modulation d'amplitude? ⌚

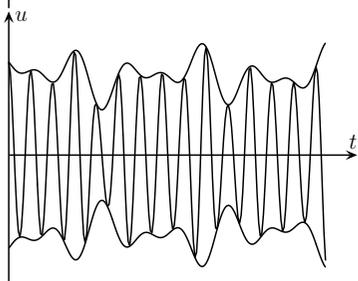
#### i. réponse en termes temporels



Le signal qui va être modulé s'appelle la *porteuse*. Il s'agit d'un signal sinusoïdal de pulsation  $\omega_0$ , d'amplitude constante et de valeur moyenne nulle.



Le signal intéressant est appelée la *modulante* ou la *modulante*.



Le signal modulé est un signal sinusoïdal de pulsation  $\omega_0$  et dont l'amplitude correspond à la modulante.

#### ii. en termes analytiques

Si la porteuse s'écrit  $\lambda \cos(\omega_0 t)$  et la modulante  $V(t)$ , alors la modulation d'amplitude correspond à la réalisation du signal  $v(t) = \lambda V(t) \cos(\omega_0 t)$ .

Nous nous limiterons dans ce TP à l'étude d'une modulante sinusoïdale de pulsation  $\omega'$ .

Le signal peut alors s'écrire sous la forme  $v(t) = A [1 + m \cos(\omega' t)] \cos(\omega_0 t)$ , où  $m$  est ce qu'on appelle le taux de modulation, qui doit être tel que  $0 < m \leq 1$  pour avoir, en toutes circonstances,  $A [1 + m \cos(\omega' t)] \geq 0$ .

#### iii. en termes fréquentiels

Nous pouvons écrire  $\frac{v(t)}{A} = \frac{m}{2} \cos[(\omega_0 - \omega') t] + \cos(\omega_0 t) + \frac{m}{2} \cos[(\omega_0 + \omega') t]$ .

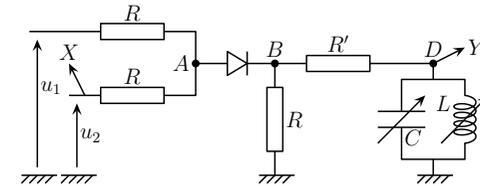
Ainsi une porteuse modulée en amplitude à la pulsation  $\omega'$  correspond, en termes fréquentiels, à 3 pics :  $\omega_0 - \omega'$ ,  $\omega_0$  et  $\omega_0 + \omega'$ .

Nous veillerons donc à avoir, en toutes circonstance,  $\omega' < \omega_0$  pour éviter tout « repliement de spectre ».

Si la porteuse est modulée par un signal complexe (*ie.* qui n'est pas sinusoïdal pur), dont le spectre a pour pulsation maximale  $\omega_{\max}$ , alors le spectre du signal modulé occupe toute la bande fréquentielle (*ie.* a des pics) comprise entre  $\omega_0 - \omega_{\max}$  et  $\omega_0 + \omega_{\max}$ .

### 2°) Modulation par une diode ⌚

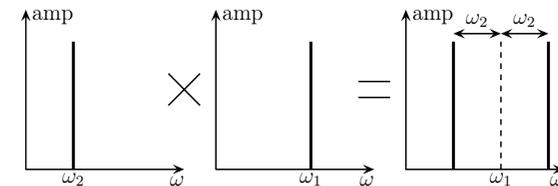
#### i. circuit



#### ii. principe de fonctionnement

##### ► Préliminaire

Comme  $\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \frac{\cos[(\omega_1 - \omega_2) t] + \cos[(\omega_1 + \omega_2) t]}{2}$ , lorsque deux signaux de pulsation  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont multipliés entre eux, il apparaît deux pulsations  $(\omega_1 - \omega_2)$  et  $(\omega_1 + \omega_2)$ .



##### ► Rôle de la diode

La somme  $u_1 + u_2$  est envoyée à l'entrée de la diode. Comme celle-ci a un comportement non linéaire, nous allons écrire le signal de sortie en ne se limitant plus au premier terme du développement de Taylor :

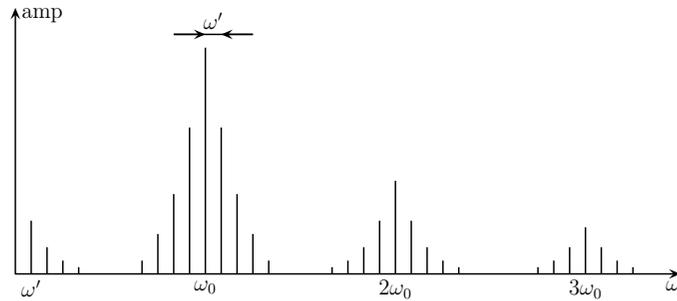
$$s(t) = \underbrace{a(u_1 + u_2)}_I + \underbrace{b(u_1 + u_2)^2}_{II} + \underbrace{c(u_1 + u_2)^3}_{III} + \dots$$

Le signal correspond donc à des pulsations :

→ terme I :  $\omega_0$  et  $\omega'$

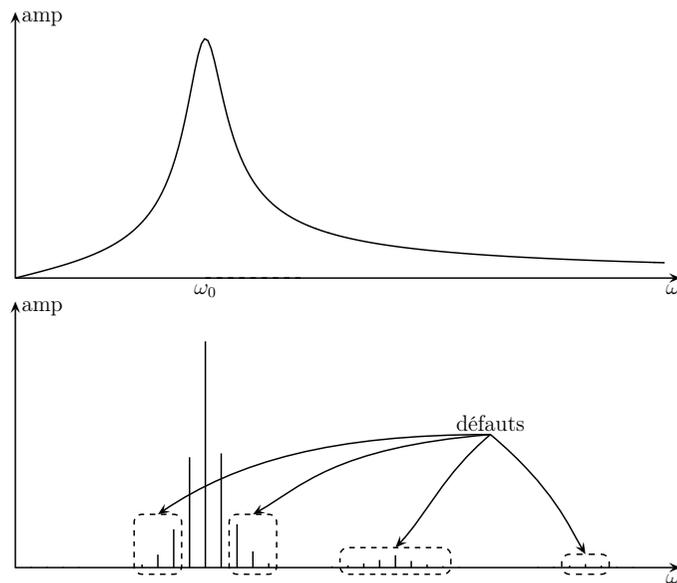
- terme II ( $u_1^2 + u_2^2 + 2u_1u_2$ ) :  $2\omega_0, 2\omega', \omega_0 - \omega', \omega_0 + \omega'$
- terme III ( $u_1^3 + 3u_1^2u_2 + 3u_1u_2^2 + u_2^3$ ) :  $3\omega_0, 2\omega_0 - \omega', 2\omega_0 + \omega', \omega_0 - 2\omega', \omega_0 + 2\omega', 3\omega'$
- ...

Nous voyons finalement qu'il apparaît toutes les pulsations du type  $n\omega_0 \pm k\omega'$ . Comme nous plaçons dans le cas  $\omega' \ll \omega_0$ , il n'y a pas recouvrement des différentes séries de pics et le spectre du signal à la sortie de la diode est de la forme suivante.



### ► Rôle du filtre

Le circuit  $LC$  est un circuit passe bande centré sur  $\omega_0$  permettant de sélectionner uniquement la partie intéressante du spectre pour la modulation, à savoir les trois pics  $\omega_0 - \omega'$ ,  $\omega_0$  et  $\omega_0 + \omega'$ .



La qualité de la modulation est ici directement liée à la qualité du filtre passe-bande dont la bande passante doit être idéalement de  $2(\omega_0 - \omega')$  de telle sorte que les 2 pics latéraux intéressants soient en limite de zone.

### 3°) Étude ☺

#### i. montage

Choisissons des valeurs telles que  $LC\omega_0^2 = 1$ , ce qui permet de faire en sorte que la porteuse soit au centre de la bande-passante du filtre.

- Réglez les tensions d'entrée telles que  $u_1(\sin; 10 \text{ kHz}; 10,0 \text{ V})$  et  $u_2(\sin; 1,0 \text{ kHz}; 1,0 \text{ V}; 2,0 \text{ V})^1$ .
- Réalisez le circuit présenté avec une diode germanium (diode rapide) et avec  $R = 1,0 \text{ k}\Omega$ ;  $R' = 10 \text{ k}\Omega$ ;  $L = 0,2 \text{ H}$ ;  $C = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ .

#### ii. taux de modulation

- Affichez sur l'écran la modulante ainsi que le signal modulé. Imprimez l'écran.
- ! ? Pourquoi le signal modulant n'est pas une sinusoïde pure ?



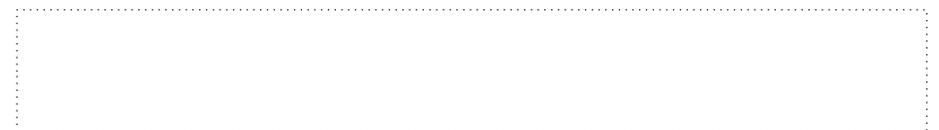
- Augmentez l'amplitude de  $u_2$  (modulante) de telle sorte que  $u_2(t)$  soit parfois négative et observez les conséquences sur le signal modulé. On appelle ce phénomène la surmodulation.
- Imprimez l'écran de l'oscilloscope lorsqu'il y a surmodulation.

#### iii. sélectionner la modulation

- Réglez la modulante avec les paramètres initiaux de telle sorte qu'il n'y ait pas de surmodulation.
- Affichez et imprimez le spectre du potentiel au point  $B$  (après la diode et en entrée du filtre) et commentez.



- Affichez et imprimez le spectre de la voie  $Y$  (signal modulé).
- Modifiez la valeur de  $C$  et observez les conséquences sur le signal modulé et commentez.



## II) Démodulation d'amplitude

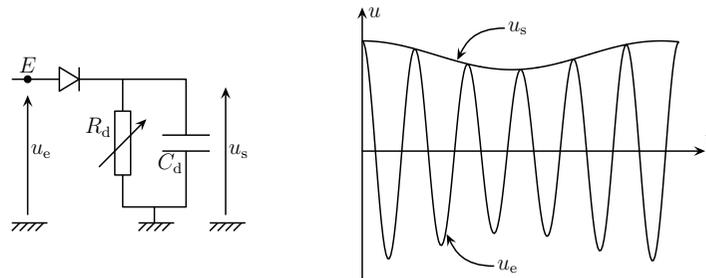
### 1°) L'objectif est simple

La démodulation consiste, à partir d'un signal modulé  $AV(t) \cos(\omega_0 t)$  d'obtenir la modulante  $kV(t)$  à un facteur multiplicatif inintéressant près.

<sup>1</sup>On rappelle que l'on note (forme; fréquence; amplitude; offset) la tension de sortie à régler pour un GBF.

## 2°) Détecteur de crête

### i. montage



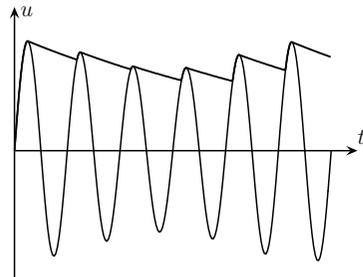
Le montage ci-dessus donne, en sortie, l'enveloppe du signal d'entrée (cf. représentation ci-dessus).

### ii. comment ça marche ?

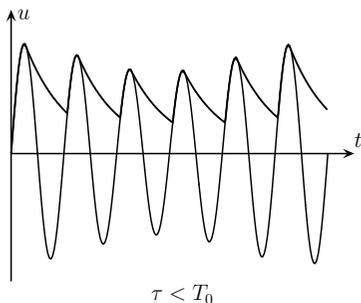
Lorsque la diode est passante, le condensateur se charge et  $u_s(t) = u_e(t)$ .

Lorsque la diode est bloquée, le condensateur se décharge exponentiellement dans la résistance avec une constante de temps  $\tau = R_d C_d$ .

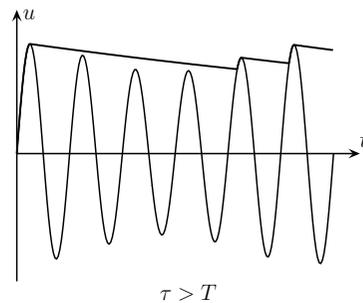
Nous avons donc, en fait, l'évolution représentée ci-dessous.



Pour que la détection se fasse correctement, il faut que  $T_0 \ll \tau \ll T'$  où  $T_0$  est la période de la porteuse et  $T'$  celle de la modulante.



$\tau < T_0$   
Le condensateur se décharge significativement entre chaque période de la porteuse.



$\tau > T_0$   
La décharge du condensateur n'est pas suffisante pour suivre les évolutions de la modulante.

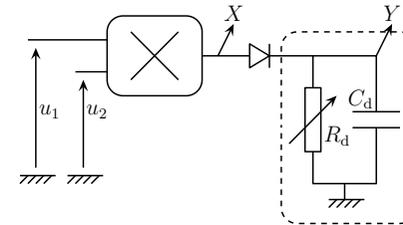
Il faudra veiller à respecter  $\tau \geq 10 T_0$  et  $T \geq 10 \tau$  soit  $T \geq 100 T_0$ , ie.  $\omega' \leq \frac{\omega_0}{100}$ .

De plus, comme la diode n'est pas idéale, il faut aussi veiller à ce que l'enveloppe à détecter soit toujours supérieure à la tension de seuil de la diode soit typiquement 0,8 V. Le principe de précaution nous impose donc de veiller à avoir  $u_e(t) \geq 1$  V.

## 3°) Démodulons

### i. réalisation de la chaîne

Court-circuitons les étapes de transmission et de réception pour se concentrer sur la démodulation. C'est pourquoi nous allons améliorer la partie modulation de la chaîne en utilisant un multiplicateur analogique. En effet, avec  $k V(t)$  la modulante et  $\alpha \cos(\omega_0 t)$  la porteuse, le simple produit des deux permet d'obtenir le signal modulé et de cette manière, la modulation n'introduit pas de distorsion.



→ Réalisez le montage ci-dessus avec  $u_1(\sin; 10 \text{ kHz}; 10,0 \text{ V})$ ;  $u_2(\sin; 100 \text{ Hz}; 1,0 \text{ V}; 2,0 \text{ V})$ ;  $R_d = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C_d = 100 \text{ nF}$ .

→ Affichez et imprimez le spectre de la voie X en modifiant la fréquence de la modulante pour pouvoir discerner tous les pics. Commentez.



→ Affichez en voie X le signal modulé et en voie Y le signal démodulé en reprenant les réglages initiaux pour la modulante.

### ii. un temps caractéristique à adapter

→ Modifiez la valeur de  $R_d$  afin d'observer les conséquences d'une constante  $\tau$  inadaptée et imprimez les résultats.

### iii. qualité de la chaîne

→ Comparez la modulante avec le signal démodulé. Pour cela, affichez la modulante sur la voie X et le signal démodulé sur la voie Y.

Dans le cas d'une chaîne idéale modulation - démodulation nous avons  $u_s(t) = \lambda u_e(t)$  ce qui donne, en mode XY une une droite si les signaux sont en phase et une ellipse si les signaux sont déphasés (suite à une émission - transmission - réception par exemple). Nous pouvons aussi vérifier la linéarité du montage en affichant le spectre de Y sur lequel il ne doit y avoir qu'un seul pic significatif à la pulsation de la modulante.

→ Augmentez l'amplitude de la modulante en vérifiant qu'il n'y ait jamais surmodulation et expliquez l'origine des éventuels défauts apparus.

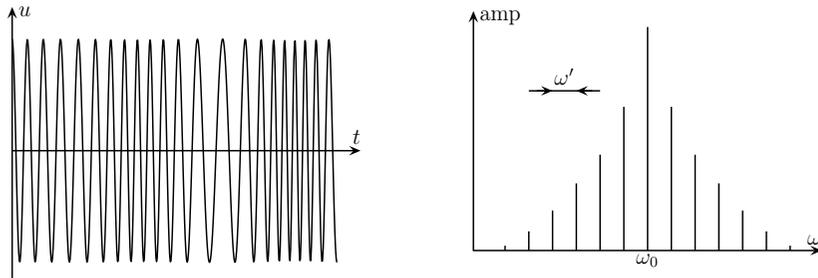
### III) Démodulation de fréquence

#### 1°) Modulation de fréquence

i. qu'est-ce que c'est ?

► **En termes temporels**

Le signal modulé est cette fois-ci d'amplitude constante mais de fréquence variable.



► **En termes analytiques**

Une porteuse  $a \cos(\omega_0 t)$  modulée par la modulante  $\lambda \cos(\omega' t)$  correspond à la fabrication du signal  $v(t) = a \cos([\omega_0 + \lambda \cos(\omega' t)]t)$ , i.e. lorsque la pulsation est une fonction du temps :

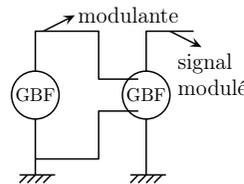
$$\omega(t) = \omega_0 + \lambda \cos(\omega' t).$$

► **En termes fréquentiels**

Un signal de pulsation  $\omega_0$  modulé par un signal de pulsation  $\omega'$  correspond à un pic central à la pulsation  $\omega_0$  avec de part et d'autre des pics séparés par des intervalles de pulsation  $\omega'$  (cf. figure ci-dessus).

ii. comment la réaliser ?

L'entrée wobulation d'un GBF permet de commander la fréquence par une tension. Sur certains GBF, il existe quelques fois une fonction qui permet d'obtenir un signal de sortie modulé en fréquence mais cela présente, dans notre cas, l'inconvénient de ne pas pouvoir choisir la forme du signal modulant.



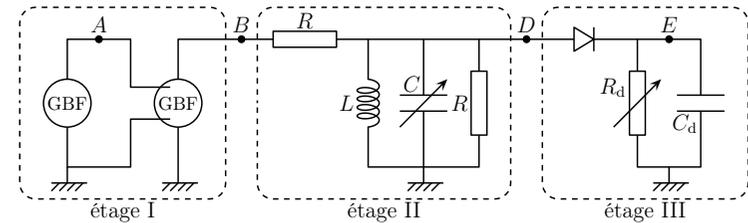
L'entrée wobulation est généralement située derrière les GBF et notée SWEEP INPUT. Notons que suivant le modèle du GBF, il peut être nécessaire de respecter certaines conditions sur la tension de wobulation (toujours négative, par exemple).

- Réglez un GBF pour qu'il délivre une tension constante d'environ 2,0 V et reliez le à l'entrée SWEEP INPUT du GBF qui subira la modulation de fréquence.
- Faites varier la tension du GBF modulant et déterminez la plage de fréquence que cela engendre.

tension du GBF1					
fréquence du GBF2					

#### 2°) Démodulation de fréquence

i. circuit

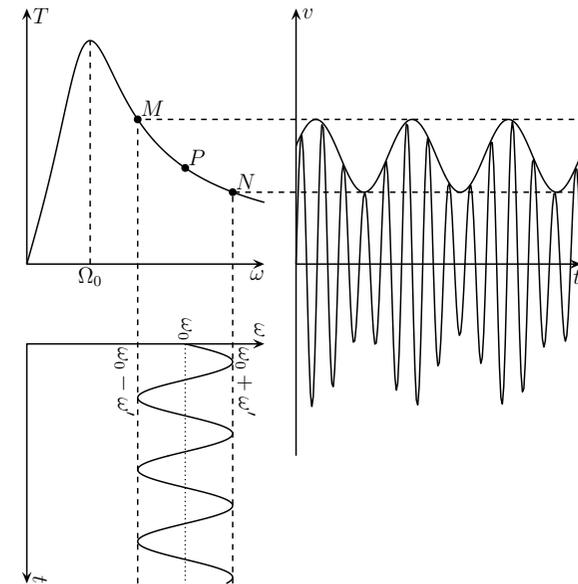


ii. le principe : refaire ce que l'on sait déjà faire

Les trois étages correspondent aux fonctions suivantes :

- I : fabrication du signal modulé en fréquence ;
- II : transformation d'une modulation de fréquence en modulation d'amplitude ;
- III : démodulation d'amplitude par détecteur de crête.

L'étage II est un circuit résonant (passe-bande) dont le principe de fonctionnement peut être schématisé par les graphiques ci-dessous.



Pour que la chaîne soit de bonne qualité, on voit qu'il faut que la partie MN de la courbe de réponse du circuit résonant soit quasi linéaire. Cela signifie que la pulsation  $\omega_0$  de la porteuse n'est pas la pulsation propre  $\Omega_0$  du circuit résonant.

### 3°) Étude de la chaîne modulation – démodulation

#### i. montage ☺

- Réalisez le montage proposé avec  $R = 1,0 \text{ k}\Omega$  (ou  $R = 2,2 \text{ k}\Omega$ );  $L = 0,2 \text{ H}$ ;  $C = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ ;  $R_d = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C_d = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ F}$ . On utilisera dans un premier temps une porteuse de fréquence  $10 \text{ kHz}$ .

#### ii. protocole de réglage ☺

##### ► Étape 1 : régler la pulsation de la porteuse

Le but est ici de déterminer les fréquences auxquelles doivent se situer les points  $M$  et  $N$  décrits ci-dessus. Pour cela nous allons « étudier » rapidement le filtre de manière à repérer le pic central et la bande-passante.

- Utilisez un signal non modulé, *ie.* débranchez le GBF wobulant et l'étage III.
- Visualisez  $v_D(t)$  (sortie de l'étage II).
- Envoyez la porteuse à l'entrée de l'étage II.
- Repérez la valeur **expérimentale**  $\Omega_0$  à laquelle l'amplification en tension est maximale et déterminez numériquement  $T_{\max}$ .

$$\left[ \begin{array}{l} \text{---} \\ \Omega_0 = \qquad \qquad \qquad T_{\max} = \\ \text{---} \end{array} \right]$$

- Augmentez la pulsation  $\omega_0$  du GBF<sup>2</sup> de telle sorte que l'on ait, en sortie,  $T(\omega_0) = \frac{T_{\max}}{\sqrt{2}}$  où  $T$  est l'amplification en amplitude (repérage du point  $P$  sur le graphique précédent).

$$\left[ \begin{array}{l} \text{---} \\ \omega_0 = \\ \text{---} \end{array} \right]$$



**La porteuse est réglée : ne modifiez plus la ni la pulsation  $\omega_0$  ni les valeurs de  $L$  et  $C$ .**

##### ► Étape 2 : régler l'excursion en pulsation

Le but va être de rechercher quelles tensions le GBF modulant doit délivrer de telle sorte que les fréquences du GBF modulé varient entre les points  $M$  et  $N$  du graphique ci-dessus. Dans cette partie, le GBF modulé n'est pas branché sur le filtre.

- Débranchez le GBF modulé de l'étage II (filtre).
- Vérifiez que le GBF wobulant délivre bien une tension constante et rebranchez-le sur le GBF modulant.
- Visualisez  $v_A(t)$  et  $v_B(t)$  (resp. modulante et tension modulée).
- Cherchez et notez les valeurs  $U_1$  et  $U_2$  de la tension à imposer à l'entrée wobulation du GBF wobulé pour obtenir en sortie les pulsations  $\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega$  (point  $M$ ) et  $\omega_2 = \omega_0 + \Delta\omega$  (point  $N$ ) où  $\Delta\omega = \frac{\omega_0 - \Omega_0}{2}$ . Le point  $M$  est donc au milieu entre  $P$  et le sommet de la courbe de résonance.

$$\left[ \begin{array}{l} \text{---} \\ U_1 = \qquad \qquad \qquad U_2 = \\ \text{---} \end{array} \right]$$

<sup>2</sup>On préfère prendre  $\omega_0 > \Omega_0$  plutôt que  $\Omega_0 > \omega_0$  et si on règle  $\omega_0$  et non  $\Omega_0$  c'est pour une simple question de facilité.

- Réglez ensuite le GBF wobulant pour qu'il délivre une tension sinusoïdale de pulsation  $\omega' \simeq \frac{\omega_0}{100}$  avec une amplitude et un offset tels que les tensions minimale et maximale correspondent à  $U_1$  et  $U_2$  déterminées ci-dessus. De la sorte le GBF wobulé délivre désormais un signal dont la fréquences varie entre celles correspondant aux points  $M$  et  $N$ .



**La modulante est maintenant réglée, ne modifiez désormais plus les réglages d'offset et d'amplitude du GBF wobulant.**

##### ► Étape 3 : accorder la démodulation d'amplitude

- Rebranchez tous les étages entre eux.
- Visualisez  $v_D(t)$  et  $v_E(t)$  (resp. entrée et sortie du détecteur de crête).
- Réglez  $R_d$  de manière à obtenir  $T_0 \ll \tau \ll T'$  où  $\tau = R_d C_d$  est la constante de temps du détecteur de crête,  $T_0$  est la période de la porteuse et  $T'$  celle de la modulante.
- **Ça marche !**
- Observez simultanément  $v_A(t)$  et  $v_E(t)$ , respectivement la modulante et le signal démodulé, sur les voies  $X$  et  $Y$  et imprimez le résultat.

#### iii. linéarité ☺

- Lorsque la chaîne modulation – démodulation de fréquence est de qualité, pour les mêmes raisons que celles présentées lors de la modulation – démodulation d'amplitude, en mode  $XY$ , cela doit donner une droite si les signaux sont en phase ou une ellipse si les signaux sont déphasés.
- Déréglez les paramètres suivants et observez les non linéarités qui apparaissent :
  - la résistance  $R_d$  du détecteur de crête;
  - la capacité  $C$  du circuit résonant.
- Pour une non-linéarité apparue, affichez et imprimez le signal de sortie et expliquez les raisons du ou des défauts apparus.