

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN-TIARET

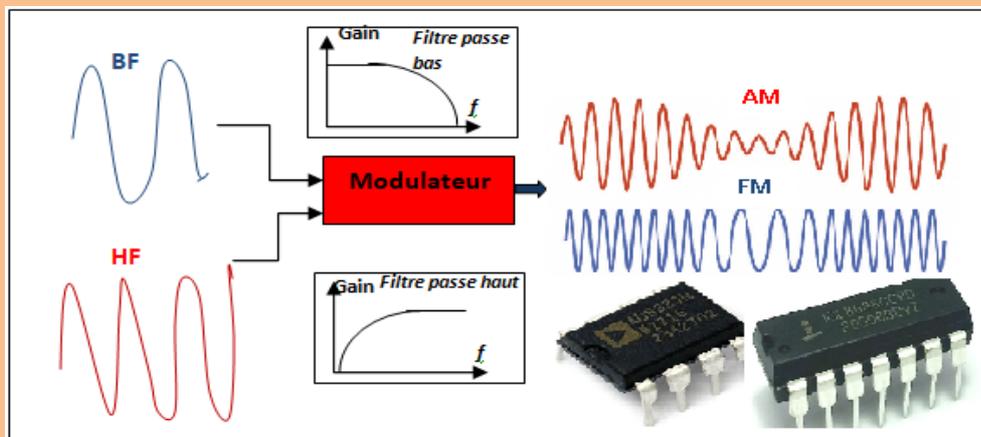
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



## Polycopie de Travaux pratiques

### --Fonctions d'électronique--



Par :

Dr. Youcef BELHADJI &

Pr. Djillali NASRI

Matière : Fonctions d'électronique

Promotion : Licence électronique

Semestre : 05

# Préface

Ce recueil de travaux pratiques a été méticuleusement élaboré dans le but de fournir aux étudiants une ressource éducative enrichissante. Il est destiné aux étudiants en licence électronique, tout en pouvant également bénéficier à d'autres spécialités. Fruit d'une collaboration entre diverses références bibliographiques et des efforts déployés, ce recueil vise à offrir une expérience pratique et didactique aux étudiants en électronique, en particulier ceux de la troisième année de licence (semestre 05). Les travaux pratiques présentés dans ce polycopié sont conçus pour permettre aux étudiants d'explorer les concepts liés au filtrage analogique (passif et actif) ainsi que les circuits de modulation d'amplitude et de fréquence le synthétiseur de fréquence. Ce polycopie est planifié comme suit :

- **TP01 : Etude du Filtrage Passif**
- **TP02 : Etude du Filtrage Actif : Synthèse d'un filtre passe bas et passe haut**
- **TP03 : Modulation d'amplitude**
- **TP04 : Démodulation d'amplitude**
- **TP05 : Modulation de fréquence**
- **TP06 : Démodulation de fréquence**
- **TP07 : Synthétiseur de fréquence à base du PLL**

Chaque énoncé de Tp est suivi par une fiche de réponse qui pourrait être utilisée comme rapport de Tp. de Nous espérons que cette ressource facilitera la compréhension des principes fondamentaux et encouragera l'application pratique des connaissances évoqués dans ce polycopié.

# Filtrage analogique

## TP 01 : Etude des filtres passifs

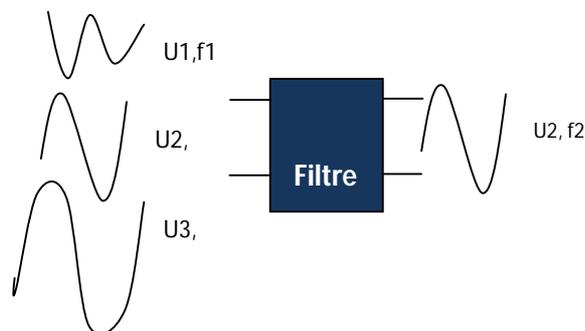
### 1. But de TP

L'objectif principal de ce TP est d'approfondir l'étude des filtres analogiques passifs, plus spécifiquement ceux de premier ordre, en se focalisant sur les circuits RC. Cette exploration permettra une compréhension approfondie des caractéristiques, du comportement, et des applications pratiques de ces filtres, enrichissant ainsi la connaissance des étudiants dans le domaine des circuits électroniques.

### 2. Rappels théoriques

Un filtre, en tant que quadripôle, est défini comme un dispositif électrique permettant le transit non atténué des tensions se situant au sein d'une bande de fréquence spécifique, communément appelée "bande passante". Conjointement, il présente une résistance sélective au passage des tensions extérieures à cette plage. Cette fonctionnalité essentielle confère aux filtres un rôle crucial dans la gestion précise et sélective des signaux électriques, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité et de la précision des transmissions dans divers contextes électriques et électroniques.

Le filtre décrit dans la figure 1 permet le passage de la tension  $U_2$  à la fréquence  $f_2$  tout en bloquant les tensions  $U_1$  et  $U_3$  aux fréquences  $f_1$  et  $f_3$ , respectivement.

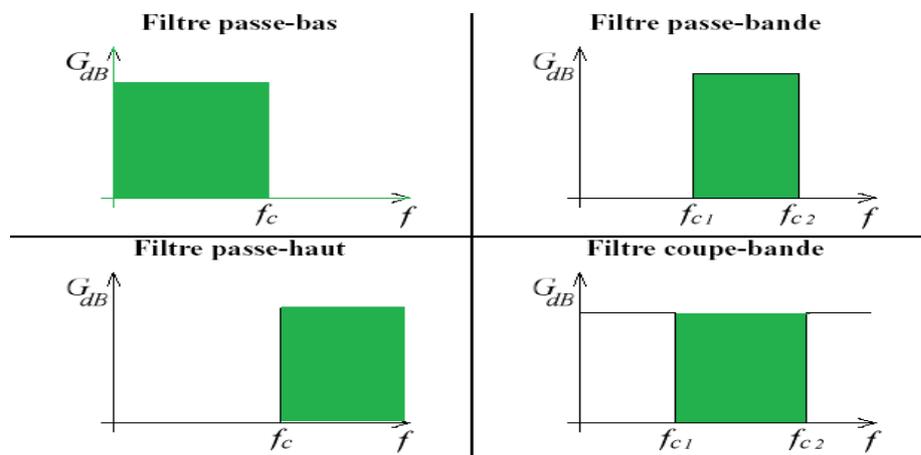


**Fig.1.** Représentation du principe de filtrage

On identifie généralement quatre types de filtres :

- **Filtre passe-bas** : Il autorise le passage de toutes les tensions de fréquences inférieures à une valeur déterminée, appelée "fréquence de coupure ( $f_c$ )", tout en rejetant celles situées au-delà de cette fréquence,
- **Filtre passe-haut**: Ce filtre laisse passer les tensions de fréquence supérieure à la fréquence de coupure et rejette celles de fréquences inférieures,
- **Filtre passe-bande** : Il autorise le passage des tensions dont les fréquences se situent à l'intérieur d'une plage définie, tout en éliminant celles qui se trouvent en dehors de cette plage,
- **Filtre coupe-bande** : Ce type de filtre rejette les tensions de fréquences comprises dans une certaine bande et permet le passage de toutes les fréquences situées en dehors de cette bande.

Ci-dessous la représentation des diagrammes de Bode pour le cas des filtres idéaux.

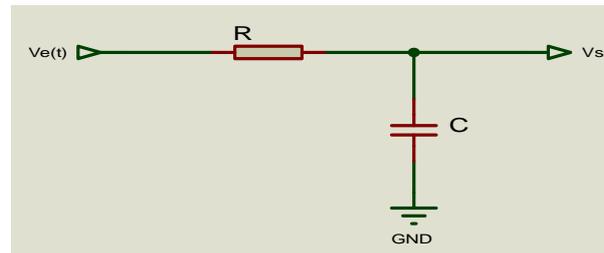


**Fig.2.** Diagramme de Bode des filtres idéaux.

### 3. Modélisation du filtre passe bas

Nous nous limiterons ici à l'étude du filtre passe bas afin de mettre en évidence la méthode générale d'étude qui se décline ensuite sur n'importe quel montage. Le filtre RC passe-bas est un circuit électronique simple qui permet le passage des signaux de fréquence relativement basse tout en atténuant les signaux de fréquences plus élevées.

Le circuit est généralement composé d'une résistance "**R**" et d'un condensateur "**C**" disposés en série selon la représentation schématique du circuit de la figure 3.



**Fig.3.** Circuit du filtre RC passe bas

- $V_e(t)$  représente le signal d'entrée,
- $V_s(t)$  représente le signal de sortie,
- $R$  est la résistance,
- $C$  est le condensateur,
- **GND** est la mise à la terre (ground).

Ce type de filtre est couramment utilisé dans des applications telles que la réduction du bruit, le filtrage des basses fréquences et dans les circuits de démodulation.

La fréquence de coupure :  $f_c$  est déduit à partir de la fonction de transfert «  $T$  » du filtre telle que :

$$T = \frac{V_s}{V_e} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{(1+jRc\omega)} \quad (2)$$

Dans l'étude du filtre on s'intéresse au tracé du diagramme fréquentielle du gain  $G(\omega)$  et de phase  $\varphi(\omega)$ . Le diagramme de phase est crucial pour comprendre comment le filtre modifie la synchronisation temporelle des différentes composantes fréquentielles d'un signal d'entrée. Il est souvent analysé conjointement avec le diagramme d'amplitude pour obtenir une compréhension complète du comportement fréquentiel d'un filtre.

Le module de la fonction de transfert est donné par :

$$G(\omega) = \left| \frac{V_s}{V_e} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1+(Rc\omega)^2)}} \quad (3)$$

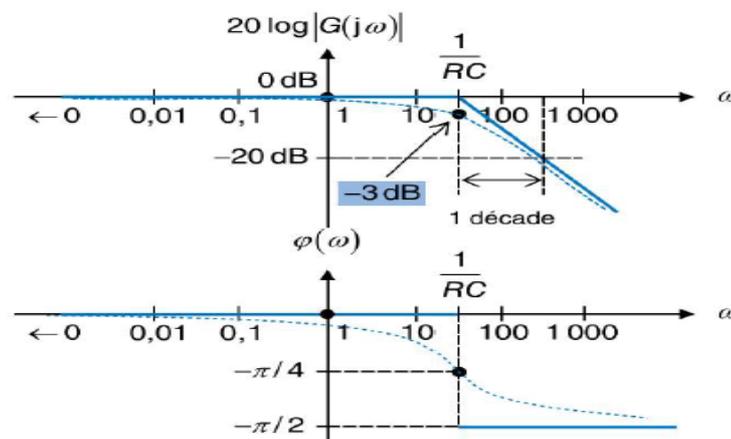
Si on exprime en  $\left| \frac{V_S}{V_e} \right|$  décibel, on aura :

$$|G(\omega)|_{dB} = \left| \frac{V_S}{V_e} \right|_{dB} = 20 \log \left( \frac{1}{\sqrt{1+(Rc\omega)^2}} \right) = -10 \log (1 + (Rc\omega)^2) \quad (4)$$

Pour la phase  $\varphi$  elle se calcule par:

$$\varphi(\omega) = \arctan (Rc\omega) \quad (5)$$

Les courbes de réponse de gain et de phase du filtre passe bas sont exposées ci-dessous.



**Fig.4.** Digrammes de Bode

A partir des courbes ci-dessus et pour  $\omega = \omega_c = \frac{1}{RC}$  dite pulsation de coupure on a:

$$G \left( \frac{1}{RC} \right) = \frac{1}{\sqrt{1+1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$|G(\omega)|_{dB} = 20 \log \left( G \left( \frac{1}{RC} \right) \right) = -3dB \quad (7)$$

Et pour la phase :  $\varphi \left( \frac{1}{RC} \right) = \frac{\pi}{4}$

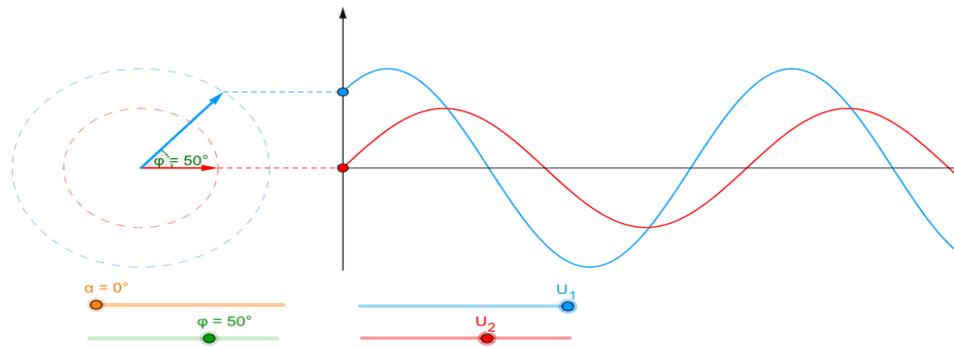
Donc la fréquence de coupure ( $f_c$ ) du filtre RC passe-bas est déterminée par la constante de temps du circuit, qui est le produit de la résistance (R) et de la capacité

(C), soit :  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

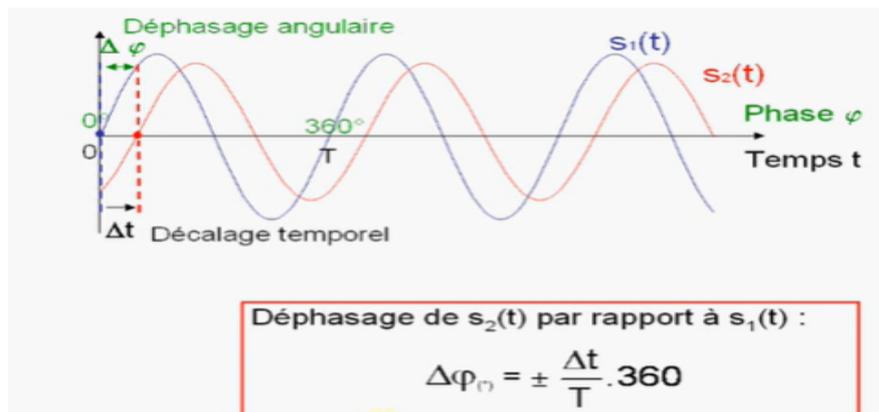
#### 4. Mesure du gain et du déphasage

##### 4.1. Mesure du gain

Soit un filtre alimenté par un signal  $s_1(t) = S_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$  et qui fournit en sortie un signal  $s_2(t) = S_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ . En utilisant un oscilloscope, on obtient les courbes de la figure 5.



1



**Fig.5.** Représentation du déphasage

##### 4.2. Mesure du déphasage

$\varphi = \varphi_{s1} - \varphi_{s2}$  représente le déphasage entre  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ . Ce déphasage est proportionnel au décalage des sinusoïdes.  $\varphi$  est compris entre  $-\pi$  et  $\pi$ .  $\varphi$  soit positif si le signal  $s_2(t)$  est en avance par rapport à  $s_1(t)$ .

Si  $|\varphi| = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$  (en rad), donc connaissant le signe du déphasage

$$\varphi = -\omega \Delta T = -2\pi \frac{\Delta T}{T} \quad (8)$$

L'application numérique donne :  $\varphi = -2\pi \frac{0.9}{7.5} = -0.75 \text{ rad} \approx -43^\circ$

## 5. Travail demandé

### 5.1. Etude du filtre passe bas

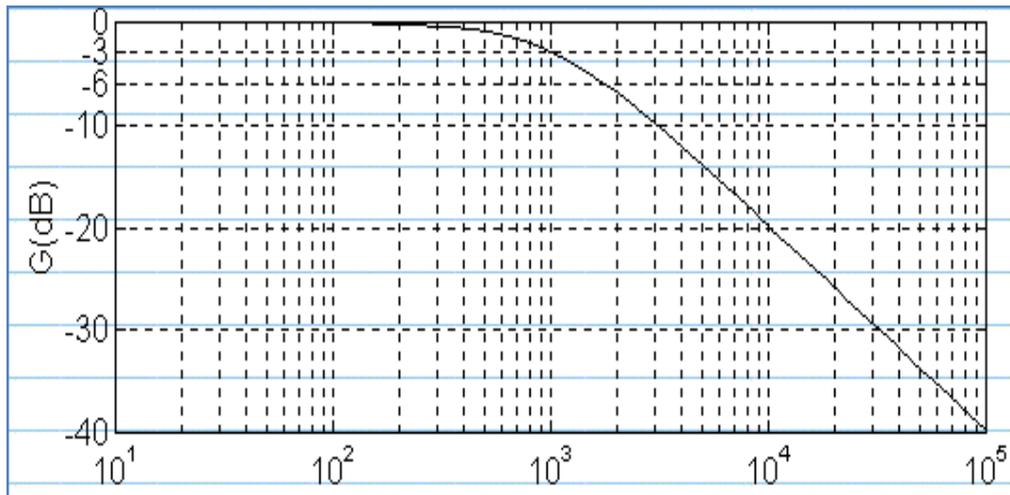
#### a. Etude théorique

On donne, dans la figure 6, le diagramme de gain pour un filtre passif. A partir de ce diagramme :

1. Donner le type du filtre
2. Déduire la fréquence de coupure ainsi que la bande passante du filtre
3. On pose  $R=10k\Omega$ , déduire la valeur de la capacité
4. Exprimer la fonction de transfert **T** du filtre en fonction de **R**, **C** et la pulsation  $\omega$ .
5. On pose  $\omega_c = \frac{1}{RC}$ , exprimer la fonction de transfert en fonction de  $\omega$  et  $\omega_c$ .
6. Pour quelle valeur de  $\omega$  le gain G est-il maximum ? Quel est sa valeur maximale  $G_{max}$
7. Pour quelle valeur de  $\omega$  le gain G est-il minimal ?
8. Donner le circuit du filtre

#### b. Etude pratique

- 1) Réaliser le circuit du filtre obtenu
- 2) Alimenter le filtre par une tension  $V_e(t) = 2 \sin(\omega t)$  et  $f = 100$  Hz
- 3) A l'aide de l'oscilloscope visualiser les deux signaux simultanément, relever l'amplitude de  $V_s$  (aux bornes de C) et son déphasage par rapport à  $V_e$ .
- 4) Refaire les mêmes mesures, pour différentes fréquences allant de 100 Hz à 60 KHz, selon le tableau ci-dessous.
- 5) Représenter le diagramme des amplitudes (diagramme de Bode).
- 6) Comparer la valeur de la fréquence de coupure théorique avec celle mesurée.
- 7) Interpréter vos résultats et faire une conclusion.



**Fig.6.** Diagramme de gain d'un filtre de 1<sup>er</sup> ordre

## 5.2. Etude du filtre passe haut

En gardant les mêmes valeurs de R et C ainsi que celle de la fréquence de coupure, exprimer la fonction de transfert en fonction de  $\omega$  et  $\omega_c$ .

1. Pour quelle valeur de  $\omega$  le gain G est-il maximum ? Quel est sa valeur maximale  $G_{\max}$
2. Pour quelle valeur de  $\omega$  le gain G est-il minimal ?
3. Réaliser le circuit du filtre
4. Aliment le filtre par une tension  $V_e(t) = 2 \sin(\omega t)$  et  $f = 100$  Hz
5. A l'aide de l'oscilloscope visualiser les deux signaux simultanément, relever l'amplitude de  $V_s$  (aux bornes de C) et son déphasage par rapport à  $V_e$ .
6. Refaire les mêmes mesures, pour différentes fréquences allant de 100 Hz à 60 KHz, selon le tableau ci-dessous.
7. Représenter le diagramme des amplitudes (diagramme de Bode).
8. Comparer la valeur de la fréquence de coupure théorique avec celle mesurée.
9. Interpréter vos résultats et faire une conclusion.

**Remarque :** Noter le point de mesure correspondant à la fréquence de coupure  $f_c$ .

Groupe : .....

## Rapport De TP N°01

Date : .....

### Noms /prénoms

- 1) ..... 3) .....  
2) ..... 4) .....

### Partite 01 : Etude théorique

1. Donner le type du filtre

.....  
.....  
.....

2. Déduire la fréquence de coupure ainsi que la bande passante du filtre

.....  
.....  
.....

.....  
3. La valeur de la capacité

.....  
.....  
.....

4. Déterminer la fonction de transfert **T** du filtre en fonction de **R, C** et la pulsation  $\omega$ .

.....  
.....  
.....

5. On pose  $\omega_c=1/RC$ , exprimer la fonction de transfert en fonction de  $\omega$  et  $\omega_c$ .

.....  
.....  
.....

6. Calculer la valeur de  $\omega$  pour laquelle le gain  $G$  est maximal ainsi que la valeur maximale  $G_{\max}$

.....  
.....  
.....

7. Calculer la valeur de  $\omega$  pour laquelle le gain  $G$  est minimal ainsi que la valeur minimale de  $G$

.....  
 .....  
 .....

8. Donner le circuit du filtre

.....  
 .....  
 .....

**Partie 02 : Etude pratique**

1) Déterminer l'amplitude de  $V_s$  (aux bornes de  $C$ ) et son déphasage par rapport à  $V_e$ .

.....  
 .....  
 .....

2) Comparer la valeur de la fréquence de coupure théorique et mesurée.

.....  
 .....  
 .....

3) Remplir le tableau

4) A partir de mesures enregistrées, tracer le diagramme de gain

f(KHz)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	5	8	10
$V_e(V)$															
$V_s(V)$															
$G(dB)$															
Déphasage (°)															



# Filtrage analogique

## TP 02 : Synthèse d'un filtre actif passe bas

### 1. But de TP

A partir d'un gabarit d'un filtre et un montage (filtre actif de Sallen-Key ou de Rauch), l'étudiant doit savoir calculer les différents éléments du montage et tracer son diagramme de Bode.

### 2. Rappels théoriques

La conception d'un filtre actif, tel que le filtre de Sallen-Key ou le filtre de Rauch, à partir d'un gabarit donné, implique plusieurs étapes et compétences. Ci-après une description générale des étapes que l'étudiant devrait suivre :

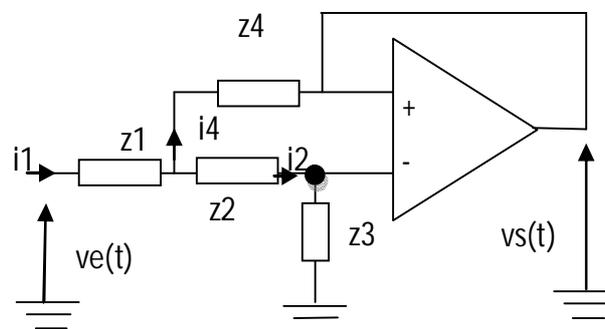
- **Analyse du gabarit:** Comprendre les spécifications du filtre à partir du gabarit, notamment la fréquence de coupure, la pente du filtre, le type de filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande, ou coupe-bande), etc.
- **Choix du type de filtre:** Sélectionner le type de filtre actif (Sallen-Key, Rauch, etc.) en fonction des exigences du gabarit et des caractéristiques spécifiques du montage.
- **Fonction de transfert:** Établir la fonction de transfert du filtre en fonction des composants du montage. Pour un filtre de Sallen-Key, par exemple, cela impliquerait de déterminer les valeurs des résistances et des condensateurs.

### 3. Choix et calcul des composants

- a) Choisir le type de l'amplificateur opérationnel à utiliser notamment la bande passante doit être suffisamment élevée pour couvrir la plage de fréquences du filtre. Aussi, le taux de balayage (Slew rate) : un taux de balayage élevé est bénéfique pour minimiser la distorsion dans les signaux rapides.
- b) Calculer les valeurs spécifiques des résistances et des condensateurs nécessaires pour réaliser les équations de transfert. Cela peut impliquer l'utilisation de formules spécifiques pour chaque configuration de filtre.
- c) **Simulation** : Utiliser des outils de simulation de circuits (comme Proteus) afin de vérifier les performances du filtre et ajuster les valeurs des composants si nécessaire.
- d) **Tracé du diagramme de Bode**: Utiliser les équations de transfert pour tracer le diagramme de Bode du filtre, montrant la réponse en fréquence en amplitude et en phase.
- e) **Analyse et ajustements**: Analyser le diagramme de Bode pour s'assurer qu'il correspond aux spécifications du gabarit. Si nécessaire, ajuster les valeurs des composants pour améliorer les performances du filtre et passer à l'implémentation.

#### 3.1. Montage de Sallen-Key

Le montage est donné dans la figure 1. Les dipôles ayant pour admittances  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  sont soit des résistances soit des condensateurs selon la nature du filtre.



**Fig.1.** Montage de Sallen-Key

Pour calculer la fonction de transfert du circuit on caractérise chaque dipôle  $D_k$  par son admittance complexe  $y_k$  tel que :

$$i_1 = i_2 + i_4 \quad (1)$$

$$V_s = Z_3 i_2 \quad (2)$$

$$Z_4 i_4 = Z_2 i_2 \Rightarrow i_4 = \frac{Z_2 i_2}{Z_4} \quad (3)$$

$$V_e = Z_1 i_1 + (Z_3 + Z_2) i_2 \quad (4)$$

$$V_e = Z_1 (i_2 + i_4) + (Z_3 + Z_2) i_2 \quad (5)$$

$$V_e = Z_1 i_4 + (Z_3 + Z_2 + Z_1) i_2 \quad (6)$$

$$V_e = \left( Z_1 \frac{Z_2}{Z_4} + Z_3 + Z_2 + Z_1 \right) i_2 \quad (7)$$

$$V_e = \frac{(Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_3 + Z_2 + Z_1)) i_2}{Z_4} \quad (8)$$

Finalement on aboutira à la formule suivante de la fonction de transfert :

$$T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{Z_4 Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_3 + Z_2 + Z_1)} \quad (9)$$

Donc, selon la nature et la disposition des éléments  $Z_3, Z_2, Z_1, Z_4$  on obtient différents filtre passe bas, passe haut et passe bande

- **Dimensionnement d'un filtre passe bas**

Pour  $Z_2 = Z_1 = R_0$  et  $Z_1 = \frac{1}{jC_1\omega}$  et  $Z_2 = \frac{1}{jC_2\omega}$ , la fonction de transfert s'écrit sous la forme suivante:

$$T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2R_0C_2\omega + j^2R_0^2C_2C_1\omega^2} \quad (10)$$

Cette fonction de transfert peut être écrite sous la forme canonique:

$$T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2m\frac{\omega}{\omega_c} + j^2\frac{\omega^2}{\omega_c^2}} \quad (11)$$

### 3.2. Filtre passe bas de Butterworth

La relation entre le filtre de Sallen-Key et Butterworth réside dans le fait que la topologie de Sallen-Key est souvent utilisée pour implémenter des filtres Butterworth dans le domaine des filtres actifs. En d'autres termes, le filtre de Sallen-Key peut être configuré pour répondre aux caractéristiques de réponse en fréquence de Butterworth.

Afin d'obtenir une pente quelconque tout en ayant -3dB à  $f_p$ , sans trop de calculs compliqués, la solution de Butterworth reste adéquate. La fonction de transfert dans le cas d'un filtre passe bas est donnée par la relation suivante :

$$|T| = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}}} \quad (12)$$

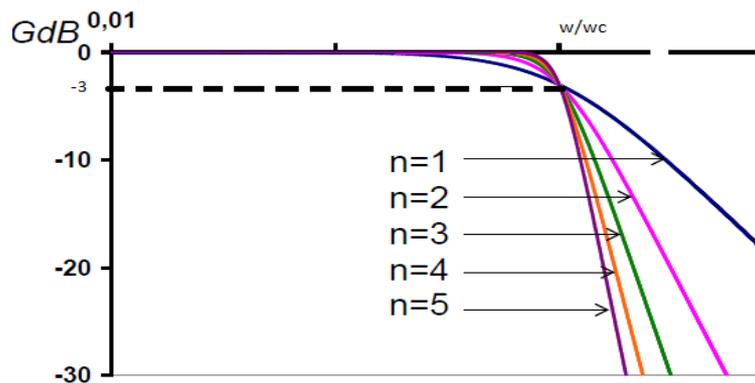
En posant  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_p}$ ,

On obtient :

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^{2n}}} \quad (13)$$

Ce filtre est caractérisé par  $f_a$  qui est la fréquence atténuatrice telle que  $|T(f_a)| \leq A_{min}$  et une fréquence passante  $|T(f_p)| = -3dB$

On donne dans la figure 2, les diagrammes de Bode d'amplitude du modèle de Butterworth



**Fig.2.** Diagrammes de Bode (courbes de gain) pour filtre de Butterworth.

A la fréquence passante,  $\omega = \omega_p$ ,  $\Omega = 1$  quelque soit l'ordre du filtre,  $|T| = \frac{1}{\sqrt{2}}$   $G = -3dB$ .

Donc Toutes les courbes passent par le point  $(f_p, -3dB)$

A la fréquence atténuatrice  $\omega = \omega_a$

$$\Omega_a = \frac{\omega_a}{\omega_p}, \quad G = 20 \text{ LOG} \left[ \frac{1}{\sqrt{1+(\Omega_a)^{2n}}} \right] \leq -A_{min} \quad (14)$$

Il en résulte :

$$-\frac{A_{min}}{10} \geq -\text{LOG}(1 + (\Omega_a)^{2n}) \Rightarrow \frac{A_{min}}{10} < \text{LOG}(1 + (\Omega_a)^{2n}) \quad (15)$$

$$10^{\frac{A_{min}}{10}} \leq (1 + (\Omega_a)^{2n}) \Rightarrow 10^{\frac{A_{min}}{10}} - 1 \leq (\Omega_a)^{2n} \quad (16)$$

Finalement on obtient :

$$n > \frac{\text{LOG}\left(10^{\frac{A_{min}}{10}} - 1\right)}{2\text{LOG}(\Omega_a)} \quad (17)$$

Donc, étant donné un gabarit du filtre on peut déterminer l'ordre du filtre et par suite sa fonction de transfert

**Remarque:** En utilisant un développement adéquat, pour n donné, on peut écrire la fonction de transfert sous forme de fraction  $T = \frac{1}{D(p_n)}$  où le dénominateur peut se mettre sous la forme suivante:

n	$D(p_n)$
1	$1 + p_n$
2	$1 + \sqrt{2} p_n + p_n^2$
3	$(1 + 1.0p_n + p_n^2)(1 + p_n)$
4	$(1 + 1.8477p_n + p_n^2)(1 + 0.7653p_n + p_n^2)$

#### 4. Travail demandé

##### 4.1. Etude théorique

- 1) Quelle est la relation entre le filtre de Sallen-Key et celui de Butterworth ?
- 2) Quels sont les avantages des filtres actifs ?
- 3) Quel est l'avantage du modèle de Butterworth ?
- 4) Pour le modèle de Butterworth, quel est l'influence de l'ordre du filtre (pour n élevé)?

5) Sachant que la fonction de transfert du montage Sallen-key s'écrit sous la forme :  $T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{Z_4 Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_3 + Z_2 + Z_1)}$  (18)

Et étant donné :  $Z_2 = Z_1 = R_0$  et  $Z_1 = \frac{1}{jC_1\omega}$  et  $Z_2 = \frac{1}{jC_2\omega}$  (19)

Montrer que la fonction de transfert s'écrit sous la forme suivante :

$$T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2R_0C_2\omega + j^2R_0^2C_2C_1\omega^2} \quad (20)$$

6) Soit le gabarit de la figure 4. Sachant que:  $A_{min} = -30 \text{ dB}$  et  $A_{max} = -3 \text{ dB}$ ,  $f_p = 2 \text{ KHz}$ ,  $f_a = 20 \text{ KHz}$ , calculer l'ordre du filtre et donner sa fonction de transfert.

7) On veut réaliser ce filtre en utilisant une cellule de Sallen-key, déterminer les éléments (R, C1 et C2) de ce montage

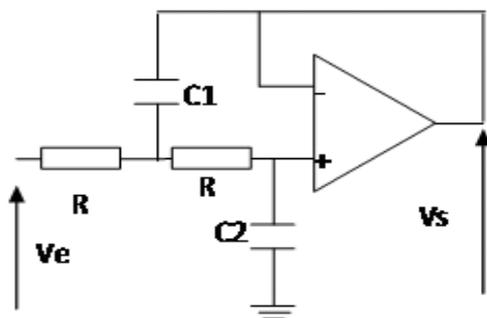


Fig.3. Filtre passe-bas de Sallen-Key

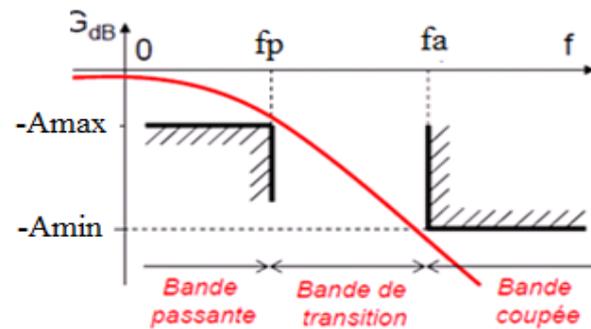
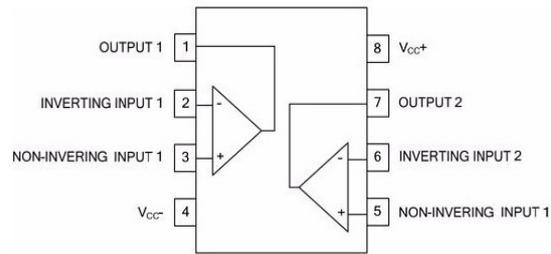


Fig.4. Gabarit d'un filtre passe bas

#### 4.2. Etude pratique

1. En utilisant l'amplificateur IL082, réaliser le circuit du filtre obtenu
2. Alimenter le montage par + 15 V et -15 V
3. Appliquer à l'entrée un signal sinusoïdal  $V_e$  d'amplitude maximale 10 V
4. En faisant varier la fréquence de  $V_e$  relever  $V_s$  et  $V_e$  puis remplir le tableau 2
5. Sur une échelle semi-logarithmique, tracer le diagramme de Bode du  $G_{dB}$
6. Dédire sur cette courbe la fréquence de coupure (passante) à -3 dB
7. Quelle est alors la bande passante du filtre
8. Comparer les valeurs théoriques et pratiques de la fréquence de coupure avec explication
9. Si on associe deux cellules de Sallen-Key en cascade, déduire la fonction de transfert et tracer son diagramme de Bode

## Schéma interne de l'amplificateur TL082



### Exemple de synthèse d'un filtre passe bas

On veut réaliser un filtre satisfaisant au gabarit suivant

$$A_{min} = -12 \text{ dB} \text{ et } A_{max} = -3 \text{ dB}, \quad f_p = 10 \text{ KHz}, \quad f_a = 20 \text{ KHz}$$

Le filtre est du type Butterworth (car  $A_{max} = -3$ )

Détermination de l'ordre du filtre  $n$

$$n > \frac{\text{LOG} \left( 10^{-\frac{-12}{10}} - 1 \right)}{2 \text{LOG}(2)} = \frac{\text{LOG}(14,84)}{2 \text{LOG}(2)} = 1.946 \Rightarrow n = 2$$

donc la fonction de transfert est donnée par  $T(p_n) = \frac{1}{1 + \sqrt{2} p_n + p_n^2} = \frac{1}{1 + \sqrt{2} j \frac{\omega}{\omega_p} + j^2 \frac{\omega^2}{\omega_p^2}}$

Avec  $p_n = j \frac{\omega}{\omega_p} = j \frac{f}{f_p}$  ; Si nous utilisons un filtre de type Sallen-Key

$$\text{Alors } T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2R_0C_2\omega + j^2R_0^2C_2C_1\omega^2} = \frac{1}{1 + j2m\frac{\omega}{\omega_p} + j^2\frac{\omega^2}{\omega_p^2}}$$

Par identification des relations on a :  $m = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$

On choisit  $R_0 = 10 \text{ K}\Omega$   $C_0^2 = C_1C_2$  (capacité fictive)

$$R_0^2C_2C_1 = \frac{1}{\omega_p^2} \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{R_0C_0} ; \omega_p = 2\pi f_p = 2\pi 10^4 = \frac{1}{R_0C_0} \Rightarrow C_0 = \frac{1}{R_0 2\pi f_p} = 1.59 \text{ nF}$$

$$\text{D'autre part : } \frac{\sqrt{2}}{\omega_p} = 2R_0C_2 \Rightarrow C_2 = \frac{\sqrt{2}}{2R_0\omega_p} = \frac{\sqrt{2}}{2R_0 \frac{1}{R_0C_0}} = \frac{\sqrt{2}}{2} C_0 ; C_2 = 0.707 C_0 = 1.25 \text{ nF}$$

$$C_1 = \frac{C_0^2}{C_2} = \frac{C_0^2}{0.707 C_0} = \frac{C_0}{0.707} = 2.25 \text{ nF}$$

Finalement on a :  $C_2 = 1.25 \text{ nF}$  ;  $C_1 = 2.25 \text{ nF}$  et  $R_0 = 10 \text{ K}\Omega$

Groupe : .....

## Rapport De TP N°02

Date : .....

**Noms /prénoms**

3) .....

3) .....

4) .....

4) .....

### a. Etude théorique

1. Quelle est la relation entre le filtre de Sallen-Key et celui de Butterworth ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2. Les avantages des filtres actifs

.....  
.....  
.....  
.....

3. L'avantage du modèle de Butterworth

.....  
.....

4. L'influence de l'ordre du filtre (pour n élevé)

.....  
.....

5. Montrer que la fonction de transfert s'écrit sous la forme suivante

$$T = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2R_0C_2\omega + j^2R_0^2C_2C_1\omega^2}$$

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....





## TP 03 : Modulation d'Amplitude (AM)

### 1. But de TP

Dans ce TP on s'intéresse au cas de la modulation d'amplitude en mettant en évidence leurs principales propriétés, offrant ainsi une compréhension de ses caractéristiques essentielles et de son importance dans le contexte des communications et des systèmes électroniques. Une connaissance préalable de la théorie de base des transistors bipolaires est attendue. A travers ce TP les étudiants vont aussi :

- Étudiez la théorie classique de la modulation d'amplitude dans les domaines temporel et fréquentiel,
- Découvrez les propriétés de base des FFT,
- Découvrez comment l'indice de modulation affecte les signaux AM dans les plages de temps et de fréquence.
- Identifier l'indice et le pourcentage de modulation d'une porteuse modulée en amplitude en analysant la courbe dans le domaine temporel.
- Comparer les amplitudes des fréquences latérales avec l'amplitude de la porteuse dans une modulation d'amplitude pour plusieurs indices de modulation.
- Calculer la bande passante du signal d'une porteuse modulée en amplitude pour différentes fréquences de modulation.

### 2. Rappels théoriques

La transmission d'un signal informatif  $e(t)$ , de spectre borné  $[f_{min}, f_{max}]$ , à travers un canal caractérisé par une bande passante limitée, absorbante, et dispersif, nécessite l'application de techniques de modulation et de démodulation sur une onde porteuse à fréquence élevée:  $V(t) = V_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$  dite porteuse. Cette porteuse peut être modulée de trois manières distinctes :

- Moduler l'amplitude de la porteuse, connue sous le nom de modulation d'amplitude (AM),
- Moduler sa fréquence, appelée modulation de fréquence (FM),

- Moduler sa phase, désignée sous le terme de modulation de phase (PM).

La fréquence  $f_p$  de la porteuse est choisie dans la bande passante (BP) du canal. À la réception, il est impératif de démoduler le signal pour récupérer le contenu informatif  $e(t)$ .

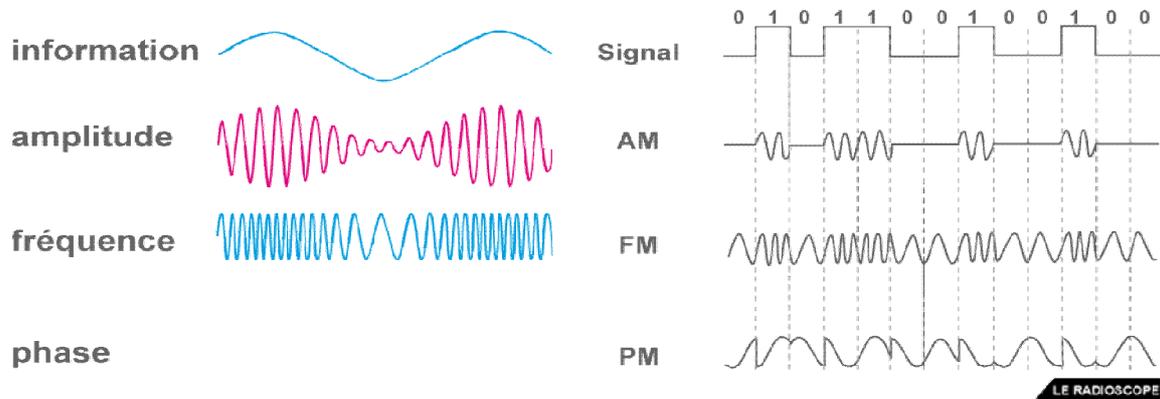


Fig.1. Représentation des trois types de la modulation

#### a. Principe de la modulation AM

Soit :  $P(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$  onde porteuse (HF) et  $m(t) = A_m \cos(\Omega_m t)$  signal informatif ou modulant (BF)

Le signal modulé et le résultat de multiplication (non-pas l'addition) des deux signaux : haute fréquence  $P(t)$  et basse fréquence  $m(t)$ .

$U_0$ : est une composante continue.

D'après la valeur d' $U_0$ , deux cas de modulation d'amplitude sont discutés

- **Modulation sans porteuse conservée** :  $U_0=0V$  donc  $S(t)=m(t) \times p(t)$

La modulation sans porteuse conservée consiste à multiplier dans le domaine temporel les signaux  $p(t)$  et  $m(t)$ , en électronique cette opération est réalisée par un circuit multiplieur comme le montre le schéma de principe de la figure 2.

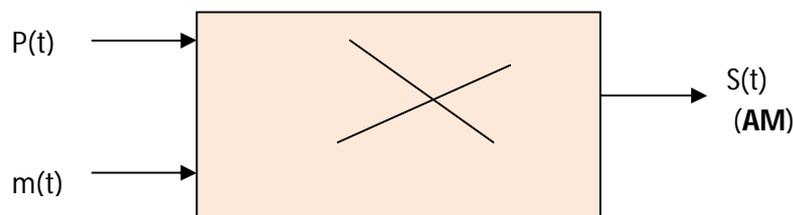


Fig.2. Schéma de principe d'un modulateur AM sans porteuse conservée

Si  $p(t) = A_p \sin(2\pi f_p t)$ , et  $m(t)$  est un signal sinusoïdal  $m(t) = A_m \sin(2\pi f_m t)$ , alors le signal  $s(t)$  s'écrit :

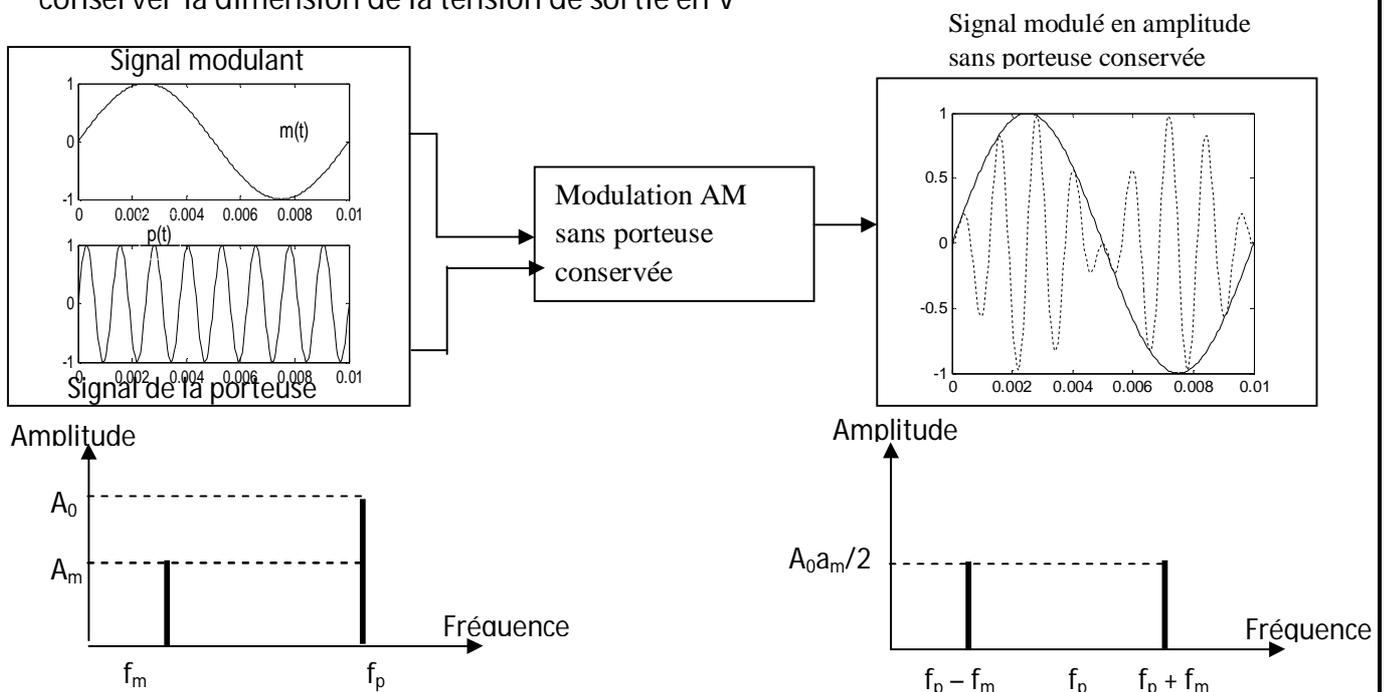
$$s(t) = k \cdot m(t) \cdot p(t) = k a_m A_0 \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_p t) \quad (1)$$

$s(t)$  peut être écrit sous la forme :

$$s(t) = A(t) \cdot \sin(2\pi f_p t) \quad (2)$$

$$A(t) = k a_m A_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (3)$$

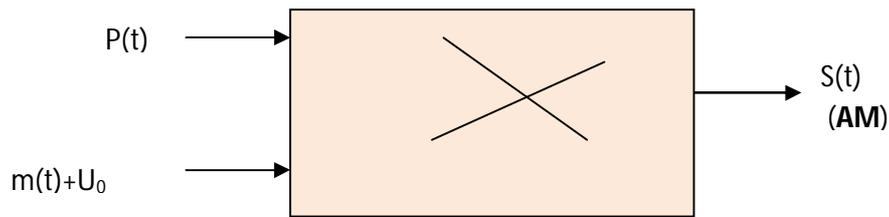
Où  $k$  est une constante propre au circuit de modulation exprimé en  $(V^{-1})$ , utilisé pour conserver la dimension de la tension de sortie en  $V$



**Fig.3.** Représentation de la modulation AM sans porteuse conservée ainsi que le spectre

- **Modulation d'amplitude avec porteuse conservée :**  $U_0 \neq 0$  alors AM est  $S(t) = (U_0 + m(t)) p(t)$  :

Lorsqu'on souhaite conserver la porteuse, on additionne au signal contenant le message  $m(t)$  une composante continue égale à  $U_0$ . Ce principe est schématisé sur la figure 4



**Fig.4.** Schéma de principe d'un modulateur AM sans porteuse conservée.

Le signal modulé s'écrit

$$s(t) = k(U_0 + m(t)).p(t) \quad \text{Si } k=1V^{-1} \quad (4)$$

$$s(t) = U_0 A_0 \left( 1 + \frac{A_m}{U_0} \sin(2\pi f_m t) \right) \sin(2\pi f_p t) = A(t) \sin(2\pi f_p t) \quad (5)$$

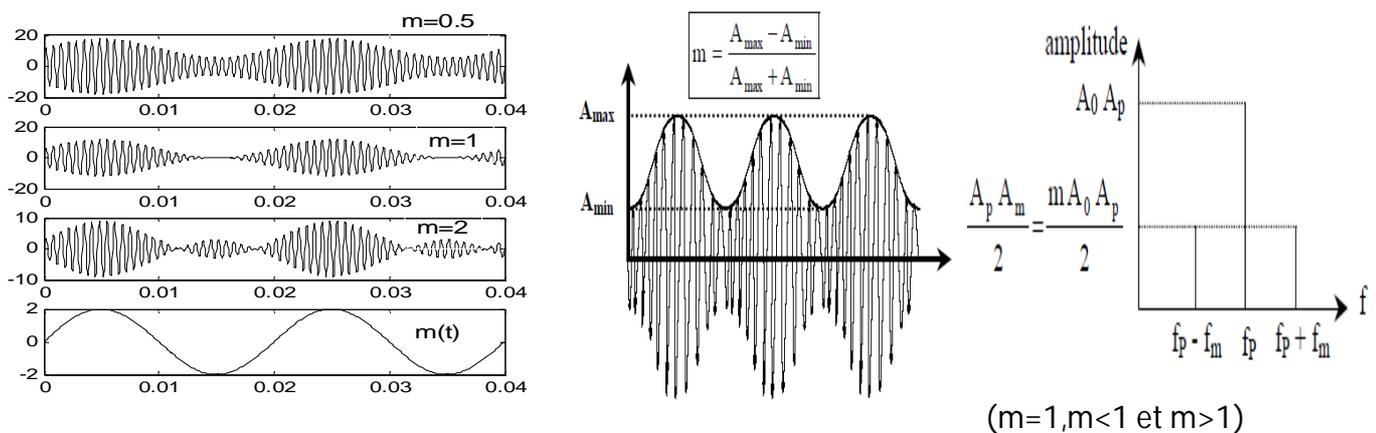
On pose  $A'_0 = A_0 U_0$ ,  $m = \frac{A_m}{U_0}$  est appelé **indice de modulation** (ou profondeur de la modulation), généralement exprimé en %.

Alors le signal  $s(t)$  s'écrit :

$$s(t) = A'_0 (1 + m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_p t) \quad (6)$$

**Pour une bonne modulation il faut que  $0 < m \leq 1$ , Si  $m > 1$ , on parle de sur-modulation.**

La figure 5, montre les trois cas possibles d'une modulation avec porteuse conservée.



**Fig.5.** Représentation des trois allures des signaux modulés en amplitude avec porteuse conservée ainsi que son spectre

## Remarque

Le signal porteur de l'onde de modulation d'amplitude ne transmet aucune information. Ceci est évident du fait que la composante porteuse reste constante en amplitude et en fréquence peu importe ce que fait le signal de modulation. Donc aucune information n'est véhiculée par la porteuse.

### 3. Les techniques de la modulation AM

Les techniques de modulation AM sont classées en deux grandes catégories :

- Modulation par produit entre deux signaux : message (BF) et porteur (HF) (multiplieur AD633).
- Modulation directe d'un oscillateur

Dans ce TP on s'intéresse à la modulation par produit, en utilisant le circuit multiplieur AD633 donné dans la figure 4.

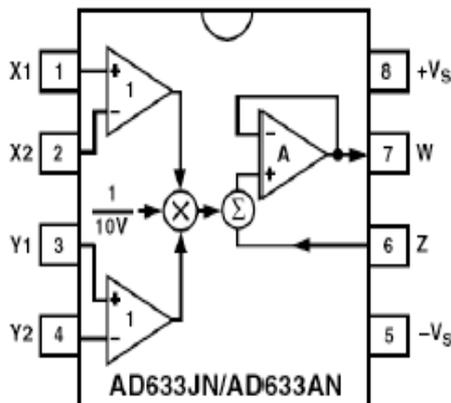


Fig.6. Circuit interne de l'AD633

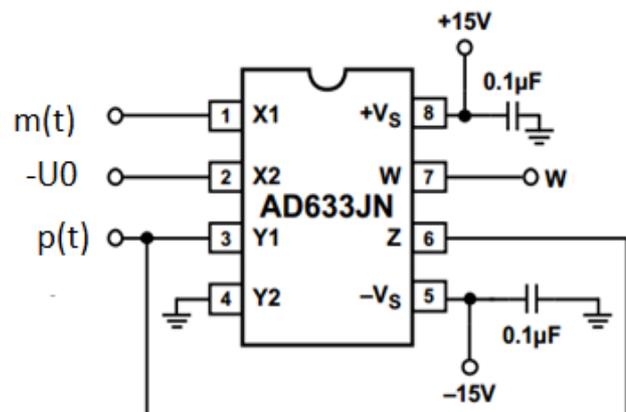


Fig.7. Schéma d'un circuit de modulation d'amplitude avec porteuse conservée utilisant le multiplieur AD633JN

#### Caractéristiques techniques

- Alimentation :  $+/-8\text{ V} < +/-V_{cc} < +/-18\text{ V}$
- Tensions en entrée :  $-10\text{ V} < X, Y < +10\text{ V}$
- Fréquence : **10 Hz à 5 MHz**
- Température de stockage :  $-65^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$
- Température de fonctionnement  $0^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$

On note que le multiplieur AD633 multiplie les tensions qui lui sont appliquées à ses entrées: X1, X2, Y1, Y2, Z. Donc il peut recevoir jusqu'à 5 tensions différentes. La tension de sortie W est fonction des 5 tensions d'entrées. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$W = \frac{[(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)]}{10} + Z \quad (7)$$

Quand les bornes X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub> et Z sont reliées à la masse, on obtient la formule simplifiée du signal de sortie :

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10} \quad (8)$$

**Remarque** : Le dénominateur 10 correspond au facteur multiplicateur k de l'AD633. C'est-à-dire k=10.

A partir de la figure 7, la tension de sortie W du multiplieur est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{(m(t) + U_0)(p(t))}{10} + p(t) \quad (9)$$

La relation peut être écrite sous la forme suivante :

$$W = p(t) \left( \frac{(m(t) + U_0)}{10} + 1 \right) = \frac{p(t)}{10} [U_0 + 10 + m(t)] \quad (10)$$

$$\text{On pose : } E_0 = U_0 + 10, \quad W = \frac{p(t)E_0}{10} \left( 1 + \frac{m(t)}{E_0} \right) \quad (11)$$

Si  $m(t) = A_m \sin(\omega_m t)$  et  $p(t) = A_p \sin(\omega_p t)$  alors l'indice de modulation est donné par la relation suivante :

$$W = A'_p (1 + m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_p t) \quad (12)$$

Avec

$$m = \frac{A_m}{E_0} = \frac{A_m}{U_0 + 10} \quad \text{et} \quad A'_p = \frac{A_p(U_0 + 10)}{10}$$

On constate que la relation (12) exprime bien une modulation d'amplitude AM avec porteuse conservée.

#### 4. Travail demandé

##### 4.1. Modulation à base de circuit AD633J

###### a. Etude théorique

Sachant que le signal modulé en amplitude avec porteuse conservée s'exprime :

$$s(t) = A'_p \cdot [1 + m \cdot \cos(\Omega_m t)] \cos(\omega_p t)$$

Avec:  $A'_p = A_p \cdot A_m \cdot K$

1. Tracer le spectre d'amplitude du signal
2. Donner l'expression de la puissance totale, de la porteuse ainsi que celle des raies
3. Refaire le même travail avec un signal modulé en amplitude sans porteuse conservée.

###### b. Etude pratique

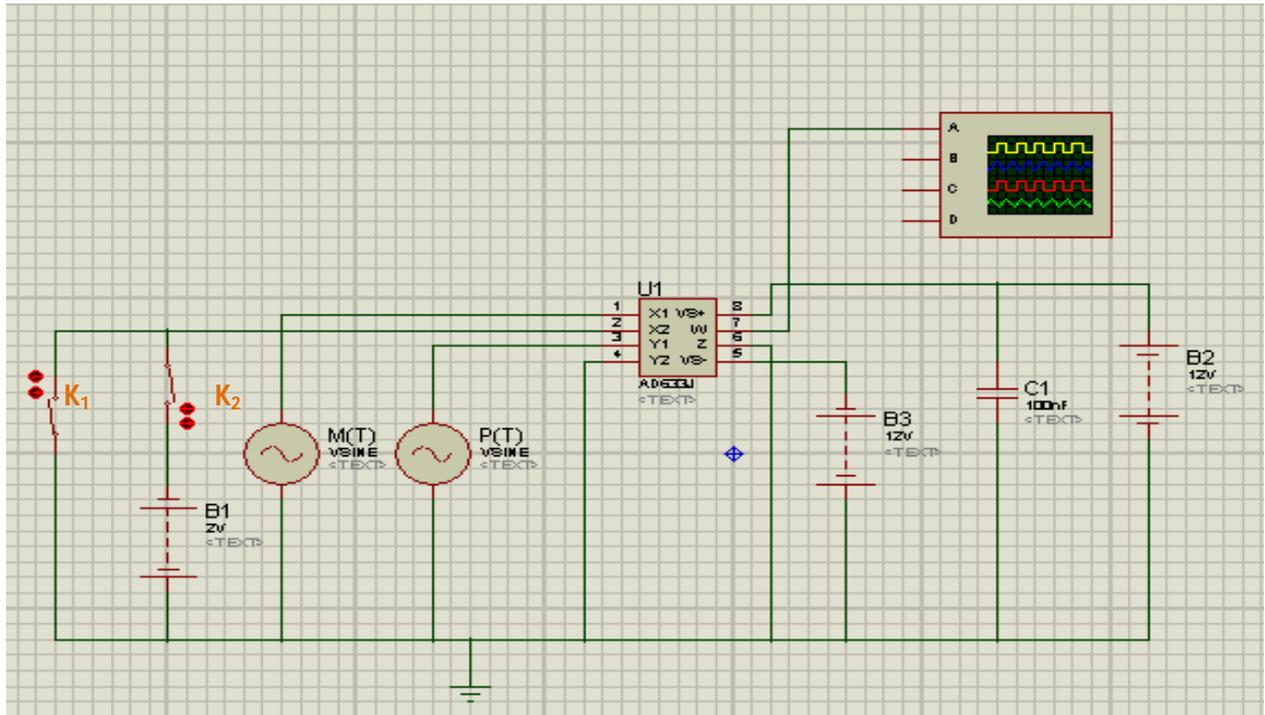
✚ Réaliser le circuit de la figure 8. On donne  $f_m = 1 \text{ KHz}$ ,  $f_p = 50 \text{ KHz}$ .

###### a. Modulation sans porteuse conservée

⇒  $K_1$  fermé et  $K_2$  ouvert       $U_0 = 0$

[1] Visualiser le signal de sortie sur oscilloscope.

[2] Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.



**Fig.8.** Circuit de modulation AM à base de l'AD633J.

**b. Modulation avec porteuse conservée**

⇒ **K<sub>1</sub> ouvert et K<sub>2</sub> fermé**      **U<sub>0</sub> ≠ 0**

✚ **Première cas:**  $m < 1$

**Pour U<sub>0</sub>=2V, A<sub>m</sub>=1.5V, A<sub>p</sub>=5V**

- [1] Visualiser le signal de sortie sur l'oscilloscope.
- [2] Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.
- [3] En utilisant le modèle du trapèze calculer l'indice de modulation.
- [4] Refaire le même travail pour **U<sub>0</sub>=2V, A<sub>m</sub>=1 V, A<sub>p</sub>=5V**

✚ **Deuxième cas:**  $m > 1$

**Pour U<sub>0</sub>=2V, A<sub>m</sub>=2.5V, A<sub>p</sub>=5V**

- [1] Visualiser le signal de sortie sur l'oscilloscope et donner des remarques
- [2] Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.
- [3] En utilisant le modèle du trapèze calculer l'indice de modulation.

## 4.2. Modulation à base de transistor bipolaire

Dans cet essai nous avons utilisé un transistor JFET 2N3819 à canal N. Le JFET est polarisé à l'aide d'une méthode d'auto-polarisation. Le signal modulant ( $V_m$ ) est appliqué à la grille du transistor JFET via le condensateur de couplage C3. Le signal porteur ( $V_p$ ) est appliqué au modulateur via le condensateur de couplage C4 sur la source du transistor JFET. Un réservoir résonant LC qui résonne à la fréquence du signal porteur est connecté au drain. La sortie est relevée du drain via la résistance de charge  $R_L$  et le condensateur de couplage C2.

Le schéma de circuit du modulateur AM simple basé sur un transistor JFET est présenté ci-dessous.

$$\text{Avec } V_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t), \text{ et } V_m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (13)$$

Le JFET a une caractéristique I-V selon l'équation :

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_{PO}}\right)^2 \quad (14)$$

Comme nous le remarquons la relation entre  $I_D$  et  $V_{GS}$  est non linéaire donc le JFET agit comme un dispositif de loi carrée (Voir figure).

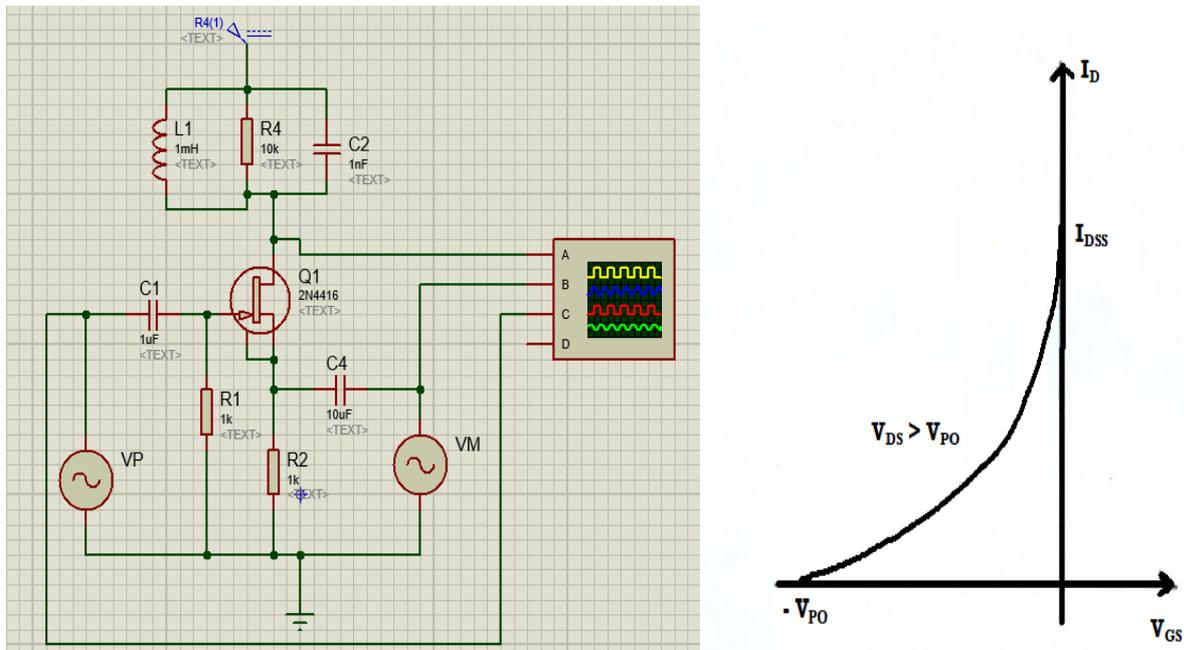


Fig.9. Circuit de modulation AM à base de JFET2N4416.

En utilisant la loi de Kirchoff dans la maille grille-source on obtient :

$$V_{GS} = V_P - \beta V_M \quad (15)$$

Avec  $\beta$  représente la proportion de  $V_M$  qui apparait à au bornes de la capacité  $C_3=100\text{nF}$ . Il n'y a pas de chute de tension à travers la capacité  $C_1$  et la résistance  $R_1$  puisque le courant de la grille est presque nulle.

Pour simplifier le calculs, supposons que toutes amplitudes soient égale à 1V. Donc  $I_{DSS} = V_{Po} = A_P = A_m = 1$

Par la suite  $I_D \alpha (1 + V_P + V_M)^2$  ; où  $\alpha$  est le signe de proportionnalité.

$$\alpha [1 + 2(V_P + V_M) + V_P^2 + 2V_P V_M + V_M^2] \quad (16)$$

$$\alpha [1 + 2 \cos(2\pi f_p t) + 2 \cos(2\pi f_m t) + \cos^2(2\pi f_p t) + 2 \cos(2\pi f_p t) \cos(2\pi f_m t) + \cos^2(2\pi f_m t)] \quad (17)$$

Le circuit LC agit comme un filtre passe-bande car il a une résonance autour  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 0.6310^6 \text{rad/s}$  ou  $f = 10^5 \text{Hz}$ , donc  $\omega_p = 0.6310^6 \text{rad/s}$  si le filtre doit faire son travail.

Toutes les autres composantes de fréquence dans  $I_D$  seront bloquées par le filtre LC.

**Remarque** : On doit assurer que la fréquence  $f_p$  soit toujours plus grande que  $f_m$  afin d'assurer une modulation AM correcte.

### 4.3. Travail demandé

#### a. Etude théorique

1. Expliquer le rôle de  $R_4$ ,  $L$  et  $C_2$  du circuit résonnant et les valeurs assurant le bon fonctionnement du modulateur.
2. Déterminer les caractéristiques : directe et de transfert. Déduire par la suite les valeurs de  $I_D$ ,  $V_{DS}$  et  $V_{GS}$  équivalentes au point de fonctionnement.
3. Par calcul théorique, expliquer le principe de fonctionnement du circuit en JFET comme circuit modulateur.

### **b. Etude pratique**

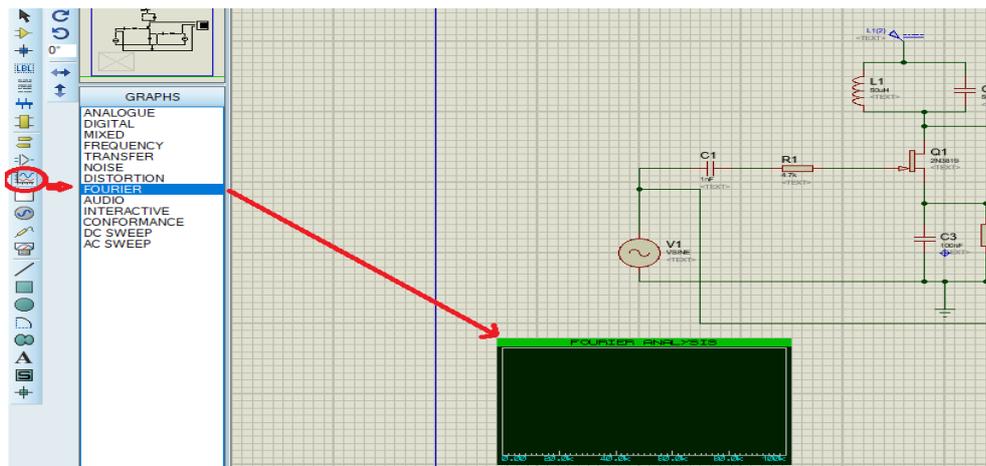
1. Ajuster la fréquence du signal modulant à 300Hz et son amplitude à 0.25V. Relever le signal à la sortie du modulateur,
2. Faire varier l'amplitude  $A_m$  de 0.15 à 2V, calculer l'indice de modulation  $m$  pour chaque valeur et commenter les résultats enregistrés,
3. Pour  $A_m=3V$ , relever la forme du signal de sortie. Expliquer le résultat obtenu,
4. Fixer l'amplitude  $A_m=0.5V$ , et pour  $f_m$  variant de 50Hz à 15 KHz mesurer l'indice  $m$  pour chaque fréquence. Tracer par la suite la courbe  $m=f(f_m)$  et donner une explication.

## Annexe : Analyse fréquentielle (FFT) et Digramme de Bode

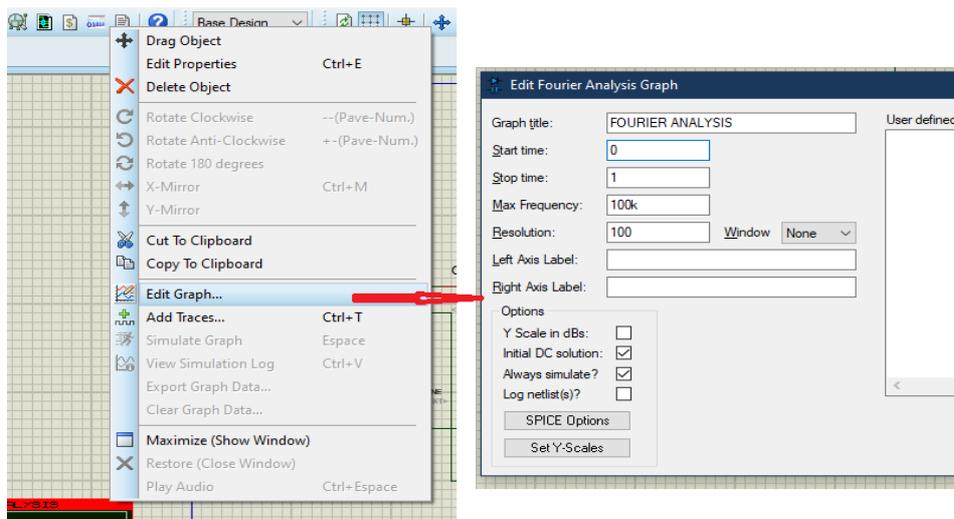
### 4.1. Analyse fréquentielle

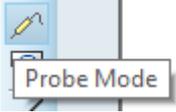
Pour analyser le contenu fréquentiel d'un signal :

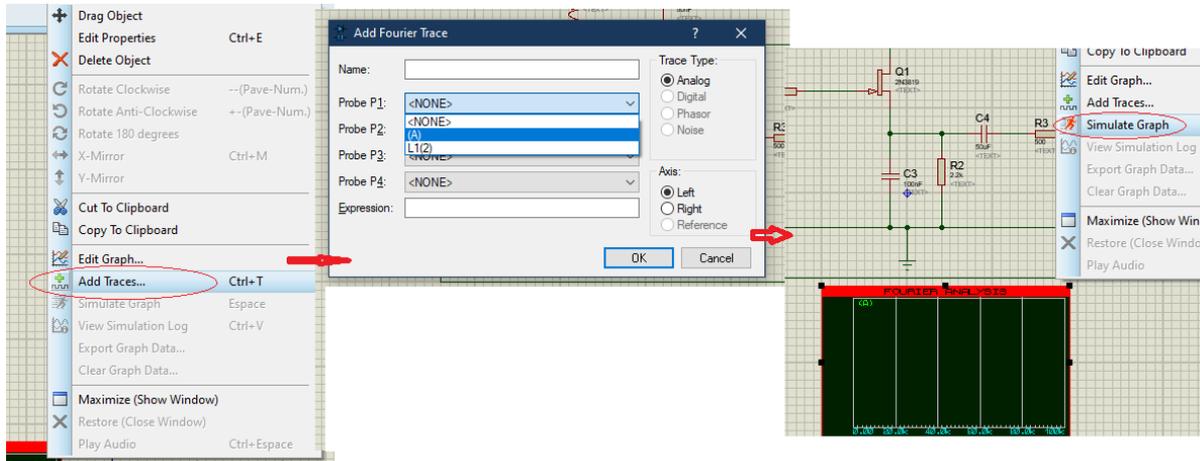
5. Configurez le circuit comme pour une analyse transitoire.
6. Ajoutez un graphique de Fourier à la conception et faites glisser les sondes connectées aux points d'intérêt sur celui-ci.



7. En cliquant sur l'option « Edit graph » Choisissez les temps de début et de fin et les valeurs de fréquence/résolution en fonction du signal que vous analysez. Il soit préférable de choisir un intervalle de temps et une résolution de fréquence qui correspondent à la fréquence fondamentale du signal analysé.



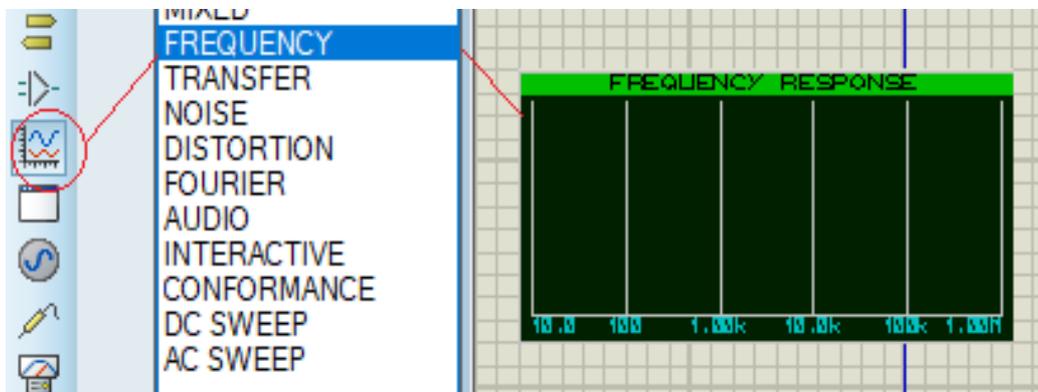
8. Appuyez sur la l'icone  pour placer une sonde de tension (voltage) à la sortie qu'on désire visualiser.
9. Pour visualiser cette tension cliquer sur « add traces » pui lancer la simulation



**Remarque:** Si le temps de début et de fin sont est le même pour les graphiques transitoires et de Fourier, PROSPICE n'aura pas besoin de resimuler le circuit entre les analyses transitoires et de Fourier. Au lieu de cela, ISIS effectuera simplement une FFT sur les données du domaine temporel existantes.

#### 4.2. Tracé du diagramme de Bode

Pour tracer le diagramme de Bode répétez les mêmes étapes que pour l'analyse fréquentielle sauf cette fois-ci vous choisissez le plot « Ferquency ».



## Rapport De TP N°03

Groupe : .....

-Modulation AM à base de circuit AD633J-

Date : .....

Noms /prénoms

1) ..... 3) .....  
2) ..... 4) .....

### A. Etude théorique

1. Tracer le spectre d'amplitude du signal

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2. Donner l'expression de la puissance totale, de la porteuse ainsi que celle des raies

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. Refaire le même travail avec un signal modulé en amplitude sans porteuse conservée

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## B. Etude pratique

### a. Modulation d'amplitude sans porteuse conservée

**$K_1$  fermé et  $K_2$  ouvert**       **$U_0=0$**

- Visualiser le signal de sortie sur l'oscilloscope.
- Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### c. Modulation avec porteuse conservée

**$K_1$  ouvert et  $K_2$  fermé**       **$U_0 \neq 0$**

**Première cas:**  $m < 1$

**$U_0=2V, A_m=1.5V, A_p=5V$**

- Visualiser le signal de sortie sur oscilloscope.
- Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.

.....

.....

.....

.....

.....

- En utilisant le modèle du trapèze calculer l'indice de modulation.

.....

.....

.....

.....

- Refaire le même travail pour  $U_0=2V, A_m=1 V, A_p=5V$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**Deuxième cas:  $m>1$**

**$U_0=2V, A_m=2.5V, A_p=5V$**

- Visualiser le signal de sortie sur oscilloscope et donner des remarques
- Tracer le spectre du signal et déduire les fréquences de la porteuse ainsi que celle du signal message.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- En utilisant le modèle du trapèze calculer l'indice de modulation

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- Donner vos remarques et la conclusion sur les différents cas étudiés

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....







.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

c. Pour  $A_m=3V$ , relevez la forme du signal de sortie. Expliquer le résultat obtenu

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

d. Fixer l'amplitude  $A_m=0.5V$ , et pour  $f_m$  variant de 50Hz à 15 KHz mesurer l'indice  $m$  pour chaque fréquence. Tracer par la suite la courbe  $m=f(f_m)$  et donner une explication.

Fréquence													
Indice « m »													

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## Travail d'orientation

---

Utilisez le montage à transistor JFET pour moduler un signal complexe. Le signal modulant sera constitué de deux signaux sinusoïdaux (ou plus) de fréquences distinctes.

1. Configurez un générateur de signaux pour produire un signal complexe constitué de deux sinusoïdes de fréquences différentes (par exemple, 1 kHz et 2 kHz). - Configurez un générateur RF pour fournir la porteuse (par exemple, une fréquence de 100 kHz).
2. Visualisez les signaux d'entrée (signal modulant complexe et porteuse) et observez le signal de sortie modulé en amplitude sur l'oscilloscope et identifiez les variations d'amplitude en fonction du signal modulant.
3. Utilisez l'analyseur de spectre pour observer le spectre du signal modulé. Identifiez les composantes de la porteuse, des bandes latérales supérieure et inférieure, ainsi que les fréquences liées à chaque signal modulant.
4. Calculez la bande passante du signal AM en tenant compte des fréquences des signaux modulants.
5. Démoduler le signal et comparer le résultat obtenu avec ce obtenu pour un signal unique
6. Essayez de moduler le signal complexe en utilisant un circuit à transistor bipolaire

## TP 04 : Démodulation d'Amplitude

### 1. But de TP

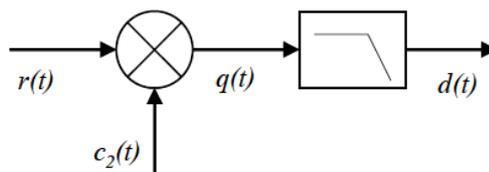
Le but visé à travers ce TP est d'approfondir la compréhension et la mise en pratique de la démodulation d'amplitude par détection d'enveloppe.

### 2. Rappels théoriques

Démoduler un signal revient à extraire le signal informatif (BF) encapsulé dans l'onde modulée en amplitude. Deux techniques de démodulation AM se démarquent :

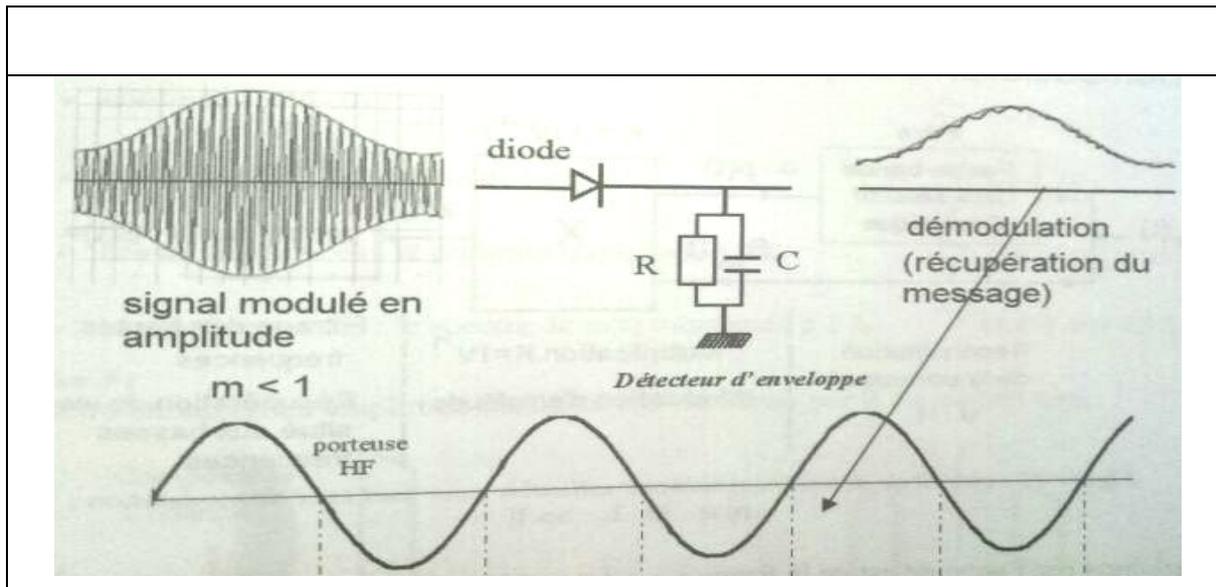
#### Démodulation cohérente

Ce processus de démodulation s'articule autour de la multiplication du signal modulé  $r(t)$  par un signal oscillant  $c_2(t)$ , parfaitement synchronisé avec la porteuse. Ce signal d'oscillation, souvent désigné comme l' "oscillateur local", agit comme une référence de phase, facilitant la récupération du signal d'origine. La résultante de cette multiplication présente ensuite une composante à fréquence double, dont le filtrage ultérieur au moyen d'un filtre passe-bas permet d'isoler le signal désiré  $d(t)$ . Ce dernier se révèle alors être une représentation fidèle du signal modulant d'origine, offrant ainsi une démodulation précise et efficace.



#### Démodulation par détection d'enveloppe

En modulation à porteuse conservée, lorsque l'indice de modulation  $m$  est inférieur à 1, l'information essentielle réside dans l'enveloppe du signal. Dans ce contexte, la détection d'enveloppe devient une technique privilégiée, offrant une alternative économique par rapport à la détection synchrone, car elle ne requiert pas l'utilisation d'un oscillateur local. Cette approche s'avère ainsi plus économique et plus accessible, tout en permettant une récupération efficace de l'information désirée.



Le choix des valeurs de résistance (R) et de capacité (C) dans un circuit de démodulation est crucial pour garantir une performance optimale. Voici quelques critères à prendre en compte lors de ce choix :

- Le temps de décharge du condensateur doit être grand devant la période de la porteuse (on veut limiter l'ondulation).
- La décharge ne doit pas être trop lente car la tension aux bornes de C pourrait quitter l'enveloppe, et donner ainsi une image fautive du modulant.
- Atténuation des fréquences indésirables: Le filtre doit atténuer efficacement les fréquences indésirables, telles que les harmoniques de la porteuse, pour éviter toute interférence.
- La combinaison R et C détermine la constante de temps du circuit  $\tau = RC$ . La constante de temps influence la réponse en fréquence du circuit et, par conséquent, la bande passante du filtre passe-bas associé. La constante du temps RC doit respecter la condition suivante:

$$f_m < 1/RC < < f_p \quad (1)$$

Donc le choix de R et C doit être basé sur une analyse approfondie des spécifications du système, en tenant compte des caractéristiques électriques souhaitées et des contraintes d'application.

### 3. Travail demandé

#### a. Etude théorique

- 1) Tracer le spectre du signal avant et après la diode ?
- 2) Calculer la fréquence de coupure du filtre RC permettant la récupération du signal informatif (poser  $R=10k\Omega$ ).
- 3) La condition citée par l'équation (1) est-elle vérifiée ? sinon redimensionner RC
- 4) Est-il possible de récupérer un signal modulé AM lorsque  $m>1$  ?

#### b. Etude pratique

1. En utilisant une diode de type 1N4148, relier le circuit de démodulation avec le circuit de modulation (à la sortie du modulateur AM).
2. Relever la forme et la fréquence du signal à la sortie du démodulateur :
  - $K_1$  fermé  $K_2$  ouvert
  - $K_1$  fermé  $K_2$  ouvert

Donner vos remarques

3. Changer la capacité par une autre de 1nF puis 22nF 47nF. Quelles sont vos remarques sur le signal de sortie pour chaque valeur de capacité.

Groupe : .....

## Rapport De TP N°05

Date : .....

Noms /prénoms

« Démodulation d'Amplitude »

3) ..... 3) .....  
4) ..... 4) .....

### A. Etude théorique

1) Tracer le spectre du signal avant et après la diode ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2) Calculer la fréquence de coupure du filtre RC permettant la récupération du signal  $f_m$

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3) La condition (1) est elle vérifiée ? Sinon redimensionner RC

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

4) Est-il possible de récupérer un signal modulé AM lorsque  $m > 1$  ? Expliquer

.....  
.....  
.....  
.....

## B. Etude pratique

- Connecter le circuit de démodulation ou circuit modulation.

Cas :  $K_1$  fermé et  $K_2$  ouvert

1. Relevé le signal de sortie sur l'oscilloscope

.....  
.....  
.....  
.....

Cas :  $K_1$  ouvert et  $K_2$  fermé

2. Relevé le signal de sortie sur l'oscilloscope

.....  
.....  
.....  
.....

- Donner vos remarques pour chaque cas

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. Changer la capacité par une autre de 1nF, 22nF puis 47nF. Quelles sont vos remarques sur le signal de sortie pour chaque valeur de capacité

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## TP05 : Modulation de Fréquence FM

### 1. But de TP

Le but de ce TP est double :

#### a. Génération de la Modulation de Fréquence (FM) par VCO

- Mettre en œuvre la génération de la modulation de fréquence en utilisant un Voltage-Controlled Oscillator (VCO),
- Comprendre le fonctionnement du VCO dans le contexte de la modulation de fréquence,
- Explorer les paramètres de réglage du VCO pour moduler la fréquence du signal porteur.

#### b. Évaluation de l'Effet du Changement de l'Amplitude et de la Fréquence du Signal Modulant

- Analyser l'impact de variations d'amplitude du signal modulant sur l'indice de modulation,
- Étudier comment des changements dans la fréquence du signal modulant influent sur la bande passante du signal modulé,
- Examiner les relations entre l'amplitude et la fréquence du signal modulant, l'indice de modulation, et la largeur de bande de la modulation de fréquence.

### 2. Méthode de génération de la modulation FM

La génération de la modulation de fréquence (FM) peut être réalisée selon diverses méthodes, parmi lesquelles figurent les suivantes :

- **A partir de la modulation des paramètres d'un circuit oscillant accroché (Oscillateur LC)** : cette approche implique la modulation des paramètres d'un circuit oscillant, tel qu'un oscillateur LC (inductance-capacité), pour obtenir une modulation de fréquence. En ajustant les composants du circuit, notamment

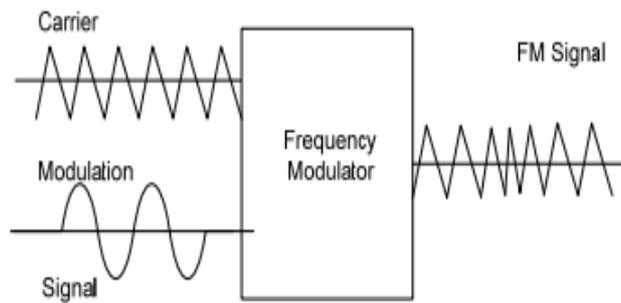
l'inductance et la capacité, la fréquence de l'oscillateur varie en réponse au signal modulant.

- **A partir des signaux non sinusoïdaux (Trigger)** : dans ce cas la modulation FM est obtenue en utilisant des signaux non sinusoïdaux, parfois appelés signaux de déclenchement (Trigger). Ces signaux présentent des formes d'onde plus complexes que les ondes sinusoïdales traditionnelles, ce qui conduit à une modulation de fréquence caractéristique.
- **Modulation par méthode par modulateur d'Armstrong** : La méthode d'Armstrong, du nom de l'inventeur **Edwin Howard Armstrong**, est une approche spécifique de la génération de la modulation FM. Elle repose sur l'utilisation d'un oscillateur piloté en tension (VCO), dont la tension d'entrée est modulée pour obtenir une variation proportionnelle de la fréquence de sortie.

Les méthodes citées offrent des approches diverses pour atteindre la modulation de fréquence en modifiant les paramètres des circuits oscillants ou en utilisant des signaux de déclenchement spécifiques. Chacune de ces techniques, présente des avantages et des applications spécifiques en fonction des besoins du système et des caractéristiques de la modulation FM souhaitée.

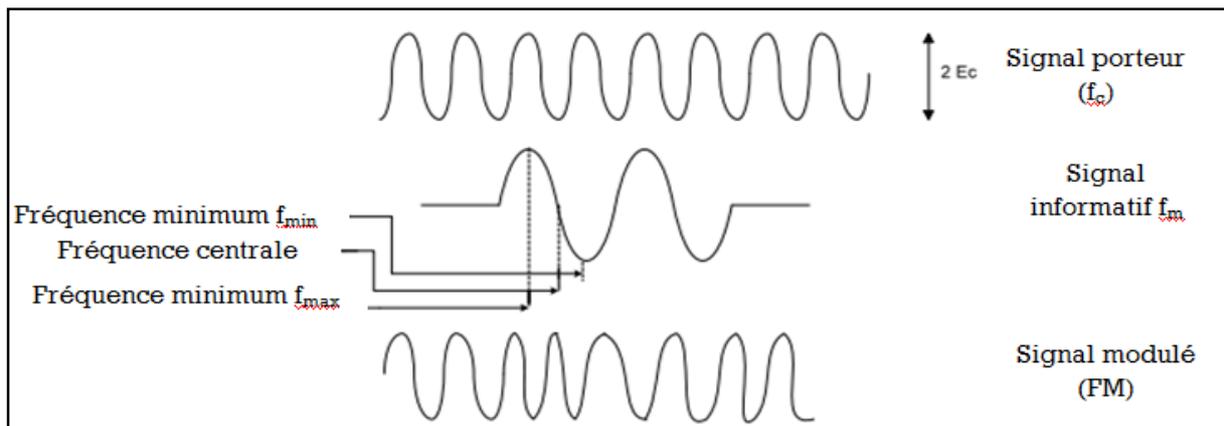
### **3. Rappels Théoriques**

Dans son principe, la fréquence du signal porteur varie en fonction de l'amplitude du signal informatif (voir figure 1). L'avantage de la modulation de fréquence est que le signal peut être transmis sans aucune distorsion et bruit car les variations de fréquence sont moins sensibles aux interférences que les variations d'amplitude directe. La variation proportionnelle de la fréquence en réponse à l'amplitude du signal informatif permet aussi une représentation fidèle du contenu informationnel. Donc signifie que la modulation de fréquence, en variant la fréquence du signal porteur en fonction de l'amplitude du signal modulant de manière linéaire, permet de transmettre le contenu informatif original de manière précise et sans altération significative.



**Fig.1.** Principe de la modulation FM par oscillateur

Si on change l'amplitude du signal modulant ( $f_m$ ), la fréquence d'entrée de l'oscillateur peut changer. La tension de sortie du VCO est directement liée à la fréquence de l'onde générée. Ainsi, lorsque la tension d'entrée du VCO varie en réponse au signal modulant, la fréquence de l'onde générée par le VCO varie de manière proportionnelle. La forme du signal modulé en fréquence est donnée dans la figure 2 :



**Fig.2.** Forme du signal modulé en fréquence

Dans le cas où le signal modulant est sinusoïdal et de fréquence  $f_m$  le signal transmis s'écrit sous la forme:

$$s(t) = A_c \cos (2\pi f_c t + \beta \sin 2\pi f_m t) \quad (1)$$

Avec  $A_c$  et  $f_c$  représentent, respectivement, l'amplitude et la fréquence de la porteuse.  $\beta$  : C'est l'indice de modulation.

La décomposition de  $s(t)$  conduit à :

$$s(t) = A_c [\cos(2\pi f_c t) \cos(\beta \sin 2\pi f_m t) - \sin(2\pi f_c t) \sin(\beta \sin 2\pi f_m t)] \quad (2)$$

Cette décomposition fait apparaître deux termes qui sont :

$$\mathbf{f(t) = \cos(\beta \sin 2\pi f_m t)} \quad (3)$$

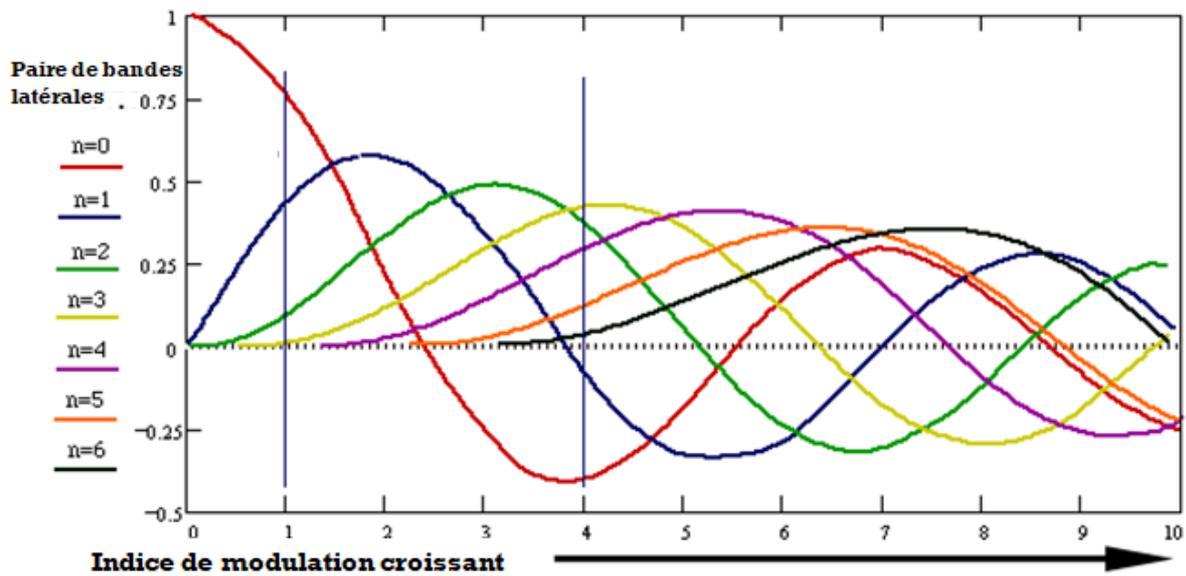
$$\mathbf{g(t) = \sin(\beta \sin 2\pi f_m t)} \quad (4)$$

En se basant sur les propriétés de  $f(t)$  et  $g(t)$  et après développement en série de Fourier et distribution des différents termes on obtient :

$$\begin{aligned} s(t) = & \\ & A_c [J_0(\beta) \cos(2\pi f_c t) + J_1(\beta) [\cos 2\pi(f_c - f_m)t - \cos 2\pi(f_c + f_m)t] + \\ & J_2(\beta) [\cos 2\pi(f_c - 2f_m)t - \cos 2\pi(f_c + 2f_m)t] + J_3 [\cos 2\pi(f_c - 3f_m)t - \cos 2\pi(f_c + 3f_m)t] + \\ & \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Les fonctions  $J_0(\beta)$ ,  $J_1(\beta)$ ,  $J_2(\beta)$  ... sont les fonctions de Bessel. Lorsqu'on modélise mathématiquement la variation de fréquence dans la modulation FM, on utilise souvent une expansion en série de fonctions de Bessel. Ces fonctions apparaissent dans le développement de la réponse en fréquence du signal modulé, permettant d'analyser les bandes latérales. Les différents ordres de fonctions de Bessel sont utilisés pour modéliser les différents composants fréquentiels du signal modulé. Ces fonctions sont données par des tables qui est vaste et dépend de l'ordre de la fonction (entier ou demi-entier) ainsi que du type de fonction de Bessel (Bessel de première espèce, de deuxième espèce, sphérique, etc.) (Revoir le cours pour plus de détails).

La représentation graphique de la variation de leurs modules, en fonctions de l'indice de modulation  $\beta$  est donnée dans la figure suivante :



**Fig.3.** Variation des modules des fonctions de Bessel en fonction de  $\beta$

La décomposition spectrale d'un signal modulé (sinusoïdalement) en fréquence fait donc apparaître :

- a) Une composante sinusoïdale, à la fréquence de la porteuse et d'amplitude  $|J_0(\beta)|$
- b) Une infinité de composantes latérales de fréquences  $(f_c - nf_m)$  et  $(f_c + nf_m)$  et d'amplitude  $J_n(\beta)$

La figure 4 donne un exemple de décomposition spectrale (cas où  $\beta = 2$ )

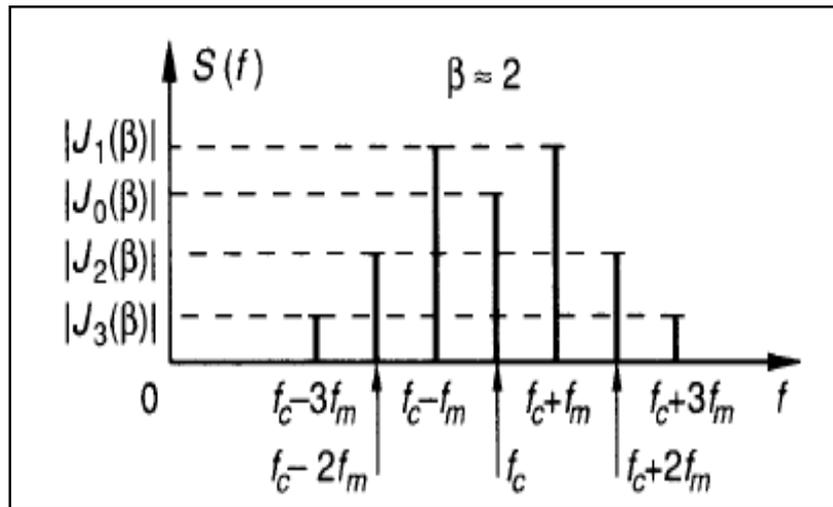


Fig.4. décomposition spectrale d'un signal FM

Dans le cas où  $\beta < 1$  on parle de **modulation FM à bande étroite ou à faible profondeur.**

#### 4. Méthodes de génération de la modulation FM

Il existe essentiellement deux méthodes de base pour générer un signal modulé en fréquence, à savoir la FM directe et la FM indirecte. En FM directe, le signal porteur varie directement en fonction du signal de bande de base d'entrée, ce qui est facilement réalisé à l'aide d'un oscillateur commandé en tension (le cas dans ce TP). Dans la méthode indirecte, le signal modulant est d'abord utilisé pour produire une bande étroite. Le signal FM et la multiplication de fréquence sont ensuite utilisés pour augmenter l'écart de fréquence jusqu'au niveau souhaité. La méthode indirecte est le choix privilégié pour la FM lorsque la stabilité de la porteuse est une préoccupation majeure, comme dans la radiodiffusion commerciale.

#### 5. Travail demandé

##### 4.1. Etude théorique

- 1) Qu'est-ce que la modulation de fréquence (FM) et en quoi diffère-t-elle de la modulation d'amplitude (AM)?
- 2) Expliquez le principe fondamental derrière la modulation de fréquence.

- 3) Comment l'indice de modulation ( $m$ ) influence-t-il la déviation maximale de fréquence?
- 4) Qu'est-ce que la notion de bande latérale dans le contexte de la FM?
- 5) Expliquez le rôle d'un Voltage-Controlled Oscillator (VCO) dans la modulation de fréquence.
- 6) Donner quelques applications de la modulation FM

#### 4.2. Etude pratique

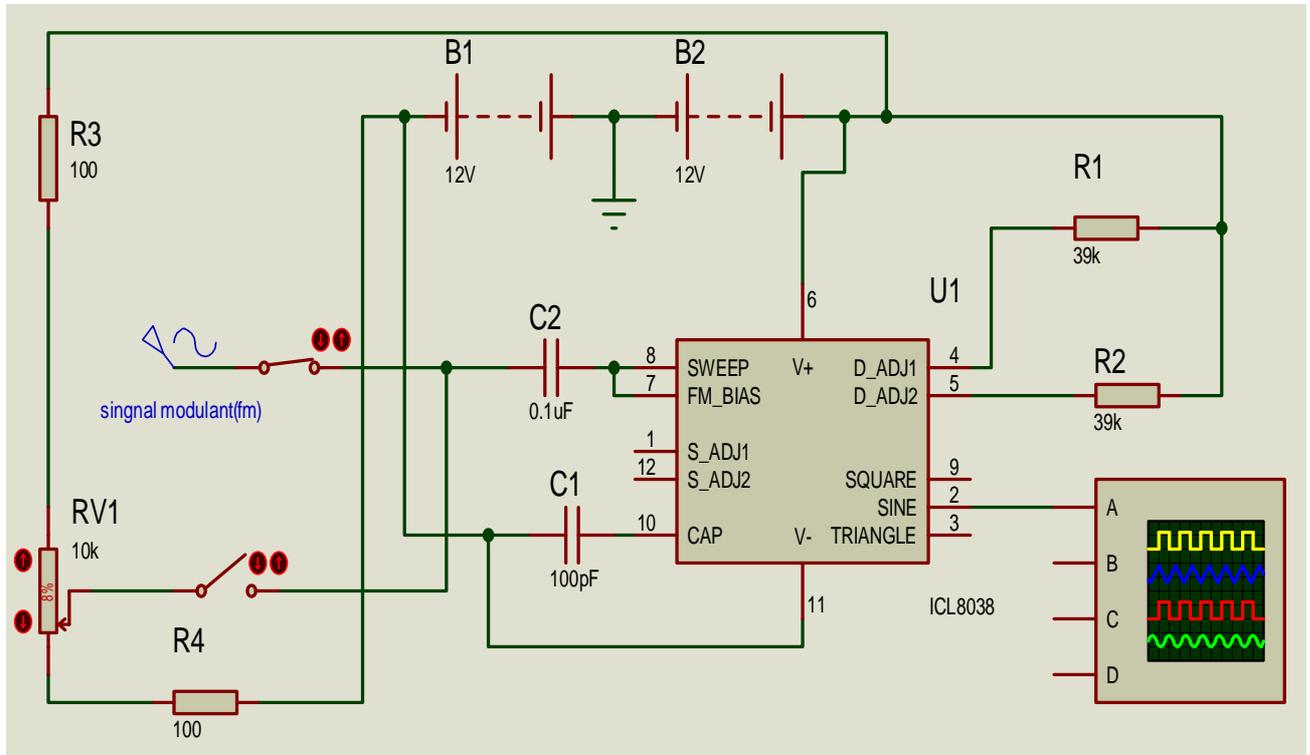
- a) A l'aide du circuit ICL8038, qui est un VCO (Voltage Controlled Oscillator) universel, réaliser le circuit de modulation FM donné dans la figure 5.
- b) Sans appliquer le signal modulant ( $f_m$ ), observer le signal porteur au niveau de la pin2. Mesurer son amplitude et sa fréquence ( $f_c$ ).
- c) A l'aide du potentiomètre RV1 :
  - Etudier l'effet de la variation tension de polarisation sur la fréquence du VCO
  - Remplir le tableau 1 et déduire par la suite  $f_{max}$ ,  $f_{min}$ , et la fréquence centrale. ( $f_{max}$  est la fréquence équivalent au maximum du RV1 tandis que le  $f_{min}$  est équivalent au minimum du RV1 et la fréquence centrale se calcul au milieu du RV1)
  - A partir du tableau, tracer la caractéristique fréquence-tension du VCO

Tension						
Fréquence						

**Tableau 1-** Effet de la tension sur la fréquence du VCO

- d) Appliquer maintenant un signal modulant ( $f_m$ ) d'une fréquence de 4Khz et une amplitude de **3Vcc** au niveau du pin **7** à travers une capacité de **0.1uF**.
  - Faire augmenter la fréquence du signal modulant ( $f_m$ ) et mesurer  $f_{min}$  et la déviation maximale de fréquence  $\Delta f$  équivalentes à cette augmentation.
  - Evaluer l'indice de modulation  $\beta$  en utilisant l'expression  $\Delta f/f_m$  avec  $\Delta f = |f_c - f_{min}|$ .

- Calculer par la suite la bande passante  $BP=2(\beta+1)f_m=2(\Delta f + f_m)$  (tableau 2)
- Répétez les questions d.1, d.2 et d.3 en faisant varier maintenant l'amplitude du signal modulant (tableau 3)



**Fig.5.** Circuit de modulation de fréquence

**Tableau 2-** Effet de la fréquence du signal modulant

$f_m$ (Khz)	$T_{max}$ ( $\mu$ s)	$f_{min}$ (Khz)	$\Delta f$ (Khz)	$\beta$	BP (Khz)

**Tableau 3-** Effet de l'amplitude du signal modulant

$A_m$ (Khz)	T ( $\mu$ s)	$f_{min}$ (Khz)	$\Delta f$ (Khz)	$\beta$	BP (Khz)

Groupe : .....

## Rapport De TP N°06

Date : .....

### Noms /prénoms

1) .....  
2) .....

3) .....  
4) .....

### A. Etude théorique

1. Qu'est-ce que la modulation de fréquence (FM) et pourquoi est-elle utilisée dans les communications?

.....  
.....  
.....  
.....

2. Comment fonctionne un discriminateur FM dans le processus de démodulation?

.....  
.....  
.....  
.....

3. Comment la sensibilité de fréquence d'un discriminateur influence-t-elle la qualité de la démodulation FM?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

4. Expliquez le rôle d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) dans la démodulation FM.

.....  
.....  
.....  
.....

## B. Etude pratique

1. Observer le signal à l'entrée et la sortie du circuit et donner vos commentaires.

.....  
.....  
.....  
.....

2. Vérifier que la constante du temps  $\tau = R_5C_3$  coïncide avec la fréquence du signal modulant (le message à l'entrée du circuit)

.....  
.....  
.....

3. Mesurer l'indice de modulation du signal modulé en amplitude (avant la diode)

.....  
.....  
.....

4. Mesurer la fréquence du signal à la sortie du démodulateur.

.....  
.....  
.....

5. Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal modulant sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

6. Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal porteur sur le signal de sortie du démodulateur (Utiliser la formule  $f_c=0.33/R_1C_1$ ). Commentez les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. Analyser l'effet du changement de l'inductance  $L_1$  sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.

.....

.....

.....

8. Donner une conclusion sur la forme du signal démodulé

.....

.....

.....

.....

.....

## TPN°06

### Etude de la Démodulation FM

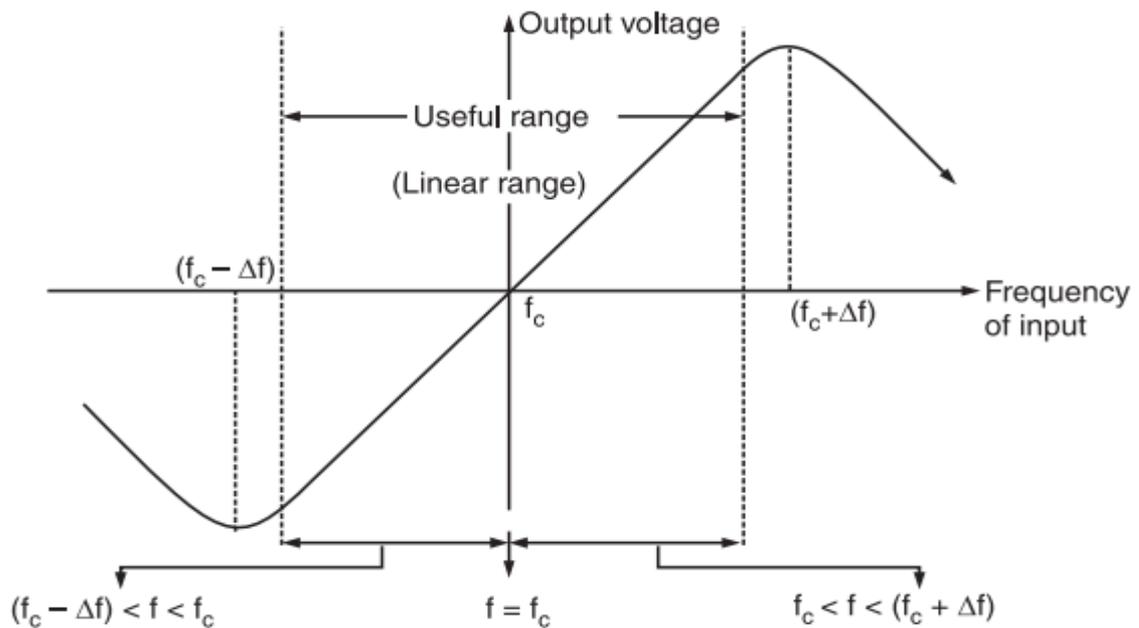
#### 1. But de TP

Etudier la démodulation de fréquence par circuit discriminateur

#### 2. Rappels théoriques

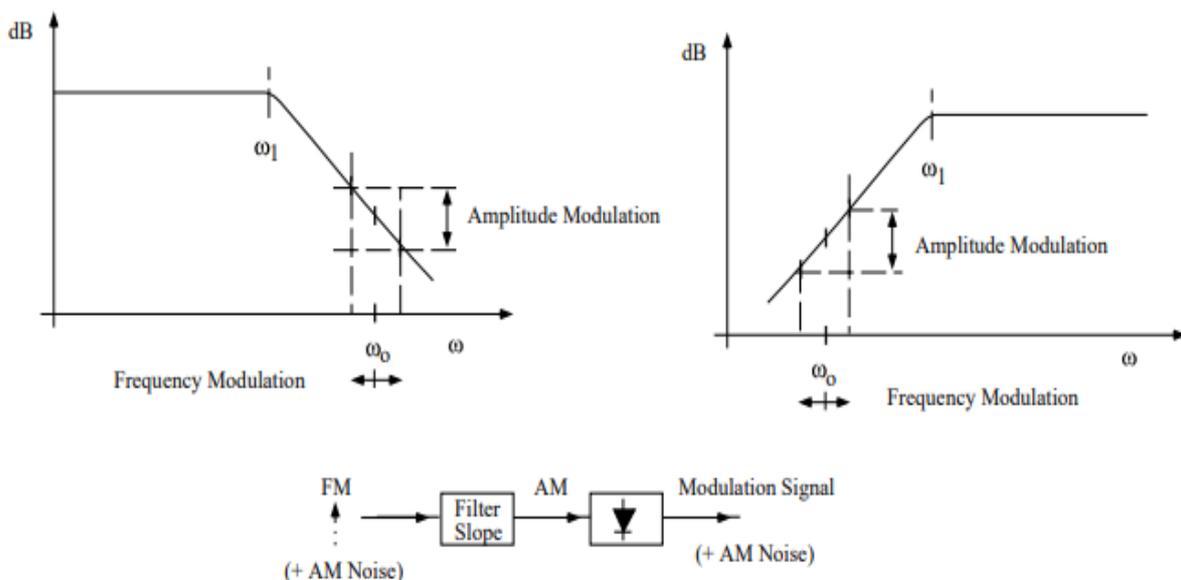
La détection FM est le secret du succès des émissions FM. Fondamentalement, on peut concevoir un détecteur FM, appelé discriminateur de fréquence, qui est insensible à toute variation d'amplitude (bruit) du signal. Il peut donc être utilisé avec des signaux faibles et peut rejeter les stations fortement interférentes.

- ✚ Les récepteurs FM partagent des similarités avec leurs homologues AM, mais se distinguent principalement par leur fréquence de fonctionnement et leur largeur de bande passante.
- ✚ La modulation différente utilisée dans les récepteurs FM nécessite une approche d'analyse opérationnelle distincte par rapport à celle des récepteurs AM.
- ✚ Contrairement à la modulation d'amplitude, la modulation de fréquence maintient une amplitude de signal constante.
- ✚ Pour extraire les variations d'amplitude du signal d'information, on exploite les changements de fréquence, permettant ainsi la reconstruction de l'amplitude du signal informatif.
- ✚ La démodulation de la modulation FM en AM s'effectue à l'aide d'un dispositif appelé "discriminateur".
- ✚ Le discriminateur transforme la modulation en fréquence en modulation d'amplitude et effectue la démodulation, produisant une sortie avec des amplitudes différentes en raison des variations de fréquence du signal d'entrée.
- ✚ Les caractéristiques du discriminateur, communément appelées courbes "S", sont illustrées dans la figure 1.



**Fig.1.** Courbe caractéristique du discriminateur de fréquence modulation de fréquence

N'importe quel filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande) peut être transformé en détecteur FM. Le signal FM est choisi pour être en région de coupure du filtre (voir figure ci-dessous) et donc tout écart de fréquence est traduit en une variation d'amplitude. Le filtre est ensuite suivi d'un détecteur AM (TP n°4) et le signal de modulation est récupéré.



**Fig.2.** Principe de la démodulation FM par détection de pente

Les caractéristiques du discriminateur, utilisé comme démodulateur FM, comprennent plusieurs aspects liés à son fonctionnement. Voici quelques-unes de ces caractéristiques :

- ✚ **Transformation FM vers AM (Détection de pente)** : L'une des principales caractéristiques est sa capacité à convertir la modulation en fréquence (FM) en modulation d'amplitude (AM). Cela permet de faciliter la démodulation ultérieure.
- ✚ **Réponse aux Variations de Fréquence** : Le discriminateur est conçu pour être sensible aux variations de fréquence du signal d'entrée. Sa capacité à suivre rapidement les changements de fréquence est une caractéristique importante pour une démodulation efficace.
- ✚ **Courbes "S" ou Caractéristiques en "S"** : Les caractéristiques du discriminateur sont souvent représentées sous la forme de courbes en "S". Ces courbes illustrent la relation entre la fréquence d'entrée et l'amplitude de la sortie (voir figure 1)
- ✚ **La Bande passante BW**: l'intervalle de fréquence dont la variation de la courbe caractéristique est linéaire.
- ✚ **La sensibilité** : définit comme étant le rapport entre la variation de la tension de sortie et la variation de la fréquence du signal de fréquence  $S = \frac{\Delta V}{\Delta f}$ . La sensibilité doit être élevée
- ✚ **La Linéarité** : La linéarité du discriminateur est essentielle pour obtenir une démodulation précise. Un discriminateur linéaire produit une sortie proportionnelle aux variations de fréquence, facilitant ainsi la reconstruction précise du signal modulant.

La variation observée dans la courbe caractéristique du discriminateur doit être linéaire idéalement. La linéarité est formulée comme suit :  $L_{in} = \left[ \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{Av}} \right]$

Avec  $S_{max}$  : la sensibilité maximum,  $S_{min}$  : la sensibilité minimum,  $S_{Av}$  : la sensibilité moyenne

Il existe plusieurs types de circuits discriminateurs utilisés pour la démodulation FM. Voici quelques-uns des types couramment rencontrés :

- ✚ **Discriminateur à Diode Varicap**: Les diodes varicaps (diodes à capacité variable) sont souvent utilisées dans les discriminateurs FM. La capacité de la diode varie en fonction de la tension appliquée, ce qui modifie la fréquence de résonance du circuit LC, entraînant une variation d'amplitude en sortie.
- ✚ **Discriminateur à Circuit LC** : Les circuits LC (bobine-condensateur) peuvent être utilisés pour la détection de fréquence. La variation de la fréquence modifie la résonance du circuit, produisant une sortie proportionnelle.
- ✚ **Discriminateur à Quadrature** : Les discriminateurs à quadrature utilisent des circuits déphasés pour détecter les variations de fréquence. Ils sont conçus pour fournir une sortie proportionnelle à la déviation de fréquence.
- ✚ **Discriminateur à Boucle à Verrouillage de Phase (PLL)** : Les boucles à verrouillage de phase peuvent également être utilisées comme discriminateurs. Elles comparent la phase du signal de sortie avec une référence et ajustent la fréquence pour maintenir la cohérence de phase.
- ✚ **Discriminateur de Travis** ou à double circuit résonnant : L'inconvénient du discriminateur est la difficulté de régler et d'ajuster deux circuits résonants.
- ✚ **Le discriminateur de Foster Seeley** : également connu sous le nom de discriminateur à transformateur à noyau en ferrite, est un type spécifique de circuit discriminateur utilisé pour la détection de fréquence dans les systèmes de modulation de fréquence (FM).

### 3. Technique de traçage de la courbe caractéristique du discriminateur

Pour tracer la courbe caractéristique d'un discriminateur, deux méthodes sont utilisées:

- a) **Statique** : La fréquence du générateur BF à l'entrée du discriminateur est ajustée, et la tension continue en sortie est mesurée. Ainsi, les valeurs pour l'ensemble de la courbe peuvent être enregistrées. Cependant, la réponse du discriminateur au signal modulé ne peut pas être évaluée.

b) **Test Dynamique** : Pour cette configuration, la connexion illustrée dans la figure 2 est employée, et la courbe caractéristique est relevée sur l'oscilloscope.

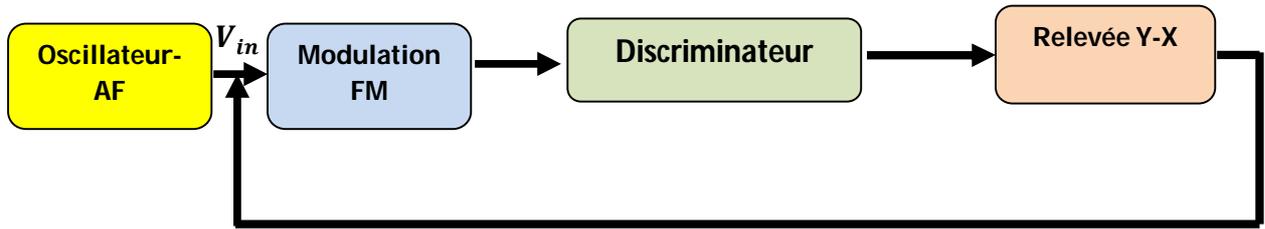


Fig.3. Circuit de test dynamique du discriminateur

#### 4. Principe du discriminateur à circuit résonnant unique

Dans ce TP on se servi du circuit discriminateur à circuit résonnant unique donné dans la figure ci-dessous :

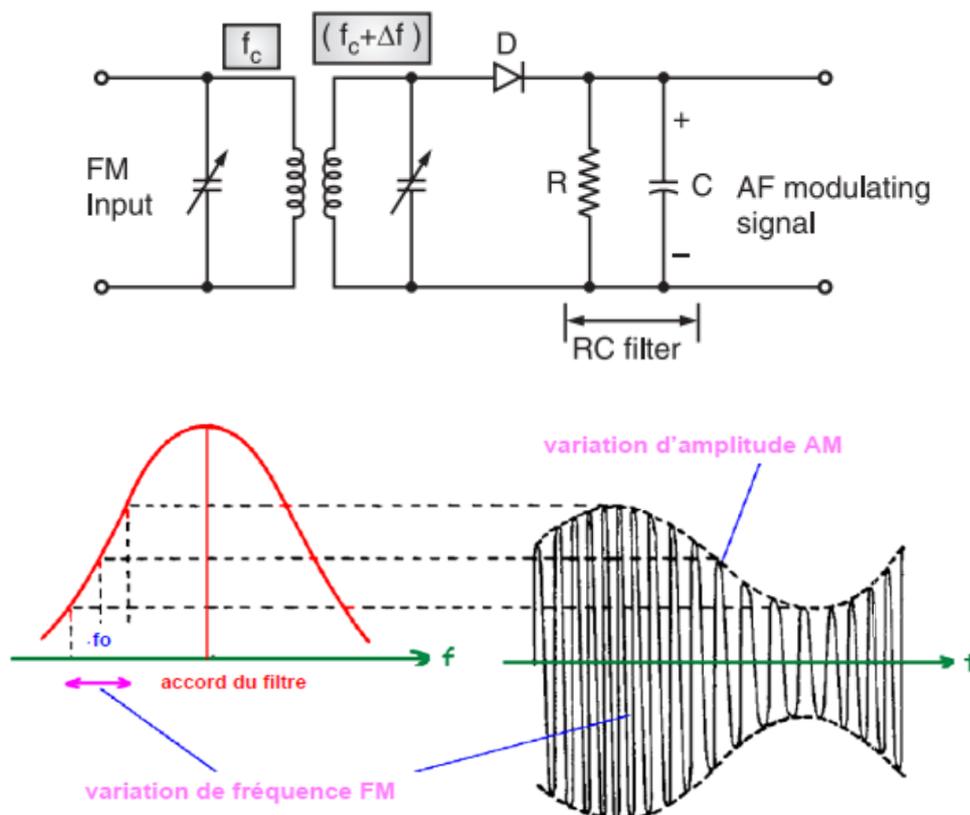


Fig.3. Discriminateur à circuit résonnant unique

La fréquence centrale du signal  $F_0$  est captée le long du flanc du filtre accordé à  $F_f$ . Les fluctuations de fréquence sur ce flanc entraînent des fluctuations d'amplitude. En sortie du filtre, l'amplitude fluctue en réponse aux variations de la fréquence  $F_0$ . Ces fluctuations d'amplitude sont démodulées à l'aide d'un détecteur crête AM afin de récupérer le signal modulant.

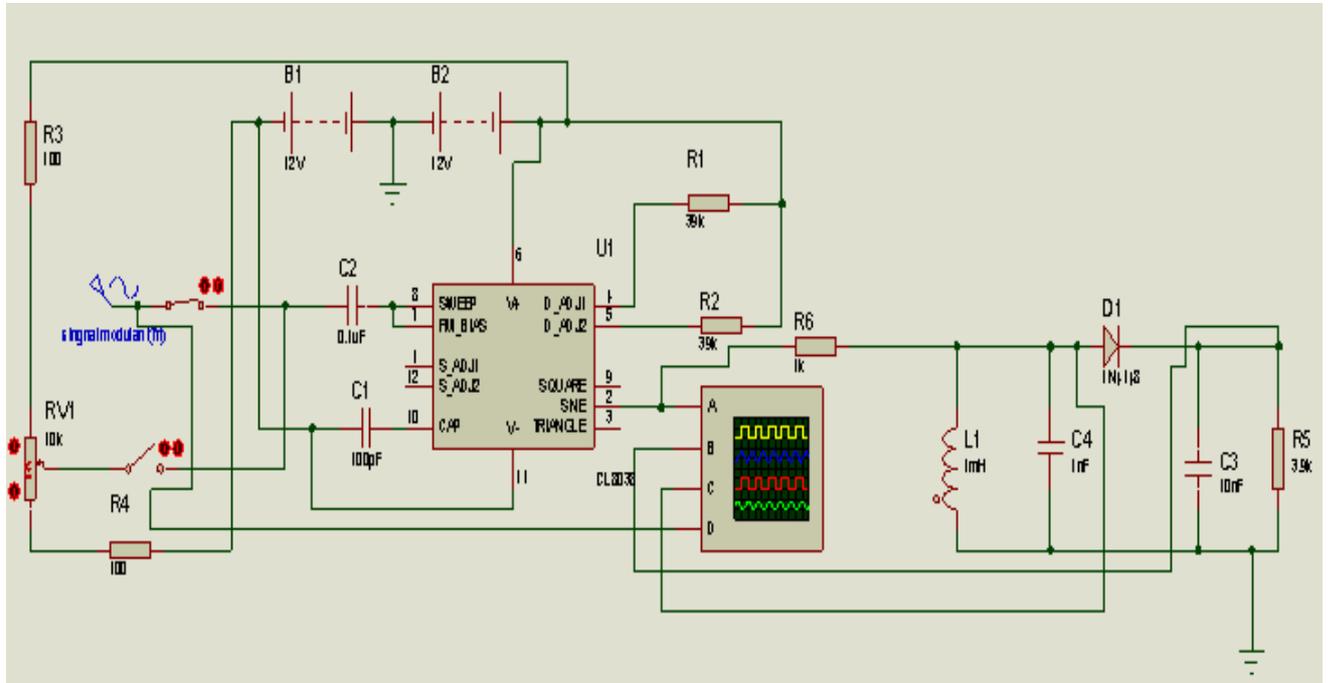
## **5. Travail demandé**

### **5.1. Etude théorique**

1. Qu'est-ce que la modulation de fréquence (FM) et pourquoi est-elle utilisée dans les communications?
2. Comment fonctionne un discriminateur FM dans le processus de démodulation?
3. Comment la sensibilité de fréquence d'un discriminateur influence-t-elle la qualité de la démodulation FM?
4. Expliquez le rôle d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) dans la démodulation FM.

### **5.2. Etude pratique**

- [1] Réaliser le circuit de démodulation FM suivant la figure . et relier-le avec celui de modulation FM du TP précédent.
- [2] Observer le signal à l'entrée et la sortie du circuit.
- [3] Vérifier que la constante du temps  $R_5.C_3$  coïncide avec la fréquence du signal modulant (le message à l'entrée du circuit)
- [4] Mesurer l'indice de modulation du signal modulé en amplitude (avant la diode)
- [5] Mesurer la fréquence du signal à la sortie du démodulateur.
- [6] Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal modulant sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.
- [7] Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal porteur sur le signal de sortie du démodulateur (Utiliser la formule  $f_c=0.33/R_1C_1$ ). Commentez les résultats.
- [8] Analyser l'effet du changement de l'inductance  $L_1$  sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.
- [9] Donner une conclusion sur la forme du signal démodulé



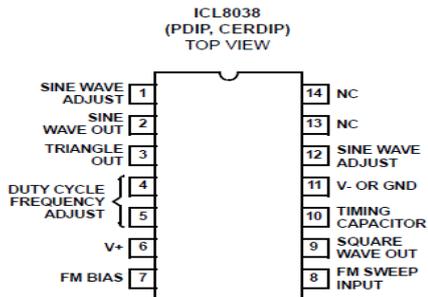
**Fig.4.** Circuit de démodulation de fréquence

### Annexe

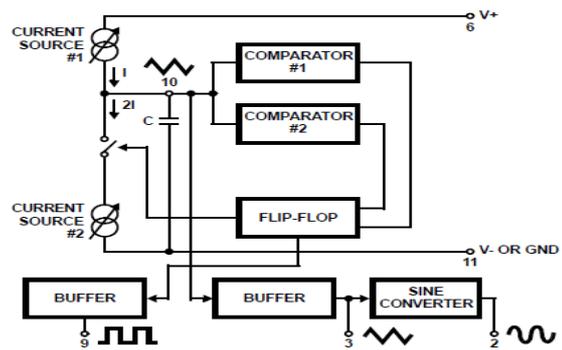
#### Caractéristiques technique du PLL ICL8038

Le générateur de formes d'onde ICL8038 est un circuit intégré capable de produire des signaux sinusoïdaux, carrés, formes d'onde triangulaires, en dents de scie et à impulsions avec un minimum de composants externes. La fréquence (ou taux de répétition) peut être sélectionné en externe de 0,001 Hz à plus de 300 kHz en utilisant des résistances ou des condensateurs, et la modulation de fréquence ainsi que le balayage peuvent être accomplis à l'aide d'une source tension externe.

**Pinout**



**Functional Diagram**



**Caractéristiques**

- Dérive basse fréquence avec la température. .... 250 ppm/°C
- Faible distorsion..... 1 % (sortie d'onde sinusoïdale)
- Haute linéarité. .... 0,1 % (sortie d'onde triangulaire)
- Large gamme de fréquences. .... 0.001Hz à 300kHz
- Cycle de service variable. .... 2% à 98%
- Sorties de haut niveau. .... TTL à 28V
- Ondes de sorties sinusoïdales, carrées et triangulaires simultanées
- Facile à utiliser - Juste une poignée de composants externes

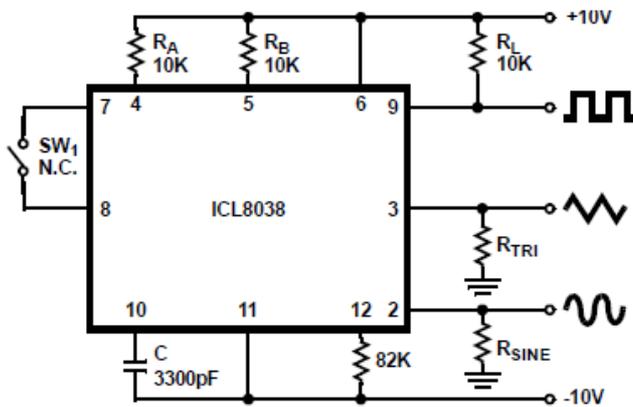


FIGURE 1. TEST CIRCUIT

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{R_A C \left( 1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

if  $R_A = R_B = R$   $f = \frac{0.33}{RC}$

Groupe : .....

## Rapport De TP N°07

Date : .....

### Noms /prénoms

1) ..... 3) .....  
2) ..... 4) .....

### A. Etude théorique

1. Observer le signal à l'entrée et la sortie du circuit et donner vos commentaires.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2. Vérifier que la constante du temps  $R_5.C3$  coïncide avec la fréquence du signal modulant (le message à l'entrée du circuit)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. Mesurer l'indice de modulation du signal modulé en amplitude (avant la diode)

.....  
.....  
.....  
.....

4. Mesurer la fréquence du signal à la sortie du démodulateur.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

5. Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal modulant sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.

.....  
.....  
.....  
.....

6. Analyser l'effet du changement de la fréquence du signal porteur sur le signal de sortie du démodulateur (Utiliser la formule  $f_c=0.33/R_1C_1$ ). Commentez les résultats.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

7. Analyser l'effet du changement de l'inductance  $L_1$  sur le signal de sortie du démodulateur Commentez les résultats.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

8. Donner une conclusion sur la forme du signal démodulé

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## Synthétiseur de fréquence à base de PLL

### 1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est de concevoir, de simuler, et de réaliser un synthétiseur de fréquence basé sur une boucle à verrouillage de phase (PLL - Phase-Locked Loop). Les étudiants vont apprendre comment fonctionne un synthétiseur de fréquence et comment les éléments clés d'un circuit PLL interagissent pour générer une fréquence stable et ajustable.

### 2. **Avantages et Applications**

Les synthétiseurs de fréquence par PLL offrent plusieurs avantages :

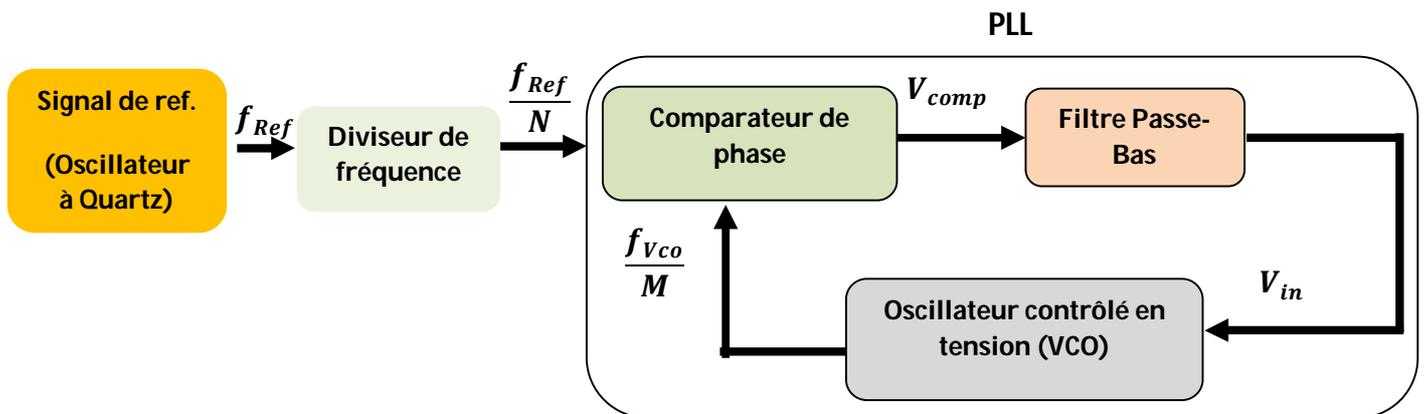
- **Précision et Stabilité** : Ils permettent de produire des fréquences très précises et stables.
- **Flexibilité** : En changeant le facteur de division, on peut obtenir une large gamme de fréquences à partir d'une seule source de référence.
- **Rapidité de Réponse** : La PLL permet de verrouiller rapidement la fréquence, ce qui est crucial dans les applications de communication.

### 3. Rappels théoriques

Un **synthétiseur de fréquence** est un dispositif électronique qui génère une variété de fréquences de sortie à partir d'une source de fréquence unique et stable. On le retrouve dans de nombreux appareils, comme les radios, les téléviseurs, les téléphones mobiles et les équipements de communication, où il permet de régler ou de syntoniser différentes fréquences. Il existe plusieurs types de synthétiseurs de fréquence, mais l'un des plus courants est le **synthétiseur de fréquence par boucle à verrouillage de phase (PLL)**.

Le système PLL de base est illustré dans la Figure 1. Le système se compose de cinq parties : un oscillateur, un diviseur de fréquence, un comparateur de phase, un filtre passe-bas (LPF) et un oscillateur contrôlé en tension (VCO). Tous les éléments sont connectés pour former un système de rétroaction en boucle fermée de fréquence.

Son objectif est de forcer le VCO à reproduire et suivre la fréquence et la phase de l'entrée lorsqu'il est verrouillé. Le PLL est un système de contrôle permettant à un oscillateur de suivre un autre. Il peut y avoir un décalage de phase entre l'entrée et la sortie, mais une fois verrouillées, les fréquences doivent suivre exactement.



**Fig.1** Schéma représentatif du synthétiseur de fréquence à base de PLL

- **Oscillateur de Référence** : Génère une fréquence stable, par exemple 10 MHz avec un oscillateur à quartz.
- **Diviseur de Fréquence de Référence** : Divise la fréquence de référence pour adapter le signal d'entrée de la PLL.
- **Comparateur de Phase** : Compare la phase du signal de la référence (divisé) avec la phase du signal de sortie du VCO (également divisé) et génère un signal d'erreur.
- **Filtre Passe-Bas** : Filtre le signal d'erreur pour éliminer les oscillations et bruit indésirables, créant une tension lisse pour piloter le VCO.
- **Oscillateur Contrôlé en Tension (VCO)** : Génère un signal de fréquence qui dépend de la tension du filtre passe-bas.
- **Diviseur de Fréquence de Boucle (M)** : Divise la fréquence de sortie du VCO pour adapter la boucle PLL.

- **Sortie du Synthétiseur** : La fréquence de sortie est fonction de la fréquence de référence et des valeurs de division (N et M).

Un synthétiseur de fréquence basé sur une boucle à verrouillage de phase (PLL) repose sur des relations mathématiques simples mais essentielles entre les composants pour obtenir une fréquence stable et contrôlée.

Le cœur d'un synthétiseur de fréquence PLL repose sur la relation de fréquence suivante :

$$f_{\text{sortie}} = f_{\text{Ref}} \cdot \frac{M}{N}$$

Où :

- $f_{\text{Ref}}$  est la fréquence de l'oscillateur de référence.
- $N$  est le facteur de division de la fréquence de référence.
- $M$  est le facteur de division dans la boucle de rétroaction du VCO.

En ajustant M et N, le synthétiseur peut générer une large gamme de fréquences de sortie basées sur une fréquence de référence fixe.

- **Comparaison de Phase**

Le comparateur de phase compare la fréquence de référence divisée :  $\frac{f_{\text{Ref}}}{N}$  avec la fréquence de retour  $\frac{f_{\text{Vco}}}{M}$ .

La différence de phase produit un signal d'erreur  $V_{\text{comp}}$  proportionnel à la différence de fréquence et de phase entre ces deux signaux.

- **Filtrage**

Le signal d'erreur passe dans un filtre passe-bas pour lisser les variations et réduire le bruit. La sortie du filtre génère une tension continue qui est appliquée au VCO pour ajuster sa fréquence.

Le filtre passe-bas a une fonction de transfert qui dépend de sa constante de temps  $\tau = RC$  (où R et C sont la résistance et la capacité du filtre).

- **Fréquence du VCO**

Le VCO produit une fréquence  $f_{VCO}$  proportionnelle à la tension d'entrée  $V_{in}$ , avec une relation approximative :  $f_{VCO} = f_{center} + K_{VCO} \cdot V_{in}$

Avec  $K_{VCO}$  représente la sensibilité du VCO, indiquant le changement de fréquence pour chaque volt de changement de tension d'entrée.

- **Condition de Verrouillage**

Le système est verrouillé quand :  $\frac{f_{Ref}}{N} = \frac{f_{VCO}}{M}$

Cette condition garantit que la fréquence de sortie suit précisément la fréquence de référence, multipliée par le rapport **M/N**.

#### **4. Travail demandé**

##### **4.1. Etude théorique**

1. Rédigez un résumé bref, sur le contexte du circuit PLL, du VCO, du comparateur de phase et du filtre passe-bas. Le résumé doit être dans vos propres mots.
2. Déterminez les fonctions de transfert pour le réseau RC.
3. Donner des exemples de circuit comparateur

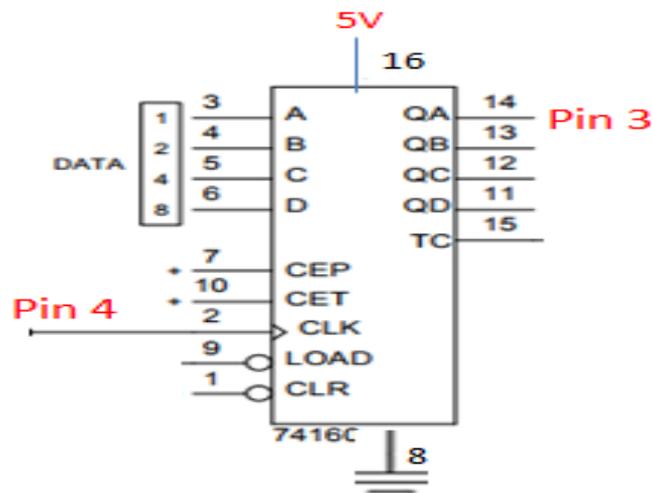
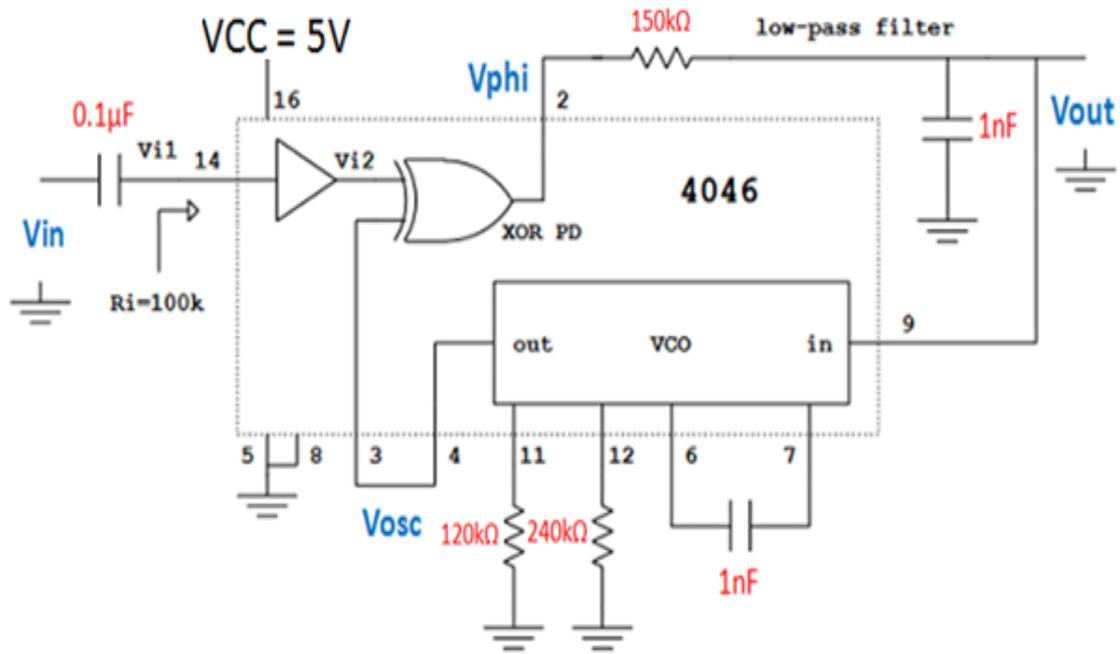
##### **4.2. Etude pratique**

Les composants nécessaires pour réaliser le circuit sont :

- Circuit PLL CD4046,
  - Compteur décimal 4 bits 74160,
  - Condensateurs : 0.1uF, 2x 1nF,
  - Résistances : 120kΩ, 150kΩ, 240kΩ.
  - Oscilloscope
  - GBF ou oscillateur à Quartz.
- 1) En utilisant les composants ci-dessus, réalisez le montage de la figure 2,
  - 2) Calculer la fréquence libre du VCO,
  - 3) Appliquez une tension de 0, 1, 2,5, 4 et 5V à la broche 9 avant de connecter le filtre passe-bas et enregistrez les fréquences correspondantes.
  - 4) Tracez la courbe de  $V_{out}$  en fonction de la fréquence.

- 5) Appliquez un signal d'entrée  $V_{in}$  en forme d'onde carrée avec un cycle de travail de 50 % et une fréquence proche de la fréquence de fonctionnement libre  $f_0$ ; le  $V_{osc}$  devrait se verrouiller sur  $V_{in}$ .
- 6) Mesure de plage de verrouillage (Lock Range)
- a) Diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se déverrouille. Notez la fréquence de déverrouillage et comparez-la avec  $f_{min}$ .
  - b) Augmentez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se déverrouille. Notez la fréquence de déverrouillage et comparez-la avec  $f_{max}$ .
- 7) Mesure de plage de capture (Capture Range)
- a) Depuis l'étape **6a**, augmentez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille. Notez la fréquence de verrouillage.
  - b) Depuis l'étape **6b**, diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille. Notez la fréquence de verrouillage.
- 8) Calculez la fréquence de coupure et la fonction de transfert du filtre passe-bas.
- 9) Calculez le gain de phase  $K_D$  et le gain du VCO :  $K_{VCO}$ .
- 10) Synthétiseur de fréquence
- a) Connectez la broche 3 du PLL CD4046 à la broche 2 du N74160.
  - b) Connectez la broche 14 du N74160 à la broche 3 du PLL CD4046.
  - c) Diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille et capturez les formes d'onde.

Tensions appliquées au Pin 9 (entrée VCO)	Fréquence de sortie
Pas de tension	
0V	
1V	
2.5V	
4V	
5V	



Groupe : .....

## Rapport De TP N°07

Date : .....

### Noms /prénoms

3) ..... 3) .....  
4) ..... 4) .....

### A. Etude théorique

1. Rédigez un résumé bref, sur le contexte du circuit PLL, du VCO, du comparateur de phase et du filtre passe-bas. Le résumé doit être dans vos propres mots.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2. Déterminez les fonctions de transfert pour le réseau RC.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. Donner des exemples de circuit comparateur

.....  
.....  
.....  
.....

### B. Etude pratique

1. Calculer la fréquence libre du VCO,

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

- .....  
.....
2. Appliquez une tension de 0, 1, 2,5, 4 et 5V à la broche 9 avant de connecter le filtre passe-bas et enregistrez les fréquences correspondantes.

.....  
.....  
.....  
.....

3. Tracez la courbe de  $V_{out}$  en fonction de la fréquence.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

4. Appliquez un signal d'entrée  $V_{in}$  en forme d'onde carrée avec un cycle de travail de 50 % et une fréquence proche de la fréquence de fonctionnement libre  $f_0$ ; le  $V_{osc}$  devrait se verrouiller sur  $V_{in}$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**5. Mesure de plage de verrouillage (Lock Range)**

- a) Diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se déverrouille. Notez la fréquence de déverrouillage et comparez-la avec  $f_{min}$ .

.....  
.....  
.....  
.....

.....  
.....  
.....  
.....

b) Augmentez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se déverrouille. Notez la fréquence de déverrouillage et comparez-la avec  $f_{max}$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**6. Mesure de plage de capture (Capture Range)**

a. Depuis l'étape **6a**, augmentez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille. Notez la fréquence de verrouillage.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

b. Depuis l'étape **6b**, diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille. Notez la fréquence de verrouillage.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

7. Calculez la fréquence de coupure et la fonction de transfert du filtre passe-bas.

.....  
.....  
.....  
.....

.....  
.....  
.....  
.....

8. Calculez le gain de phase  $K_D$  et le gain du VCO :  $K_{VCO}$

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

9. Synthétiseur de fréquence

- a) Connectez la broche 3 du PLL CD4046 à la broche 2 du N74160.
- b) Connectez la broche 14 du N74160 à la broche 3 du PLL CD4046.
- c) Diminuez la fréquence de  $V_{in}$  jusqu'à ce que le PLL se verrouille et capturez les formes d'onde.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....